



Comparación de losas macizas de hormigón mediante dos enfoques

Comparison of solid concrete slabs using two approaches

Farith Augusto Hinojosa Coca

faches.18@gmail.com

hinojosafarith@gmail.com

ORCID 0000-0002-5525-6228

Universidad Autónoma Tomás Frías, Bolivia

Artículo recibido mayo 2019 | Arbitrado en julio 2019 | Publicado en septiembre 2019

RESUMEN

En esta investigación, se realizó la comparación técnico – económica de los resultados obtenidos del diseño de losas macizas de hormigón armado a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura. El objetivo de la investigación fue cuantificar los efectos que causa el empleo del método de análisis plástico de líneas de rotura, en el diseño de losas macizas de hormigón armado en cuanto al consumo de acero de refuerzo y en cuanto a las flechas y anchos de fisura en el estado límite de servicio. Se realizó la modelación del comportamiento resistente y deformacional de losas macizas en dos direcciones con el fin de definir los casos de estudio de la investigación. Se comprobó los estados límite de servicio en ambos casos de diseño y se efectuó una comparación técnico – económica de los resultados alcanzados por ambos casos de diseño, en cuanto a los valores de la cuantía y costo del acero de refuerzo, los anchos de fisura y las flechas que presenta cada caso de estudio.

Palabras clave: Losas; Hormigón; norma CBH 87, enfoque elástico; enfoque plástico

ABSTRACT

In this research, the technical-economic comparison of the results obtained from the design of solid reinforced concrete slabs was carried out from the structural analysis using the elastic approach of the CBH 87 standard and the plastic approach of the theory of break lines. The objective of the research was to quantify the effects caused by the use of the plastic analysis method of break lines, in the design of solid reinforced concrete slabs in terms of the consumption of reinforcing steel and in terms of the arrows and crack widths in the service limit state. The modeling of the resistant and deformational behavior of solid slabs in two directions was carried out in order to define the research study cases. The service limit states were checked in both design cases and a technical-economic comparison was made of the results achieved by both design cases, regarding the values of the amount and cost of the reinforcing steel, the crack widths and the arrows presented by each case study.

Key words: Slabs; Concrete; CBH standard 87, elastic approach; plastic focus



INTRODUCCIÓN

Las losas son elementos estructurales planos cuyo espesor es pequeño comparado con sus otras dimensiones y que forman parte de un entrepiso, estas tienen como función estructural el soporte directo de las cargas que actúan sobre ellas, y la transmisión de las mismas hacia otros elementos estructurales como vigas, columnas y tabiques.

Las losas admiten diferentes clasificaciones en función a distintos criterios e indicadores, si se toma en cuenta los materiales y los procedimientos con que son construidas, éstas se clasifican en losas macizas o sólidas; losas nervadas, y losas tipo alivianadas con elementos prefabricados.

En particular, las losas macizas son aquellas que en todo su espesor, generalmente constante, están constituidas por hormigón con la adecuada cantidad de armadura normalmente dispuesta en dos direcciones perpendiculares y que deben tomar los esfuerzos de tracción generados por los momentos flectores y torsores, además de los esfuerzos de corte, (Llopiz, 2009).

En cuanto a las metodologías de análisis y diseño de sistemas de losas de hormigón armado, en general pueden distinguirse las siguientes dos filosofías: Métodos basados en la teoría elástica y Métodos basados en la teoría plástica.

Aunque existen además algunos procedimientos que usan fundamentos de ambas teorías, como se puede ver en el código ACI y otras normas internacionales, sin embargo los métodos de análisis y diseño más utilizados en cada país, generalmente están prescritos en sus normativas correspondientes.

En la actualidad, existen varias normas en Bolivia, las cuales regulan la proyección,

ejecución, construcción y supervisión de obras, tal es el caso de la norma CBH 87 – Código Boliviano del Hormigón, una norma vigente para el diseño de elementos estructurales de hormigón armado, la cual presenta procedimientos, recomendaciones, parámetros y límites, para que el diseño cumpla con todos los requerimientos de resistencia, utilidad y seguridad.

La norma CBH 87 tiene una filosofía de diseño similar a la del código ACI y a la de la norma española EHE, ya que se apoyó principalmente en esta última para delimitar sus bases y referentes; dicha filosofía engloba una tendencia al enfoque elasto-plástico para el diseño de las estructuras y sus elementos.

Este enfoque se traduce, en el análisis de los elementos estructurales utilizando la teoría elástica, y en el diseño de los mismos, utilizando la teoría plástica; es decir, determinando las sollicitaciones provocadas por las cargas a las que está sujeto un elemento, mediante métodos aproximados derivados de la teoría elástica, o a partir del manejo de programas de análisis estructural basados en el método de los elementos finitos, y determinando el refuerzo estructural y la geometría del elemento mediante el método de los estados límites últimos, minorando las resistencias de los materiales y ponderando el efecto de las sollicitaciones, a partir de coeficientes de minoración y de ponderación.

Sin embargo, existen otros enfoques, los cuales a partir del nacimiento del método de los elementos finitos, han sido desplazados, o no se les ha dado la atención correspondiente, tal es el caso de la teoría de líneas de rotura.

La teoría de líneas de rotura es un método plástico de análisis y diseño, que evalúa el comportamiento de un elemento estructural en carga última, es decir, en el



punto de colapso, momento en el cual, se produce una plastificación del elemento y las deformaciones empiezan a producirse de una manera no proporcional a los esfuerzos que las provocan; esta teoría o método permite determinar la capacidad de carga real que tiene un elemento, además proporciona solicitaciones que hacen posible un diseño en el cual el comportamiento del elemento resulta más homogéneo, con posibles beneficios de carácter económico, en cuanto se refiere a la reducción del consumo de material.

Estudios que emplean a la teoría de líneas de rotura, han dado excelentes resultados en los elementos que han sido analizados y diseñados a partir de este método, en particular, Görkem y Hüsem (2013) encontraron en su investigación, que para las losas de concreto de alta resistencia, ensayadas hasta el colapso, la diferencia entre los momentos encontrados por la teoría de líneas de rotura y los momentos hallados experimentalmente era de 1% a 3%, lo que nos da a entender las capacidades del método.

A lo largo de la historia, la teoría de líneas de rotura fue aceptada en los códigos de varios países por muchos años, Dinamarca y Suecia fueron algunos de ellos; por su parte, el código británico aceptó la teoría de líneas de rotura desde 1957, y en su edición de 1997 declaró que el método puede ser utilizado “siempre que las relaciones entre los momentos en los apoyos y los momentos en los vanos, sean similares a aquellas obtenidas por el uso de la teoría elástica”. (Park y Gamble, 2000).

El Comité Europeo del Concreto y la Federación Internacional de Pretensado recomendaron la teoría de líneas de rotura como un posible enfoque para el diseño de losas, siempre que los estados de servicio son verificados.

Por su parte, el código ACI de 2014 declara que “un sistema de losa se puede diseñar mediante cualquier procedimiento que cumpla con las condiciones de equilibrio y compatibilidad geométrica, siempre que la resistencia de diseño en cada sección sea al menos igual a la resistencia requerida, y que se cumplan todos los requisitos de funcionamiento” (ACI Committee 318., 2014).

El empleo de la teoría de líneas de rotura durante muchos años en Europa y otras partes del mundo, se constituye en un impulso para utilizar este método en cuanto se refiere al análisis y diseño de losas de hormigón armado. Todos estos factores implican que la teoría de líneas de rotura, no solo puede ser empleada en el análisis y diseño de losas macizas de hormigón armado, sino que también sus resultados son bastante precisos.

Después de tener conocimiento de las capacidades, ventajas y desventajas del método de la teoría de líneas de rotura, surge la duda acerca de los resultados que se podrían obtener si se la utiliza en el análisis y diseño de losas macizas en nuestro medio, en comparación a los resultados que presenta el enfoque de análisis y diseño estipulado en la norma nacional CBH 87.

El problema científico del estudio se basa en ¿Cómo influye el empleo del método de análisis plástico de líneas de rotura, en la cuantía del acero de refuerzo y en las flechas y anchos de fisura en el estado límite de servicio de las losas macizas de hormigón armado? Manteniendo como objeto de estudio las losas macizas de hormigón armado. El campo de acción se ubica en el Diseño de losas macizas de hormigón armado de geometría rectangular, a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.



La investigación tiene la finalidad de cuantificar los efectos que causa el empleo del método de análisis plástico de líneas de rotura, en el diseño de losas macizas de hormigón armado, en cuanto al consumo de acero de refuerzo y en cuanto a las flechas y anchos de fisura en el estado límite de servicio.

La importancia radica en que cuando se diseñan elementos de hormigón armado, se determinan los esfuerzos internos a partir de un análisis estructural elástico, mientras que, paradójicamente, el dimensionamiento de las secciones y la determinación del acero de refuerzo se obtienen de un diseño estructural inelástico; esta evidente inconsistencia, condujo al surgimiento de procedimientos fundamentados en el análisis límite de los elementos estructurales, procedimientos con los cuales, además de abordar ambas etapas bajo el mismo enfoque, es posible que una redistribución de los esfuerzos internos dé como resultado un mejor comportamiento en el elemento.

De esta manera, el diseño de losas macizas de hormigón armado a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico, en comparación al enfoque elástico convencional, podría implicar posibles beneficios económicos en cuanto se refiere al ahorro de acero de refuerzo, debido a que si se toman en cuenta las propiedades plásticas de los materiales, se puede obtener una losa con un comportamiento más real y homogéneo, ya que se considera la capacidad de carga portante real de la misma.

Dicho comportamiento se debe a que el análisis estructural mediante el enfoque plástico, obtiene solicitaciones que permiten una distribución homogénea de acero de refuerzo en todas las direcciones de la losa, lo cual además, podría contribuir en que el

proceso de armado resulte mucho más práctico, en relación con la distribución de acero de refuerzo obtenida a partir de las solicitaciones del análisis estructural elástico, simplificando así, la ejecución y la supervisión de dicho proceso constructivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se realizó para cada uno de los casos de estudio, el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura y la verificación de los estados límite de servicio en ambos diseños, con el fin de obtener y comparar, los valores de la cuantía y costo del acero, los anchos de fisura y las flechas que presenta cada paño de losa en cada caso de diseño.

Datos de los materiales

En base a la normativa y a la tendencia actual en Bolivia, los datos que se asumieron para las características mecánicas de los materiales en esta investigación, son los siguientes: Hormigón, Acero, Hormigón armado

RESULTADOS

Parámetros iniciales para el análisis, diseño y verificación de losas macizas

Geometría y dimensiones de los casos de estudio

Los casos de estudio de esta investigación, fueron todos de geometría rectangular, donde el peralte o espesor de la losa, puede variar de paño a paño, en función de sus dimensiones, su comportamiento y los requerimientos de resistencia y utilidad de la sección.



Para determinar un valor inicial del peralte para los casos de estudio, es necesario realizar un predimensionamiento,

el cual está en función de los criterios de utilidad expuestos en las normas CBH 87 y ACI 318-14.

Cargas

Carga muerta

La carga muerta a la que están sujetos los casos de estudio, la compone el peso propio de la estructura, es decir, el peso de la losa maciza, el peso de la carpeta de nivelación, el peso del cielo raso y el peso de la solución de piso

Carga viva

La carga viva definida para un entrepiso con función de almacén de acuerdo a la norma ASCE/SEI 7-16.

Combinaciones de carga

La combinación de carga crítica para un elemento estructural sujeto a cargas gravitacionales, está dada por las siguientes expresiones:

Resistencia: $G + Q$

Servicio: $G + Q$

Recubrimiento mínimo y peralte efectivo de la sección

De acuerdo a los elementos estructurales protegidos y no expuestos a la intemperie, el recubrimiento debe tener un valor mínimo de 15 mm; a partir de este criterio, en esta investigación se asumió un recubrimiento de:

rec 20mm

Para el cálculo del peralte efectivo de la sección en cada caso de estudio, fue necesario asumir el diámetro de acero principal que fue distribuido en ambas direcciones.

Coefficientes de seguridad y resistencias de cálculo para el diseño

De acuerdo a la tabla 1 del marco teórico, para el diseño mediante los estados límites últimos con un control de calidad normal, los coeficientes de seguridad, son:

Coefficiente de minoración para el acero:

$\gamma_s = 1.15$

Coefficiente de minoración para el hormigón:

$\gamma_c = 1.5$

Coefficiente de ponderación de las solicitaciones:

$\gamma_f = 1.6$

Flecha admisible y coeficiente ξ para el tiempo de aplicación de carga

Para comprobar el estado límite de deformación en un paño de losa, inicialmente es necesario definir la flecha admisible, el coeficiente ξ en función del tiempo de aplicación de la carga y si la comprobación de deformación se realiza con la inercia bruta, la inercia fisurada o la inercia efectiva del elemento analizado.



De acuerdo al CBH 87, los valores de la flecha admisible para entrepisos que no soportan muros ni tabiques y del coeficiente ξ para un tiempo de aplicación mayor o igual a 5 años.

La determinación de la inercia necesaria para la comprobación, se logra a partir de la ecuación 42 y el coeficiente β que interviene en ella.

Diseño de losas a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico

Análisis estructural – Método de Marcus

En el análisis estructural mediante el método de Marcus, se obtuvo el porcentaje

de carga y las solicitaciones presentes en los paños de losa en cada dirección, para esto se recurre a la clasificación de losas y a los coeficientes por condiciones de contorno establecidos por Marcus. La carga que se utiliza en el método, es la carga total por unidad de área, sin embargo, como el análisis se realiza por fajas de ancho unitario en cada dirección, esta carga es linealizada por metro de ancho.

Paño de losa número 3

El caso de estudio número 3 (figura 1) es un paño de losa tipo 2 donde las fajas centrales de los haces de cada dirección, tienen las siguientes condiciones de contorno y coeficientes correspondientes:

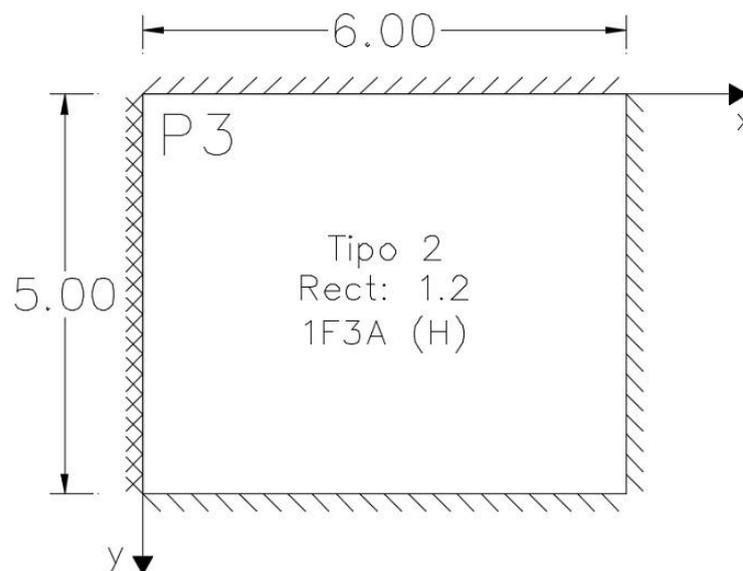


Figura 1: Paño de losa número 3 – clasificación de paño por Marcus, rectangularidad y condiciones de contorno.



Diseño estructural - Estado límite último de rotura

Verificación del peralte y re cálculo de solicitaciones

Para verificar que el peralte inicialmente asumido para los casos de estudio, cumple con los requerimientos de resistencia para el diseño, se calculó el peralte recomendable para cada paño de losa, en función de las solicitaciones presentes y se comparan ambos valores. Para determinar el valor del peralte recomendable, se analizaron los resultados del re cálculo de estos valores para los paños de losa restantes.

Cálculo del refuerzo estructural

El refuerzo estructural requerido por una sección de losa, se calculó por un ancho

unitario, para determinar el refuerzo estructural de los paños de losa en las direcciones “x” y “y”, a partir del método del estado límite último de rotura.

Esquema de distribución, cuantía y costo del acero de los casos de estudio

Una vez concluido el diseño de los paños de losa a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico, y habiéndose realizado la comprobación de los estados límite de servicio, se adjuntan los esquemas de distribución de acero de cada uno de los casos de estudio, a partir de los cuales, se determinan sus correspondientes planillas de cuantía y costo del acero; en particular para el paño de losa número 3, se muestra en la figura 2 y su análisis en la tabla 1.

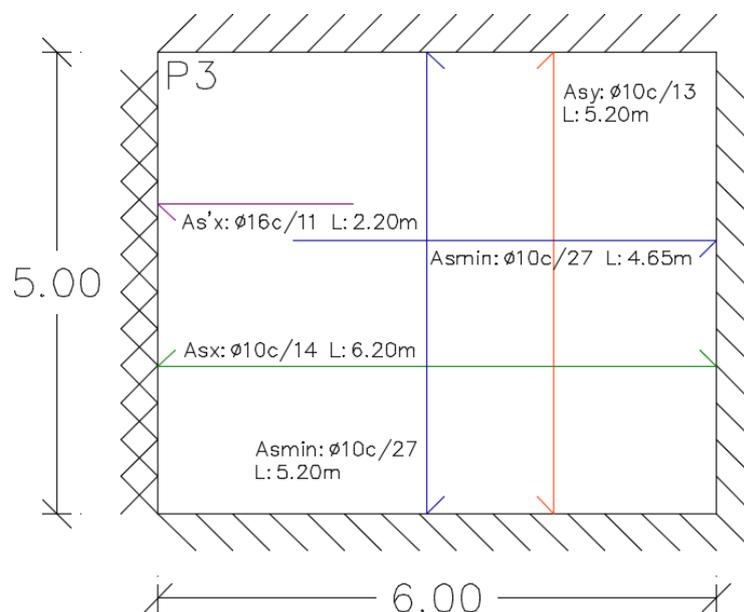


Figura 2. Esquema de distribución de acero para el paño de losa número 3 - Paño diseñado a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico.



Tabla 1. Cuantía y costo del acero para el paño de losa número 3 – Paño diseñado a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico.

<i>Paño</i>	ϕ	<i>Sb</i>	<i>L</i>	<i>Nºb</i>	<i>L Total</i>	<i>Cuantía</i>	<i>Precio</i>
3	(mm)	(cm)	(m)		(m)	(cm ³)	(Bs)
<i>Asx</i>	10	14	6.2	37	229.4	18017	904
<i>Asy</i>	10	13	5.2	47	244.4	19195	963
<i>As'x</i>	16	11	2.2	46	101.2	20347	1069
<i>As'y</i>	10	27	5.2	23	119.6	9393	471
<i>Asmin(x)</i>	10	27	4.65	20	93	7304	367
<i>Asmin(y)</i>							
TOTAL						74257	4152

Los esquemas de distribución de acero para los paños de losa restantes, en una escala de 1:100; así mismo, sus correspondientes planillas de cuantía y costo del acero.

Cuantía y costo del acero en los casos de estudio

En la tabla 2, se adjunta el resumen, la comparación y la diferencia de los resultados alcanzados para la cuantía y el costo del acero de refuerzo en los casos de estudio, los cuales fueron diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.

Tabla 2. Comparación entre los resultados de cuantía y costo de acero obtenidos por ambos casos de diseño.

<i>Paño</i>	<i>Dim.</i> (m x m)	<i>Rect.</i> β	<i>Cuantía (cm³)</i>				<i>Precio (Bs)</i>			
			<i>CBH 87</i>	<i>T.L.R.</i>	Δ	$\Delta\%$	<i>CBH 87</i>	<i>T.L.R.</i>	Δ	$\Delta\%$
1	6 x 3	2.0	27740	25101	2639	9.5	1531	1386	146	9.5
2	6 x 4	1.5	48772	42066	6706	13.7	2719	2322	397	14.6
3	6 x 5	1.2	74257	63289	10968	14.8	4152	3527	625	15.1
4	6 x 6	1.0	94323	81449	12874	13.6	5278	4542	736	14.0
5	6 x 3	2.0	27772	23766	4006	14.4	1533	1312	221	14.4
6	6 x 4	1.5	47358	40117	7241	15.3	2650	2238	413	15.6
7	6 x 5	1.2	72909	61858	11051	15.2	4087	3449	637	15.6
8	6 x 3	2.0	27010	23460	3550	13.1	1491	1295	196	13.1
9	6 x 4	1.5	45121	37165	7956	17.6	2521	2052	469	18.6
10	6 x 5	1.2	73723	58095	15628	21.2	4147	3239	908	21.9
11	6 x 6	1.0	103134	79954	23180	22.5	5802	4489	1313	22.6
12	6 x 3	2.0	25792	22274	3519	13.6	1424	1230	194	13.6
13	6 x 4	1.5	44038	35076	8962	20.4	2488	1936	551	22.2
14	6 x 5	1.2	63140	48667	14473	22.9	3547	2687	861	24.3
15	6 x 6	1.0	97979	71701	26278	26.8	5533	4016	1517	27.4



Paño	Dim. (m x m)	Rect. β	Cuantía (cm ³)				Precio (Bs)			
			CBH 87	T.L.R.	Δ	$\Delta\%$	CBH 87	T.L.R.	Δ	$\Delta\%$
16	6 x 3	2.0	26248	23256	2992	11.4	1449	1284	165	11.4
17	6 x 4	1.5	46065	36262	9804	21.3	2570	2002	569	22.1
18	6 x 5	1.2	74478	54884	19594	26.3	4204	3030	1174	27.9
19	6 x 3	2.0	25038	22023	3016	12.0	1382	1216	166	12.0
20	6 x 4	1.5	44014	33427	10587	24.1	2430	1845	584	24.1
21	6 x 5	1.2	64030	48632	15398	24.0	3586	2685	902	25.1
22	6 x 6	1.0	90614	63916	26699	29.5	5129	3529	1601	31.2
Total					247119	403.3	Total		14345	416.3
Media					11233	18.3	Media		652	18.9

Los resultados de la tabla 2, se expresan de mejor manera, a través de las figuras 3 y 4

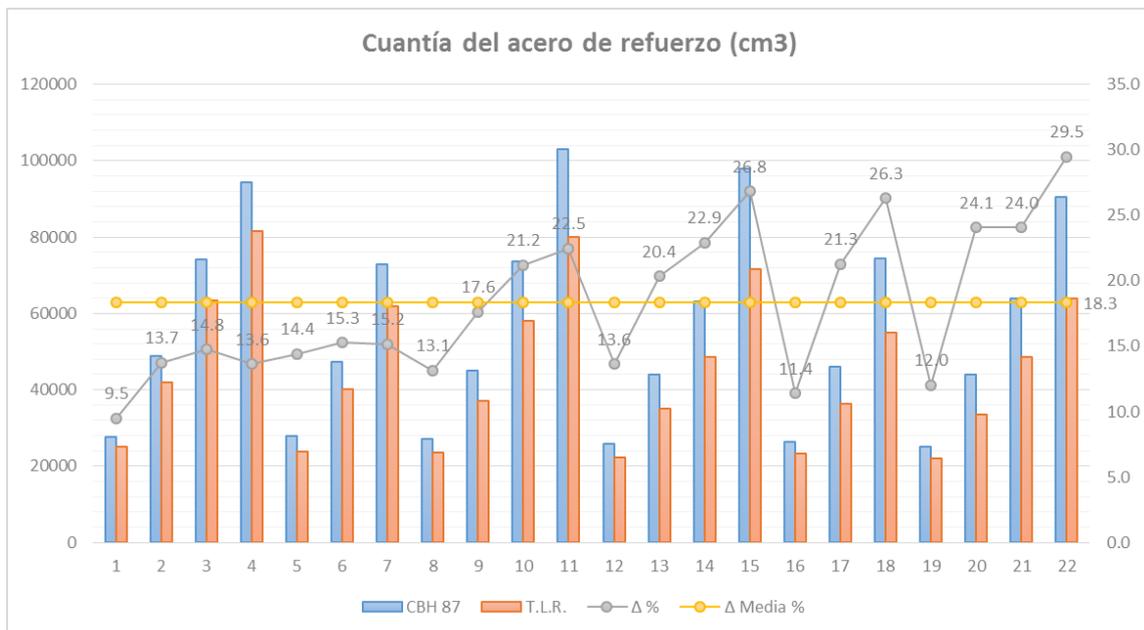


Figura 3. Cuantía de acero de refuerzo de los casos de estudio – Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.

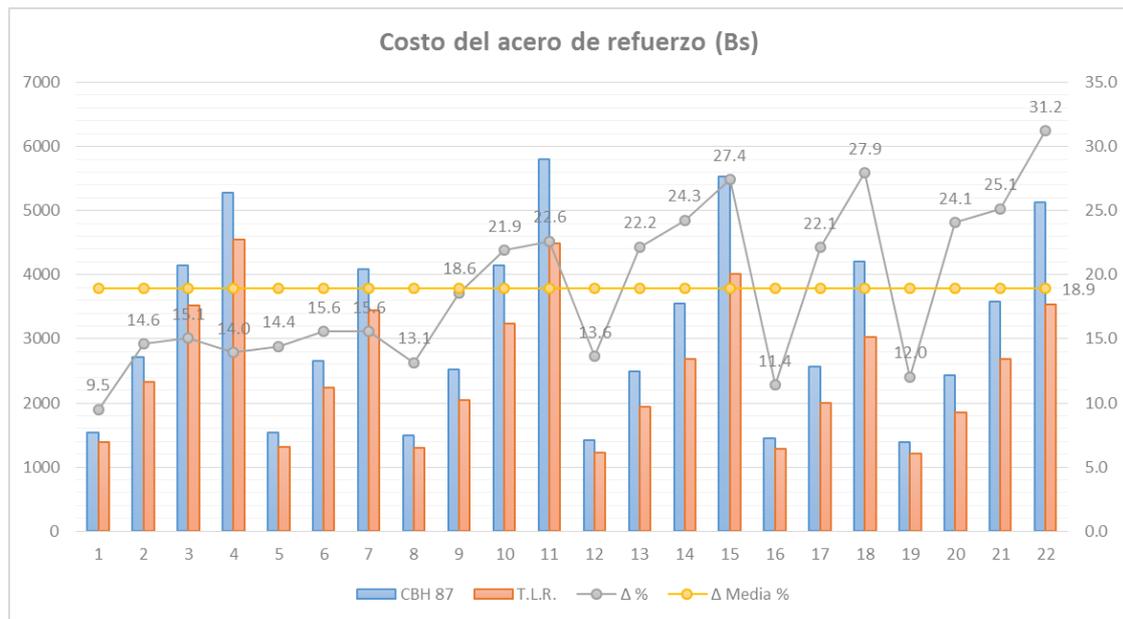


Figura 4. Costo del acero de refuerzo de los casos de estudio – Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.

Del análisis de las figuras 3 y 4, la interpretación de los resultados demuestra que:

La diferencia obtenida de la comparación de los resultados para cada uno de los casos de estudio, se traduce en un porcentaje de ahorro, en favor del diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura, tanto para la cuantía como para el costo del acero de refuerzo.

Se puede observar, que los resultados en cuanto a los porcentajes de ahorro de acero de refuerzo y su costo, varían de paño a paño, obteniendo para el primer caso un valor mínimo de 9.5% en el paño número 1, un valor máximo de 29.5% en el paño número 22 y un valor medio de 18.3% para todos los paños; en cuanto al costo, se obtiene un valor mínimo de 9.5% en el paño número 1, un valor máximo de 31.2% en el paño número 22 y un valor medio de 18.9% para todos los paños.

El valor medio de estos porcentajes de ahorro, tanto para la cuantía como para el

costo del acero de refuerzo, brinda una idea de los beneficios que conlleva, realizar el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura, en comparación al enfoque elástico, en cuanto se refiere a losas macizas de hormigón armado.

De los resultados de la tabla 2, se puede notar que a medida que el valor de la rectangularidad del paño decrece, el porcentaje de ahorro del acero se incrementa, es decir, la posibilidad de reducir el consumo de acero en el paño se incrementa.

Flechas en el estado límite de servicio

En la tabla 3, se adjunta el resumen, la verificación y la comparación de los resultados alcanzados para las flechas en cada dirección en los casos de estudio, los cuales fueron diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.



Tabla 3. Comparación entre los resultados obtenidos de la comprobación del estado límite de deformación en ambos casos de diseño.

Paño	Flechas en dirección "x" (mm)					Flechas en dirección "y" (mm)				
	f adm	CBH 87	¿Verifica?	T.L.R.	¿Verifica?	f adm	CBH 87	¿Verifica?	T.L.R.	¿Verifica?
1	20	4.86	SI	4.86	SI	10	3.07	SI	3.07	SI
2	20	11.82	SI	11.98	SI	13	8.68	SI	8.68	SI
3	20	13.75	SI	14.02	SI	17	8.10	SI	8.10	SI
4	20	12.28	SI	12.55	SI	20	7.21	SI	7.21	SI
5	20	1.55	SI	1.55	SI	10	2.69	SI	2.73	SI
6	20	4.37	SI	4.37	SI	13	7.77	SI	7.91	SI
7	20	7.63	SI	7.63	SI	17	15.11	SI	15.34	SI
8	20	2.44	SI	2.44	SI	10	2.60	SI	2.63	SI
9	20	5.46	SI	5.46	SI	13	5.99	SI	6.08	SI
10	20	11.30	SI	11.42	SI	17	11.33	SI	11.50	SI
11	20	14.78	SI	14.99	SI	20	14.64	SI	14.79	SI
12	20	1.32	SI	1.32	SI	10	1.87	SI	1.87	SI
13	20	3.79	SI	3.79	SI	13	6.37	SI	6.57	SI
14	20	6.70	SI	6.70	SI	17	11.58	SI	12.17	SI
15	20	12.38	SI	12.47	SI	20	19.71	SI	20.00	SI
16	20	3.27	SI	3.27	SI	10	2.44	SI	2.46	SI
17	20	8.06	SI	8.15	SI	13	6.22	SI	6.34	SI
18	20	17.13	SI	17.72	SI	17	10.66	SI	10.84	SI
19	20	1.81	SI	1.81	SI	10	1.82	SI	1.82	SI
20	20	4.93	SI	4.93	SI	13	5.69	SI	5.89	SI
21	20	10.52	SI	10.70	SI	17	11.74	SI	12.17	SI
22	20	15.20	SI	15.70	SI	20	15.02	SI	15.52	SI

Los resultados de la tabla 3, se expresan de mejor manera, a través de las figuras 5 y 6.

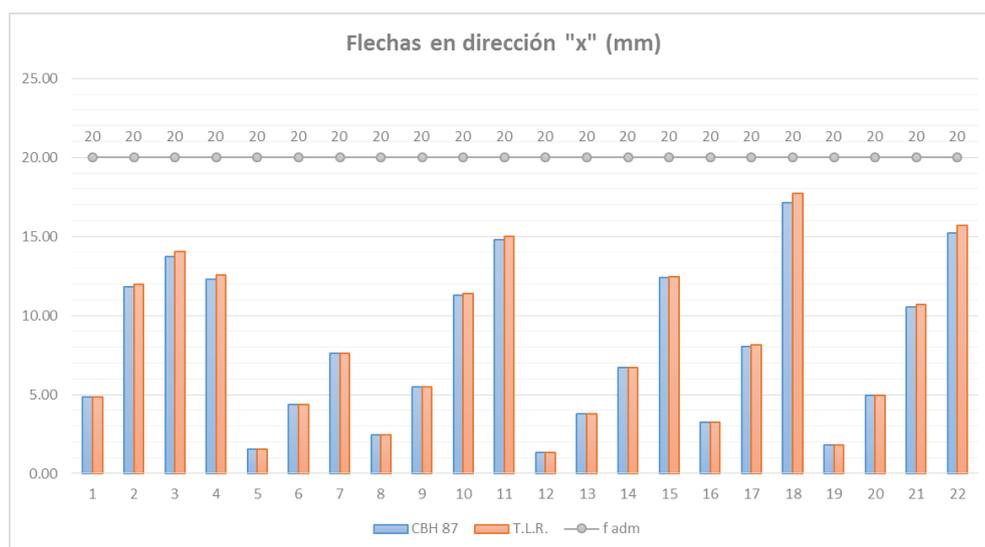


Figura 5. Flechas de los casos de estudio en dirección "x" – Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.

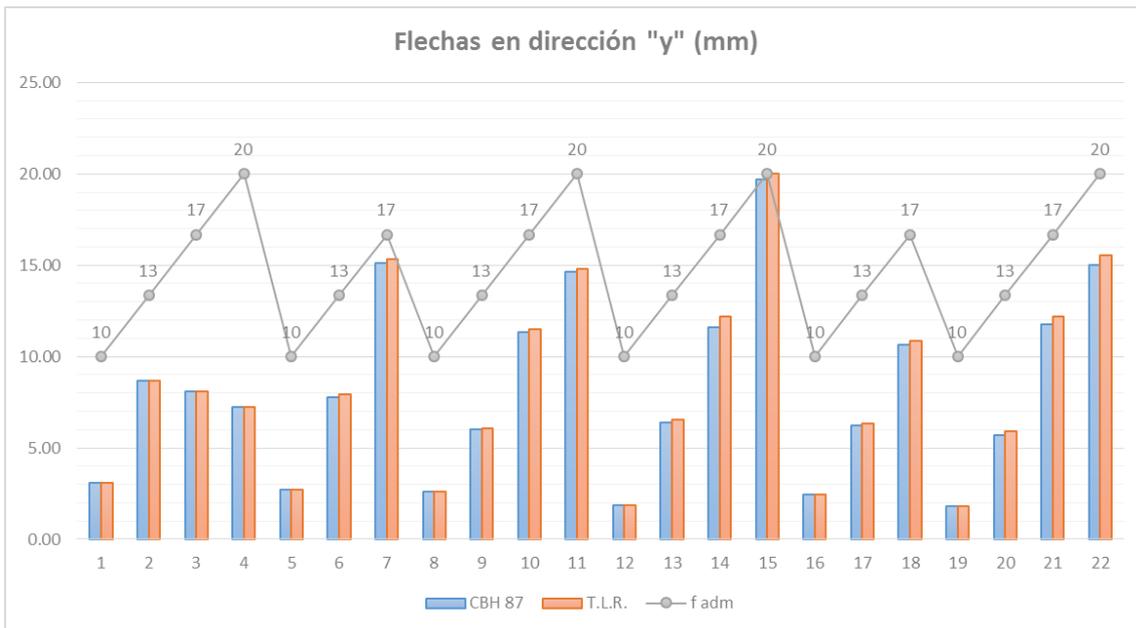


Figura 6. Flechas de los casos de estudio en dirección "y" – Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.

Del análisis de las figuras 5 y 6, se puede extraer la siguiente interpretación para los resultados:

Se puede observar, que algunos de los casos de estudio diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico, presentan un ligero incremento en los valores de las flechas en el estado límite de deformación, en comparación con los valores obtenidos en el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico.

Sin embargo, este incremento no es sustancial y por tanto, todos los casos de

estudio cumplen con el estado límite de deformación.

Anchos de fisura en el estado límite de servicio

En la tabla 4, se adjunta el resumen, la verificación y la comparación de los resultados alcanzados para los anchos de fisura en cada dirección en las secciones de los casos de estudio, los cuales fueron diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico de la norma CBH 87 y el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.



Tabla 4. Comparación entre los resultados obtenidos de la comprobación del estado límite de fisuración en ambos casos de diseño

Paño	Anchos de fisura en vanos en dirección "x" (mm)						Anchos de fisura en vanos en dirección "y" (mm)						Anchos de fisura en apoyos en dirección "x" (mm)						Anchos de fisura en apoyos en dirección "y" (mm)						
	W adm	CBH 87			T.L.R.			CBH 87			T.L.R.			CBH 87			T.L.R.			CBH 87			T.L.R.		
	(mm)	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?	¿ELF?	wk	¿Verifica?
1	0.4	NO			NO			NO			NO			NO			NO			NO			NO		
2	0.4	NO			NO		SI	0.127	SI	SI	0.127	SI	SI	0.133	SI	SI	0.203	SI	NO			NO			
3	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.133	SI	SI	0.219	SI	NO			NO			
4	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.133	SI	SI	0.279	SI	NO			NO			
5	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.112	SI	SI	0.233	SI		
6	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.162	SI	SI	0.246	SI		
7	0.4	NO			NO		SI	0.122	SI	SI	0.091	SI	NO			NO		SI	0.122	SI	SI	0.232	SI		
8	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.122	SI	SI	0.232	SI		
9	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.129	SI	SI	0.199	SI		
10	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.125	SI	SI	0.213	SI	SI	0.158	SI	SI	0.207	SI	
11	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.144	SI	SI	0.231	SI	SI	0.160	SI	SI	0.181	SI	
12	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		NO				NO			
13	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.150	SI	SI	0.232	SI		
14	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.130	SI	SI	0.233	SI		
15	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.130	SI	SI	0.190	SI	SI	0.165	SI	SI	0.222	SI	
16	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.125	SI	SI	0.219	SI		
17	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.107	SI	SI	0.174	SI	SI	0.132	SI	SI	0.234	SI	
18	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.131	SI	SI	0.201	SI	SI	0.132	SI	SI	0.203	SI	
19	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		NO				NO			
20	0.4	NO			NO		NO			NO			NO			NO		SI	0.116	SI	SI	0.239	SI		
21	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.115	SI	SI	0.205	SI	SI	0.147	SI	SI	0.227	SI	
22	0.4	NO			NO		NO			NO			SI	0.125	SI	SI	0.217	SI	SI	0.148	SI	SI	0.228	SI	



Los resultados de la tabla 4, para las secciones más solicitadas de los casos de estudio, se expresan de mejor manera, a través de las figuras 7 y 8.

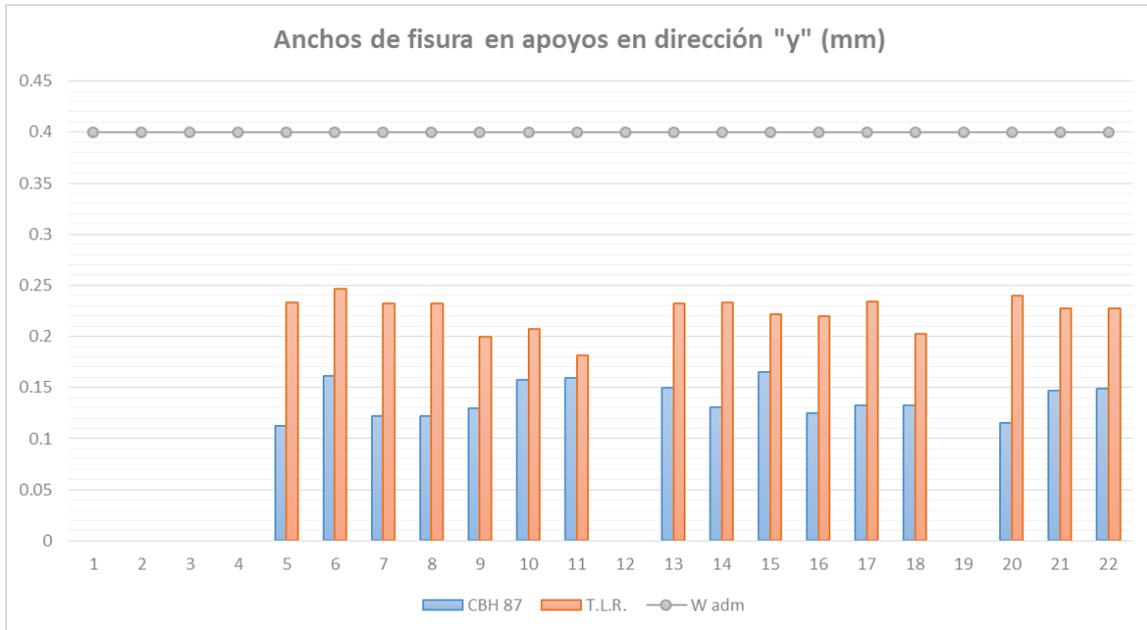


Figura 7. Anchos de fisura en los apoyos de los casos de estudio en dirección "x" – Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.

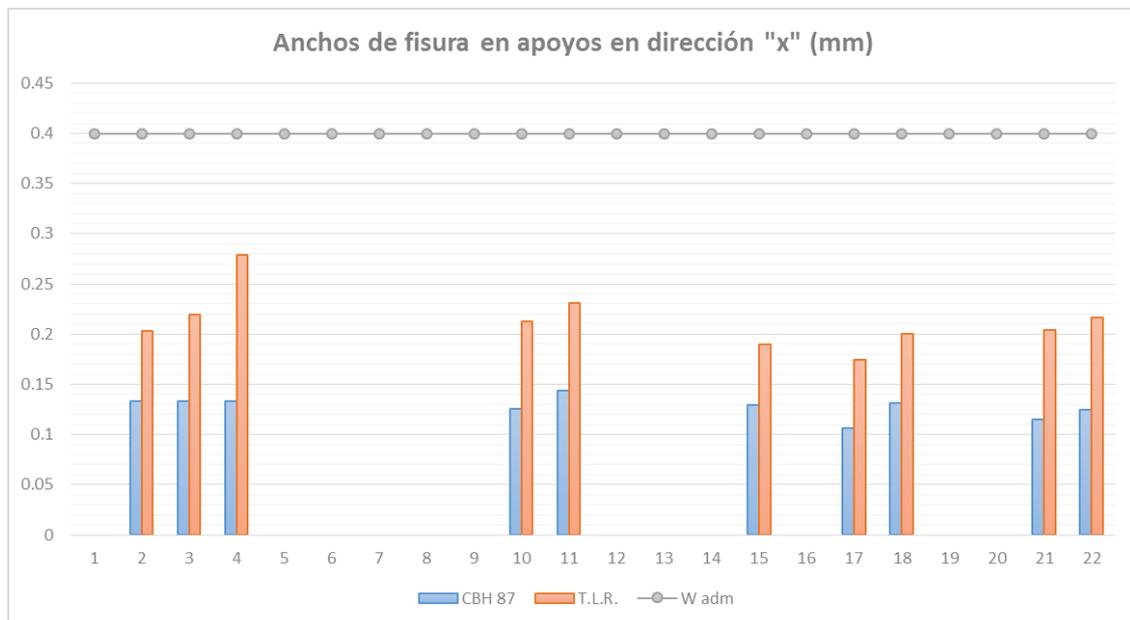


Figura 8. Anchos de fisura en los apoyos de los casos de estudio en dirección "y" Comparación entre los resultados alcanzados por ambos casos de diseño.



Del análisis de las figuras 7 y 8, se muestra los siguientes resultados:

Del mismo modo que en el estado límite de deformación, algunos de los casos de estudio diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico, presentan un incremento en los valores de los anchos de fisura en las secciones donde es necesaria la comprobación, en comparación con los valores obtenidos en el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico.

Sin embargo, este incremento en los valores no es relevante, debido a que los mismos, aún se encuentran muy por debajo del valor admisible, por tanto, todos los casos de estudio cumplen con el estado límite de fisuración.

Análisis final

Como resultado de la verificación del peralte para los paños de losa diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico, algunos de los casos de estudio, sufrieron un incremento en su espesor, por tanto y para efectos de comparación de resultados, estos valores finales de espesor, fueron utilizados también, en los casos de estudio diseñados a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico.

La diferencia entre los resultados de la cuantía y el costo del acero encontrados en ambos casos de diseño, tiene un valor medio de 18.3% en el primer caso y de 18.9% en el segundo, traduciéndose estas cifras, en porcentajes de ahorro en favor del diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico.

Los resultados encontrados para las flechas y los anchos de fisura de los casos de estudio en ambos casos de diseño, verifican que todos los paños de losa diseñados cumplen con los estados límite de servicio.

CONCLUSIONES

El método de diseño y los métodos de verificación utilizados en la investigación, fueron los estipulados en la norma CBH 87, siendo estos, el estado límite de rotura y los estados límite de fisuración y deformación respectivamente.

Los casos de estudio, fueron definidos como paños de losa con función de almacén sujetos a cargas gravitacionales de alta sollicitación, cuya rectangularidad y condiciones de contorno, varían de manera que se consideren los casos más propensos a ocurrir en estructuras con esta función.

Los resultados de la cuantía y costo del acero que presenta cada caso de estudio en cada caso de diseño, son bastante variados, sin embargo, en cada uno de ellos se puede observar, una diferencia en favor del diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.

Los resultados encontrados para las flechas y anchos de fisura de los casos de estudio en ambos casos de diseño, verifican que todos los paños de losa diseñados cumplen con los estados límite de servicio.

La diferencia entre los resultados de la cuantía y el costo del acero encontrados en ambos casos de diseño, tiene un valor medio de 18.3% para la cuantía y de 18.9% para el costo, traduciéndose estas cifras, en porcentajes de ahorro significativos en favor del diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura.

Si bien se observa un incremento en los valores de las flechas y los anchos de fisura en el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico, este incremento no es sustancial y no se sobrepasan los valores admisibles en ninguno de los paños de losa, por tanto, el comportamiento estructural de estos



elementos, no se ve afectado en condiciones de servicio.

Por lo expuesto anteriormente, se demostró que el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque plástico de la teoría de líneas de rotura, permite reducir el consumo de acero en losas macizas de hormigón armado, sin afectar su comportamiento estructural en el estado límite de servicio, en comparación con el diseño a partir del análisis estructural mediante el enfoque elástico.

La posibilidad de obtener un mayor porcentaje de ahorro de acero, se ve limitada por los requerimientos de acero mínimo de la sección estipulados en la norma CBH 87; lo cual se puede evidenciar, al realizar una comparación entre los momentos encontrados mediante la teoría elástica y los momentos encontrados mediante la teoría plástica.

REFERENCIAS

- ACI Committee 318. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute
- Görkem, S. E., & Hüsem, M. (2013). Load capacity of high-strength reinforced concrete slabs by yield line theory. *Computers and Concrete*, 12(6), 819 - 829. doi: <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2013.12.6.819>
- Llopiz, C. R. (2009). DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO MÉTODOS PLÁSTICOS. *HORMIGÓN II* (pp. 34 - 52)
- Park, R., & Gamble, W. L. (2000). *Reinforced concrete slabs* (2nd ed.). New York: Wiley