

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOSAS MACIZAS DE CONCRETO REFORZADO PARA VIVIENDA

Ramírez de Alba H.<sup>1</sup>; De León D.<sup>2</sup>; Valdez M. E. A.<sup>3</sup>

## RESUMEN

A partir de resultados analíticos de ejemplos ilustrativos y del reporte de características observadas, quedó demostrado que las losas macizas de concreto reforzado para vivienda no son diseñadas ni construidas adecuadamente en el ámbito de la zona de estudio, lo que explica los altos porcentajes de fallas observadas en servicio. Fue calculado el índice de confiabilidad en seis viviendas representativas al considerar tres posibles escenarios de la corrosión del acero de refuerzo, con lo que se mostró un alto riesgo de falla o cuantiosas inversiones en mantenimiento. Se concluyó que para el correcto diseño de las losas deberá no sólo revisarse la resistencia a flexión sino principalmente controlar las deformaciones verticales, el agrietamiento por contracción y la permeabilidad, lo cual implica especificar un concreto denso y durable. Se presentan recomendaciones específicas.

**Palabras clave:** losas macizas, vivienda, diseño estructural, condiciones de servicio, durabilidad.

## ABSTRACT

From analytical results of illustrative examples and reports of observed characteristics, it is shown that solid slabs of reinforced concrete for housing are not properly designed and constructed in the ambit or the zone of study, which explains the high percentages of service failures observed. Considering three possible sceneries for corrosion of the reinforcing steel the reliability index for six cases are reported, the results show high failure risk or significant maintenance inversions. It is concluded that for the correct design of solid slabs it is necessary not only the revision of flexure strength but also and mainly the control of vertical deformations, cracking due to shrinkage and permeability which implies the specification of a dense and durable concrete. Practical recommendations are presented.

**Keywords:** solid slabs, housing, structural design, serviceability, durability.

## RESUMO

A partir de resultados analíticos de exemplos ilustrativos e o relatório de características observadas, mostra-se que as lajes maciças de concreto armado para moradia não são projetadas nem construídas adequadamente no âmbito da zona de estudo, o que explica as altas percentagens de falhas em serviço observadas. Calcula-se o índice de confiabilidade em seis moradias representativas ao considerar três possíveis cenários da corrosão do aço de reforço, com o que se mostra um alto risco de falha ou custosos investimentos em manutenção. Conclui-se que para o projeto correto das lajes deverá não só revisar a resistência à flexão, senão controlar principalmente as deformações verticais, rachaduras por contração e a permeabilidade; o qual implica especificar um concreto denso e durável. Apresentam recomendações específicas.

**Palavras chave:** lajes maciças, moradia, projeto estrutural, condições de serviço, durabilidade.

## INTRODUCCIÓN

La losa maciza de concreto reforzado perimetralmente apoyada presenta ventajas constructivas y estructurales lo cual ha motivado, tanto en el ámbito de la construcción formal como en la autoconstrucción, su uso y abuso en la construcción de vivienda. Sin embargo, más frecuente de lo deseado y demandado, se presentan daños como pueden ser agrietamiento, deformaciones (flechas) y corrosión del acero de refuerzo en estos elementos, mismos que se propician por sobresimplificaciones en el diseño y descuidos en el proceso de construcción.

<sup>1,2 y 3</sup> son profesores investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de México.

En particular, se ha observado que en la construcción de vivienda de interés social, son realizados ahorros mal entendidos al presionar a los calculistas y constructores para disminuir peraltes y cuantías de refuerzo al argumentar que “las losas son elementos estructurales muy nobles que no fallan”, sin sopesar en la medida correcta la durabilidad. Debe mejorarse la cultura de enfatizar el costo inicial menospreciando o ignorando el costo futuro que incluye el desempeño de la obra en el total de su vida útil (De León, 2010). Por otro lado, en la autoconstrucción se recurre generalmente a conocimientos empíricos sobre construcción del propietario y en algunos casos a obreros de la construcción con diferente grado de experiencia, lo que propicia que algunas partes de la estructura queden sobradas y otras escasas.

El objetivo de este trabajo es, por una parte caracterizar y cuantificar los daños que presentan las losas de concreto reforzado para vivienda en la zona de estudio y con ello identificar sus posibles causas; por el otro, establecer recomendaciones para mejorar los procesos de diseño y construcción enfatizando el concepto de durabilidad y la relación costo/beneficio en el ciclo de vida. Para lograr el objetivo, en primer lugar se hace un repaso a los requisitos de resistencia, servicio y durabilidad que deberían aplicar en el diseño de las losas de acuerdo a las normas técnicas aplicables (NTC 2004). Cabe decir que se ilustran las partes principales por medio de ejemplos.

En la segunda parte se presentan datos obtenidos en campo sobre el estado de losas macizas de concreto reforzado en viviendas existentes en la zona central del Estado de México. Al analizar los resultados de las dos partes se establece que son aplicados adecuadamente los requisitos de diseño quedando en evidencia el descuido en los procesos constructivos. Finalmente, se proponen medidas específicas y recomendaciones prácticas para mejorar el comportamiento estructural de las losas y en particular, para aumentar la durabilidad y la eficiencia de la relación costo/beneficio en el plazo del ciclo de vida útil de la construcción.

## CONSIDERACIONES SOBRE PRÁCTICAS INCONVENIENTES EN EL DISEÑO DE LOSAS EN EL ESTADO DE MÉXICO

En el Estado de México los técnicos que diseñan estructuralmente las viviendas recurren a lo aplicable de las normas técnicas del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (NTC, 2004); sin embargo, no es frecuente que se especifique de forma precisa el concreto que se debe utilizar, así como los parámetros básicos que determinan la durabilidad, como los anchos de grietas permisibles, las cuantías mínimas de refuerzo y el recubrimiento del concreto para el acero de refuerzo (Mena, 2005). Para los claros que usualmente existen en la vivienda de interés social, la resistencia a flexión y a cortante de las losas no representa un problema, pero sí las condiciones de servicio. Este es otro aspecto que con frecuencia se soslaya tendiéndose a minimizar, pero debe tomarse en cuenta que las condiciones de servicio se deben mantener durante la vida útil de la estructura.

Como resulta desafortunadamente usual, el diseño es hecho con base en requisitos de resistencia y se omiten las consideraciones sobre control de deformaciones verticales, contracciones y agrietamientos, lo que resulta en cuantías de refuerzo generalmente inferiores a las requeridas para controlar los cambios volumétricos, lo que causa agrietamientos por contracción y a consecuencia problemas de filtración de agua.

## EJEMPLOS

Para evitar una innecesaria extensión de este trabajo en el desarrollo de los ejemplos, así como en el análisis de los resultados, se anota sólo el número de la ecuación, tabla o apartado que se aplica de las Normas Técnicas para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (NTC, 2004), para lo cual se colocó entre paréntesis N: y el número de Ecuación (Ec); Tabla (Tb) o Apartado (Ap), según corresponda. Así, supóngase un tablero de 5.0 por 5.0 metros para entepiso de una vivienda; de forma resumida, los cálculos para obtener el área de acero requerida son:

a) Suponiendo el peralte total de 10 cm, la carga por peso propio es de 240 kg/m<sup>2</sup>. La carga muerta adicional por acabados es de 110 kg/m<sup>2</sup>. La carga muerta total es 350 kg/m<sup>2</sup>.

b) La carga viva para entepiso de vivienda es de 170 kg/m<sup>2</sup>.

c) Tomando el factor de carga de 1.4, la carga de diseño resulta 728 kg/m<sup>2</sup>.

Según la tabla de coeficientes de la norma (N: Tb 6.1) para el caso más desfavorable, se establece un valor de 500 (coeficiente sin unidades); por lo tanto, el momento de diseño resulta (N: Tb 6.1 nota al calce) de 910 kg-m.

e) Para  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ , un recubrimiento libre de 15 mm se obtiene al aplicar la fórmula del momento resistente (N: Ecs 2.4, 2.6, 2.7), un área de refuerzo de 3.74 cm<sup>2</sup>/m, lo que significa una separación del refuerzo de 20 cm, si se usan barras con diámetro de 3/8" (10 mm) grado 42.

Este resultado indica que en la mayoría de los casos un armado razonable puede resolver el requerimiento de resistencia a flexión; sin embargo, al tomar en cuenta el peralte efectivo para controlar las deformaciones verticales (flechas), se deben tomar en cuenta los siguientes requisitos (N: Ap 6.3.3) en cada tablero de losa:

- a) Concreto clase 1, con un peralte efectivo no menor que el perímetro entre 250.
- b) Concreto clase 2, con un peralte efectivo no menor que el perímetro entre 170.

c) Para el cálculo del perímetro, los lados discontinuos se multiplican por 1.5 cuando los apoyos no son monolíticos, o por 1.25 cuando sí lo son. Además, cuando  $w$  es mayor de 380 kg/m<sup>2</sup> se debe multiplicar por un factor (N: Ec 6.7), dependiente de la carga y del esfuerzo en el acero en servicio.

Antes de continuar conviene recordar (N: Ap 1.5.1.1) que el concreto clase 1 debe contar con un peso volumétrico no menor de 2,200 kg/m<sup>3</sup> y un agregado con peso específico no menor de 2.6 (relativo al peso volumétrico del agua), lo cual obliga en la práctica a utilizar agregado triturado, ya sea calizo o basáltico. Por su parte, el concreto clase 2 debe contar con un peso volumétrico entre 1,900 y 2,200 kg/m<sup>3</sup> y su agregado con un peso específico no menor de 2.3 (relativo al peso volumétrico del agua). En la práctica se usa generalmente el agregado andesítico, ya sea de mina o triturado.

Con objeto de continuar con el ejemplo propuesto, se pueden suponer dos casos extremos. El caso favorable corresponde a un tablero con todos los bordes continuos y monolíticos; el desfavorable corresponde a un tablero con todos los bordes discontinuos no monolíticos. Respecto al recubrimiento libre, tomando en cuenta las condiciones ambientales en la zona de estudio, se pueden establecer tres casos usuales de acuerdo a la Norma (N: Ap 4.9.3) (N: Tb 4.5): 15 mm cuando no existan condiciones agresivas; es decir sin considerar efectos de durabilidad; 20 mm para prevenir corrosión en losas interiores; y 26 mm para prevenir corrosión en losas exteriores.

Considerando estas condiciones se puede calcular el peralte requerido para los casos “favorable” y “desfavorable”, tomando en cuenta la clase de concreto y el recubrimiento requerido. El resumen de resultados se presenta en las Tablas 1 y 2. En estas tablas  $h$  es el peralte total de la losa;  $d$ , es el peralte efectivo y “Separación #3” significa la separación de barras con diámetro de 3/8” (10 mm)

Resulta importante destacar que la cuantía de refuerzo está regida por el requisito de contracción y no por el de resistencia. Al emprender la revisión de otros aspectos a considerar en el diseño como son el requisito de refuerzo mínimo por flexión y el refuerzo mínimo por cambios volumétricos (Sánchez, 2002), queda demostrado que:

Al aplicar la fórmula correspondiente, el requerimiento de refuerzo mínimo por flexión (N: Ec 2.2), resulta en aproximadamente 2.0 cm<sup>2</sup> por metro, lo que se traduce en barras con diámetro de 3/8” (10 mm), a cada 35 cm. Esto indica que en varios casos de las Tablas 1 y 2, rige el refuerzo mínimo. En cuanto al refuerzo mínimo por cambios volumétricos se aplica la fórmula correspondiente (N: Ec 5.3), y se obtiene 1.43 cm<sup>2</sup> para casos de losas interiores y de 2.1 cm<sup>2</sup> para losas exteriores.

Con el criterio práctico que propone por sencillez la misma norma (N: Ap 5.7) que consiste en proporcionar una relación (respecto al área total) de refuerzo mínima de 0.002 para losas interiores y de 0.003 para exteriores, se obtiene –para el caso del ejemplo– un área de acero de 2.0 cm<sup>2</sup>; es decir, barras con diámetro de 3/8” (10 mm) a cada 35 cm para losas interiores y 3.0 cm<sup>2</sup> y barras del mismo tipo a cada 20 cm, para losas exteriores. Sin embargo, para espesores mayores, el requerimiento aumenta de tal manera que cuando es usado concreto clase 2, el espesor requerido puede ser muy alto –22.5 cm para el caso más desfavorable– y por lo tanto el refuerzo de barras con diámetro de 3/8” (10 mm) se da cada 20 cm pero en dos capas o lechos. Estos resultados se reflejan en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1. Tablero de 5 por 5 m. (Caso favorable).**

Concreto clase	d (cm)	Recubrimiento (mm)	h (cm)	Separación #3	
				Flexión	Contracción
1	8.64	15	11	23.4	21.5
		20	12	22.3	19.7
		26	12.5	21.8	18.9
2	12.71	15	15	30	15.4
		20	15.5	29.2	15.2
		26	16.5	28.2	14.3

Al considerar el agrietamiento por esfuerzos de flexión, la Norma (N: Ec 3.5) predice agrietamientos para el caso del ejemplo de 0.2 mm de ancho que resulta, en teoría, adecuado para los casos comunes; sin embargo, al no cumplir con la cuantía de acero requerida para controlar cambios volumétricos, se generan grietas por contracción como ya se mencionó.

**Tabla 2. Tablero de 5 por 5 m. (Caso desfavorable).**

Concreto clase	d (cm)	Recubrimiento (mm)	h (cm)	Separación #3 (cm)	
				Flexión	Contracción
1	12.96	15	15.5	29.8	15.2
		20	16.0	29.2	14.8
		26	16.5	28.7	13.3
2	19.06	15	21.5	36.3	22.0*
		20	22.0	35.7	21.5*
		26	22.5	35.2	21.0*

\*En dos lechos de refuerzo

Se pueden hacer cálculos similares para otros casos comunes; por ejemplo para tableros de 4.0 por 4.0 metros y de 3.5 por 3.5 metros; los resultados que se obtienen siguiendo la misma secuencia anterior son los presentados en la Tabla 3 –para el caso favorable– y en la Tabla 4 para el desfavorable. Los valores de la separación se redondearon al número entero práctico.

**Tabla 3. Resultados de peralte (cm) y separación de barras #3 (cm). (Caso favorable).**

Concreto clase	Rec (mm)	Tablero de 4 por 4 m			Tablero 3.5 por 3.5 m		
		h	Contracción	Flexión	h	Contracción	Flexión
1	15	10	20	29.8	10	20	42
	20	10	20	29.2	10	20	41
	26	10.5	20	28.7	10	20	37
2	15	12.5	18	36.3	12	18	47
	20	13	18	35.7	12.5	18	45
	26	14	15	35.2	13	18	42

Se puede observar que el peralte de 10 cm es correcto solamente para el caso favorable y concreto clase 1, mientras que en la práctica para estos claros la tendencia es a generalizar dicho peralte. En cuanto a la separación del refuerzo queda visto que en todos los casos rige el requerimiento del control de la contracción, por lo que resulta usual construir con separaciones mayores a las recomendadas, lo cual propicia la presencia de agrietamiento por contracción.

### CARACTERÍSTICAS DE LAS LOSAS DE VIVIENDA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Tomando como zona de estudio la parte centro del Estado de México, –principalmente algunas partes de los municipios de Toluca, Metepec, Zinacantepec y Almoloya de Juárez– fueron estudiadas 185 viviendas de 20 conjuntos habitacionales, así como 35 viviendas que no forman parte de conjuntos habitacionales pero que se catalogan como de interés social. Por otro lado, también se estudiaron 65 viviendas autoconstruidas. En todos los casos se trata de viviendas de una o dos plantas construidas con losa maciza de concreto reforzado, muros de carga del tipo confinado, cimentación de zapatas o

**Tabla 4. Resultados de peralte (cm) y separación de barras #3 (cm). (Caso desfavorable).**

Concreto clase	Rec (mm)	Tablero de 4 por 4 m			Tablero 3.5 por 3.5 m		
		h	Contracción	Flexión	h	Contracción	Flexión
1	15	13	18	25	12	20	30
	20	13.5	18	27	12.5	18	32
	26	14	15	29	13	18	34
2	15	18	25*	27	17	25*	32
	20	18.5	25*	29	17.5	25*	34
	26	19	25*	31	18	25*	36

\*En dos lechos de refuerzo.

losa de cimentación y que tienen un área construida de entre 50 y 140 m<sup>2</sup>. De esta manera se establecieron dos grupos: El Grupo A, de 220 viviendas construidas dentro de los procesos formales y el Grupo B de 65 viviendas autoconstruidas. Para fines de este estudio se registraron, para los dos grupos, las siguientes características de las losas:

- a) Peralte nominal en cm: 8, 10, 12 y mayor de 12.
- b) Tipo de refuerzo: Barras con diámetro de 3/8” (10 mm) grado 42; varillas con diámetro de 1/4” (6 mm) de alta resistencia; malla electrosoldada de alambre corrugado de alta resistencia y otros materiales.
- c) Tipo de agregado grueso para fabricar el concreto: triturado de piedra caliza o basáltica, así como andesítico de mina.
- d) Claro máximo en m: hasta 3.5, entre 3.5 y 5.0, mayor de 5.0
- e) Apoyos de la losa: Monolítico; no monolítico (existencia o no de dadas perimetrales).
- f) Desplomo de los muros de carga: Tolerable menor de 0.5 %; ligero 0.5% a 1%; moderado 1% a 2%; severo mayor de 2%.

**Tabla 5. Tipos y niveles de afectaciones registradas en las viviendas.**

Concepto	Nivel A	Nivel B	Nivel C	Nivel D
Segregación del concreto	Área afectada menor de 5%	5% a 10%	10% a 15%	Mayor de 15%
Grietas	Ancho menor a 0.2 mm	0.2 a 0.3 mm	0.3 a .05 mm	Mayor de 0.5 mm
Humedades	Área afectada menor de 5%	5% a 10%	10% a 15%	Mayor de 15%
Flechas	Ligero L/300 o menor.	Moderado de L/300 a L/200.	Severo de L/200 a L/150.	Muy severo. Mayor a L/150.
Corrosión del acero	Incipiente. Pequeñas manchas.	Ligero. Manchas continuas.	Moderado. Recubrimiento afectado.	Severo. Pérdida de recubrimiento. Disminución del área de acero.

Además, se realizaron observaciones sobre los defectos, daños y estado de conservación en cuatro niveles de afectación de acuerdo a lo explicado en la Tabla 5. La segregación, las humedades y la corrosión del acero de refuerzo se estimaron de forma cualitativa mediante inspección visual en las áreas afectadas y con los criterios que se explican en la Tabla 5. El ancho de las grietas fue medido con una mica transparente graduada (grietómetro), mientras que las deformaciones verticales (flechas) se midieron con una cuerda tensada entre los muros o dalas de apoyo.

Adicionalmente de forma aleatoria se hicieron determinaciones con pruebas no destructivas en 6 viviendas de cada grupo, consistentes en:

a) Determinación del contenido de cloruros solubles en agua (Mena, 2005) una por vivienda, con el aparato Chloride Test CL-2000 (James Instruments Inc.)

b) Detección del potencial de carbonatación mediante aplicación de reactivo (Sánchez, 2002), tres por vivienda con la técnica Carbo Detect (James Instruments Inc.).

c) Medición de la dureza del concreto con doce lecturas del esclerómetro en cinco zonas de medición en cada vivienda.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos para las características de las losas se resumen en la Tabla 6 para los dos grupos de viviendas. Para los diferentes tipos y niveles de afectaciones los resultados se resumen en la Tabla 7 para el grupo A y en la Tabla 8 para el grupo B.

**Tabla 6. Características de las viviendas.**

Característica	Parámetro	Grupo A (220)		Grupo B(65)	
		Número	%	Número	%
Peralte (cm)	8	2	0.9	0	0
	10	213	96.8	55	84.6
	12	5	2.3	9	13.9
	Mayor de 12	0	0	1	1.5
Refuerzo	3/8" G42	206	94	63	96.9
	1/4" AR	8	3.6	0	0
	Malla	6	2.7	0	0
	Otro	0	0	2	3.1
Agregado	Triturado	12	5.5	3	4.6
	De mina	208	94.5	62	95.4
Claro (m)	Mayor de 5	5	2.3	18	27.7
	Entre 3.5 y 5	130	59	43	66.2
	Menor a 3.5	85	38.7	4	6.1
Tipo apoyo	Monolítico	219	97.7	59	90.8
	No monolítico	5	2.3	6	9.2

El contenido en el concreto de cloruros solubles en agua, resultó para el grupo A un valor medio de 2.2 kg/m<sup>3</sup> y un intervalo de 0.5 a 3.1 kg/m<sup>3</sup>; para el grupo B un valor medio de 2.4 kg/m<sup>3</sup> e intervalo de 0.9 a 3.5 kg/m<sup>3</sup>. Se sabe que la carbonatación es función del tiempo y del nivel de agresividad medioambiental, sin embargo no se pudieron hacer correlaciones por carecer de datos suficientes.

Los valores de la profundidad de carbonatación en las losas resultaron, para el grupo A un valor medio de 2.5 mm con intervalo de 1 a 4 mm, para el grupo B, media de 3.2 mm e intervalo de 1.5 a 5 mm.

Con el esclerómetro se midió la dureza del concreto en diez zonas de cada vivienda. Los resultados por vivienda resultaron, para el grupo A el promedio más bajo de 28 y el más alto de 38, el rango más bajo de 11 y el más alto de 23; para el grupo B el promedio más bajo de 31 y el más alto de 43, el rango más bajo de 15 y el más alto de 28. Los resultados generales para el grupo A un promedio de 35 y rango de 27, para el grupo B promedio de 41 y rango de 32.

**Tabla 7. Nivel de afectaciones viviendas Grupo A (%).**

Categoría	Nivel				Total
	A	B	C	D	
Segregación	28.2	2.3	0.9	0.4	31.8
Grietas	38.2	22.7	3.6	1.4	65.9
Humedad	40.9	20.5	4.5	2.3	68.2
Corrosión	1.4	0.9	0	0	2.3
Flechas	13.6	3.6	1.4	0.9	19.5
Desplomo	6.8	2.3	0.5	0	9.6

**Tabla 8. Nivel de afectaciones viviendas Grupo B (%).**

Categoría	Nivel				Total
	A	B	C	D	
Segregación	41.5	20	12.3	3.1	76.9
Grietas	58.5	16.9	10.8	3.1	89.3
Humedad	54.8	21.5	12.3	7.7	96.3
Corrosión	4.6	3.1	3.1	1.5	12.3
Flechas	16.9	7.7	4.6	3.1	32.3
Desplomo	18.4	4.6	3.0	1.5	27.5

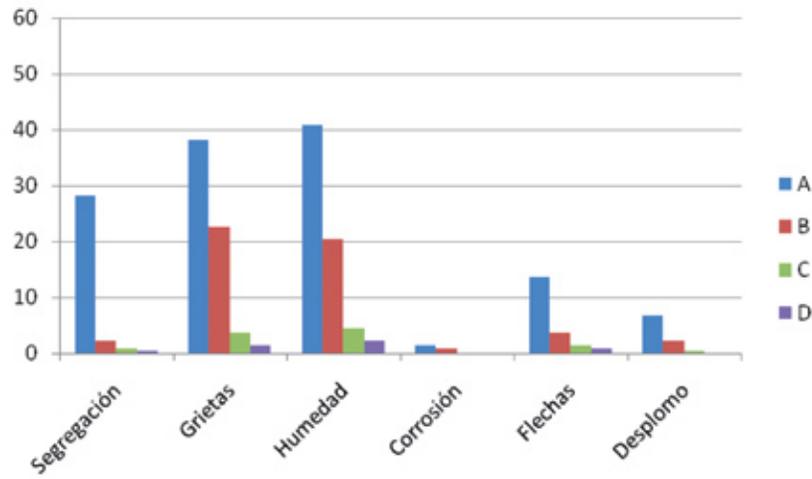
### Análisis de resultados

El peralte de las losas generalmente se establece de forma empírica y en su mayoría de 10 cm, independientemente del claro de los tableros y de las condiciones de carga. Pocos casos del grupo A tienen peralte menor de 10 cm aspecto que no se presenta en las viviendas del grupo B. En cambio, peraltes de 12 cm o mayores, son poco frecuentes en el grupo A mientras que en el grupo B el porcentaje es significativo (14%). Se puede establecer que no se sigue la normativa en cuanto al control de deformaciones pues los peraltes de las losas son menores, y en muchos casos mucho menores que lo establecido por la norma (N: Ap 6.3.3.5) (ver tablas 1 y 2). Se desconoce en cuántos de estos casos se hayan revisado las deformaciones verticales (flechas), como lo establece la normativa (Ibid). Por otro lado en la mayoría de las viviendas las losas se refuerzan con barras con diámetro de 3/8" (10 mm), aproximadamente el 6% de las viviendas del grupo A, utilizan refuerzo de alta resistencia y de bajo diámetro lo que no ocurre en las viviendas del grupo B. Con base sólo en el tipo de agregado, se puede establecer que el concreto en más del 90% de los casos es de clase 2; solamente en 6% de las viviendas del grupo A se percibe alguna tendencia a usar concretos de mayor densidad. En cuanto al claro de los tableros de las losas aproximadamente el 60% en el grupo A tiene claros entre 3.5 y 5 m, 38% con claros menores de 3.5 m y solamente el 2% con claros mayores de 5 m, mientras que en el grupo B el porcentaje con claros mayores a 5 m es significativo (28%).

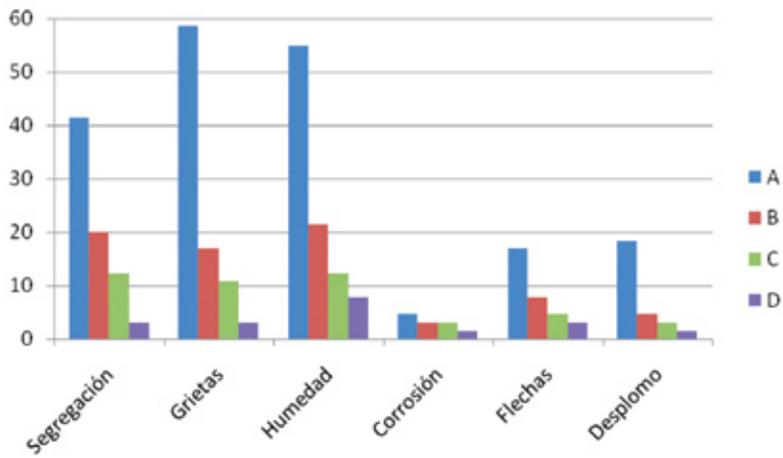
De lo anteriormente analizado se puede establecer que en la autoconstrucción los dueños de la vivienda prefieren espacios mayores que los que se ofertan en la vivienda formal, ya que los desarrolladores de vivienda tienden a proponer espacios cada vez más reducidos, aparentemente sin atender los gustos y necesidades de los usuarios.

En cuanto a los apoyos, lo más frecuente es que las losas se construyan monolíticamente con las trabes o cadenas de borde (dalas), solamente el 2% del grupo A y el 9% del grupo B se construyeron con la losa apoyada directamente en los muros.

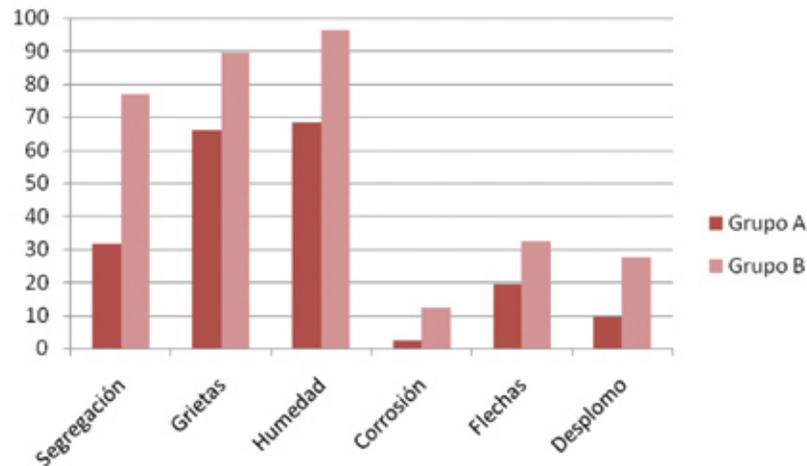
Para facilitar la comprensión de lo anteriormente mencionado, en las Figuras 1 y 2 se muestran los porcentajes de daños observados por nivel de afectación, para los grupos A y B respectivamente. En la Figura 3 están los porcentajes totales de daños observados.



**Figura 1.** Porcentajes de daños para viviendas del grupo A



**Figura 2.** Porcentajes de daños para viviendas del grupo B.



**Figura 3.** Porcentajes totales de daños.

Al analizar las afectaciones más usuales en las losas de las viviendas, resulta muy significativo el porcentaje de daños principalmente en lo relacionado con segregación, agrietamientos y humedades. En el grupo B (autoconstrucción) se presentan significativamente más daños que en el grupo A excepto en las deformaciones (flechas) cuya tendencia es aproximadamente la misma. Solamente en el nivel B en el apartado de grietas se observa un porcentaje mayor en el grupo A de viviendas de construcción formal respecto al B de autoconstrucción, en todos los demás casos se tienen más daños en el grupo B. Como podía esperarse, los daños en la mayoría de los casos (60 a 90 % en grupo A; 37 a 67 % en grupo B) son leves que no afectan significativamente la resistencia, pero sí la durabilidad en caso de que no sean tratados adecuadamente. Definitivamente no se están utilizando en la vivienda, concretos de características adecuadas para lograr una durabilidad suficiente. Aunado a esto, la supervisión de los procesos constructivos y la calidad de mano de obra se descuidan, lo cual preocupa principalmente en las viviendas del grupo A, ya que se supone que el diseño y el proceso constructivo deberían estar a cargo de profesionistas calificados. Aunque las pruebas fueron pocas en número, permiten identificar variaciones importantes del concreto lo que se reflejó, por ejemplo, en las pruebas de dureza, lo cual supone procedimientos poco controlados en la mezcla, transporte (del lugar donde se hace la mezcla a la parte correspondiente de la obra), colocación y curado del concreto en las losas (ACI, 2005).

Se observan tendencias similares en ambos grupos en cuanto a problemas de agrietamientos y humedades aunque en el grupo de viviendas autoconstruidas los porcentajes de afectación son significativamente mayores que en las viviendas de construcción formal. Las grietas en alguna medida se pueden justificar ya que las hipótesis de cálculo en el diseño de las estructuras de concreto reforzado en general y las losas en particular, suponen niveles de carga mayores a las que provocan el agrietamiento. Lo que no es adecuado es que en la mayoría de los casos las grietas tengan su origen en los efectos de contracción y no en la generación de esfuerzos por flexión. La humedad es un problema preocupante debido a que la mayoría de los casos las losas de azotea son horizontales y no cuentan con sistema de drenaje apropiado. En las viviendas del grupo A los sistemas de impermeabilización son sencillos y poco durables mientras que en el grupo B es frecuente que se omitan debido a la carencia de recursos económicos por parte de los dueños. Resulta de interés observar que en la autoconstrucción se recurre frecuentemente al apisonado, supuestamente para lograr impermeabilidad; sin embargo, no se cuida que esta operación se haga antes del fraguado inicial, provocando frecuentemente mayores problemas de los que se tratan de prevenir. Los casos de corrosión del acero de refuerzo son poco frecuentes siendo mayores en las viviendas del grupo B. El escaso número de losas con corrosión del acero posiblemente se deba a lo benigno de las condiciones ambientales prevalecientes en la zona de estudio y no a las prácticas constructivas, puesto que en ambos grupos el recubrimiento de concreto es muy bajo e inexistente en algunos casos, lo cual es un factor determinante para el inicio de la corrosión (Kurtis, 1997). Además las pruebas de cloruros y de carbonatación indican valores mayores a los recomendados. El comité 318 del ACI recomienda para concreto endurecido antes de entrar en servicio, contenidos de cloruros solubles en agua de 3 kg/m<sup>3</sup> para condición seca y de 2 kg/m<sup>3</sup> para condición húmeda pero de agua no salina, en este estudio las determinaciones se hicieron con la estructura en servicio. Cabe decir que no se logró contar con el registro la edad exacta; sin embargo, se procuró que en los casos muestreados fuera aproximadamente de tres a cinco años. En cuanto a la profundidad de la carbonatación se establece por lógica que no debería ser mayor que el recubrimiento de concreto del acero, aspecto que en la mayoría de los casos estudiados no se cumple. Lo anterior permite establecer que hay condiciones propicias para la generación de problemas mayores de corrosión (Swamy, 2005). Por lo tanto se espera una alta probabilidad de aumento en la corrosión del acero de refuerzo. Las mismas observaciones se pueden hacer respecto a las deformaciones verticales y el agrietamiento.

Se debe añadir que no se contó con datos suficientes para relacionar algunos daños con la edad de la construcción; pero de forma general se puede establecer que es muy probable que aumenten debido a que en su gran mayoría las viviendas analizadas, no tienen más de 5 años y no es usual que los dueños inviertan en su mantenimiento. Adicionalmente se realizó el siguiente análisis:

Con los datos obtenidos en campo fueron calculados los momentos actuantes y resistentes (González, 2000) para las viviendas estudiadas. Por ejemplo, para el Grupo B se muestran los resultados en la Tabla 9, donde:  $M_A$  es el momento máximo actuante,  $C_c$  es el contenido de cloruros,  $M_R(SC)$  es el momento resistente sin considerar afectación de corrosión,  $M_R(CI)$  es el momento resistente considerando la pérdida de área de refuerzo por corrosión de acuerdo a los datos obtenidos en campo y  $M_R(CP)$  es el momento resistente considerando el efecto a largo plazo de la corrosión en cuanto a la disminución de área de refuerzo y disminución de la resistencia del concreto y en el supuesto de que no se realizaran reparaciones (Folino, 2011). La proyección supone que  $C_c$  (kg/m<sup>3</sup>) crecerá linealmente (Castro, 1997) hasta un valor de 5 para casos favorables (medida de  $C_c$  menor de 2), 6 para casos desfavorables (medida de  $C_c$  entre 2 y 3) y 8 para casos muy desfavorables (medida de  $C_c$  mayor de 3).

**Tabla 9. Momentos actuantes y resistentes en losas del Grupo B.**

Caso	MA (kg-m)	Cc (kg/m <sup>3</sup> )	Momento resistente (kg-m)		
			MR (SC)	MR (CI)	MR (CP)
1	935	2.7	1937	1826	1300
2	560	0.9	924	924	695
3	845	3.5	1428	1252	720
4	598	3.0	1203	962	520
5	490	1.9	780	780	587
6	602	2.4	878	819	565

Con base en esta información y, suponiendo que los momentos máximos actuantes y resistentes tienen distribución normal, y que los respectivos coeficientes de variación son 0.4 y 0.2, los índices de confiabilidad (Ang, 2005), que se pueden usar como medidas del riesgo estructural de las losas, resultan como se presenta en la Tabla 10.

**Tabla 10. Índices de confiabilidad para los 6 casos en función del contenido de cloruros.**

Caso	b <sub>sc</sub>	b <sub>ci</sub>	b <sub>cp</sub>
1	1.86	1.70	0.80
2	1.25	1.25	0.51
3	1.32	0.97	-0.34
4	1.78	1.19	-0.30
5	1.16	1.16	0.42
6	0.93	0.75	-0.14

El índice de confiabilidad se relaciona con la probabilidad de falla y depende de los valores esperados de las cargas y las resistencias, así como de su variabilidad expresada en función de la distribución de probabilidades, en este trabajo se calcula con los criterios previamente presentados (De León y López, 2009).

De los resultados de la Tabla 8, se observa que los únicos casos con índice de confiabilidad aceptable, valores del índice mayor de 1.7, son el 1 y el 4 para cuando no hay contenido de cloruros (casos SC) porque, para cuando se presentan los contenidos indicados (casos CI), el índice de confiabilidad baja a valores que no son aceptables, menores de 1.7, mientras que para los contenidos mayores de cloruros (casos CP), la situación es peor aún. Esto implica que seguramente un porcentaje importante de las viviendas estudiadas requerirán trabajos de mantenimiento al mediano plazo.

## CONCLUSIONES

Al tomar en cuenta los resultados obtenidos y su análisis, es claro que las losas de las viviendas en la zona de estudio muestran fallas de servicio en porcentajes muy altos (hasta 68% en construcción formal y hasta 96% en autoconstrucción) lo que acusa un problema muy serio de baja durabilidad que puede ser similar en otras zonas de las mismas características. Con estas bases se establecen las siguientes conclusiones:

En el diseño de las losas para vivienda no se cumplen los aspectos normativos, principalmente en lo referente al peralte para controlar las deformaciones y las cuantías de refuerzo para controlar los agrietamientos por contracción.

No se establecen especificaciones claras para la elaboración de concreto, la mayoría de las ocasiones se especifica solamente la resistencia a compresión, sin considerar otras características que han demostrado ser muy importantes en la durabilidad, como la densidad, sanidad, tamaño máximo y calidad de los agregados; la relación agua cemento; el peso volumétrico del concreto fresco y el revenimiento.

El agrietamiento que se genera como consecuencia de las bajas cuantías de refuerzo, los bajos módulos elásticos y los peraltes insuficientes, se incrementan más allá de lo permisible, provocando las frecuentes humedades y con el tiempo la corrosión del acero de refuerzo.

Considerando el análisis de los resultados parece que el diseño de las losas se hace por procedimientos casi empíricos, sin atender debidamente los parámetros básicos que son el espesor, las cuantías de refuerzo y la calidad del concreto.

Tomando en cuenta lo expuesto, las siguientes recomendaciones parecen obvias:

El diseño estructural de las losas para vivienda debe considerar además de la resistencia a flexión y cortante, los requisitos de servicio y durabilidad, lo cual implica, por lo menos, la revisión del peralte para controlar las deformaciones; la verificación de la cuantía de refuerzo para controlar la contracción del concreto y la consideración de un recubrimiento suficiente para prevenir la corrosión del acero de refuerzo.

La calidad del concreto debe quedar claramente establecida desde el proyecto estructural, donde se especifique no solamente la resistencia a compresión, sino la densidad del agregado, el peso volumétrico, la relación agua cemento y el revenimiento. Una buena práctica es especificar el concreto de clase 1 con revenimiento entre 25 y 75 mm, se pueden aceptar valores mayores del revenimiento, por ejemplo cuando construya con concreto bombeado, siempre y cuando se utilice un aditivo fluidificante o reductor de agua.

Por su parte el constructor deberá hacer lo necesario para cumplir las especificaciones del proyecto, de tal manera de lograr losas sin defectos y durables, principalmente para lograr una buena compactación que evite la segregación; también debe curar el concreto con métodos adecuados, utilizar silletas u otros elementos efectivos para garantizar el recubrimiento especificado. Además es importante—cuando se haga el diseño de la mezcla de concreto—sobre-dosificar el concreto para lograr un valor medio superior al especificado en el concreto, de otra manera la probabilidad de tener resistencias bajas resulta muy alta.

En cuanto a la autoconstrucción parece estar dando buenos resultados la campaña que se hace desde diferentes instancias para mejorar esta actividad; sin embargo, hacen falta mayores esfuerzos.

Finalmente, cabe mencionar que no es justificable hacer ahorros mal entendidos que comprometan la seguridad, el servicio y la durabilidad de las viviendas. Considerando los costos en la vida útil de la vivienda, puede demostrarse que, con el costo de prevención asociado a acciones de mejoramiento para que el contenido de cloruros sea menor a los valores indicados, la mayor durabilidad en estos casos, hace que a largo plazo sea más conveniente invertir en esta opción, que en la otra en la cual se tendrán que ejercer mayores costos futuros para prolongar la vida de la vivienda, al mismo periodo que en la anterior opción (Ellingwood, 2007). Seguramente el usuario de la vivienda estará dispuesto a pagar un extra si son aplicados adecuadamente los argumentos, y sobre todo, si conoce los resultados.

## Referencias

ACI, *Manual of Concrete Practice*, Comities 201, 222 y 218, 2005.

Ang, A.; De Leon, D., “Modeling and analysis of uncertainties for risk-informed decisions in infrastructures engineering”, en *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 1, núm. 1, pp. 19-31, 2005.

Castro, P.; Veleza, L.; Balancán M., “Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and accelerated test”, en *Construction and building Materials*, vol. 11, núm. 2, pp.75-81, 1997.

De León, D; López López, A., “Risk, vulnerability and cost. Functions for electrical substation and power transmission towers under strong winds in Mexico”, Icosar, Osaka, Japón, 2009.

De León, D.; Gardoni P.; Hurlbaas, S.; Bisadi, V.; Head M. y Roesset, J., “Life-cycle cost functions for bridge maintenance investments promoting safety and sustainability”, IALCEE, Taiwan, 2010.

Sánchez de Guzmán, Diego, *Durabilidad en Patología del Concreto*, Instituto del Concreto, Bogotá, Colombia, 2002.

Ellingwood, B., “Risk-informed evaluation of civil infrastructure subjected to extreme events”, en *I Symposium on natural risk and reliability Analyses applied to the planning and design of civil works for the electrical industry in México*, México, DF, 2007.

Folino, P.; Etse, G., “Validation of performance-dependent failure criterion for concretes”, en *ACI Materials Journal*, vol. 108, núm. 3, pp. 261 -269, 2011.

Kurtis, K. E.; Mehta K., “A critical review of deterioration of concrete due to corrosion of reinforcing steel”, ACI SP 170-27, pp. 535-554, 1997.

Mena Ferrer, Manuel, *Durabilidad de las estructuras de concreto en México*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC, 2005.

NTC, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado”, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 6 de octubre 2004.

González Cuevas, Óscar; Robles Fernández, Francisco, *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*, Limusa, Noriega Editores, tercera edición, 2000.

Swamy, R. N., “Design for durability—a hollistic material and structural strategy”, en *International Symposium of Durability of Concrete*, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2005.