



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO
FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON
FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**

Kevin Estuardo Montoya Valdez
Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, abril de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO
FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON
FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KEVIN ESTUARDO MONTOYA VALDEZ
ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2016

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 25 de septiembre de 2014.



Kevin Estuardo Montoya Valdez

Guatemala, 13 de enero de 2016

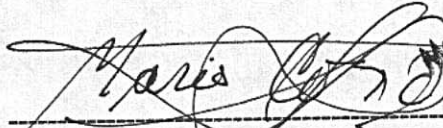
Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Jefe del Departamento de Materiales de Construcción
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**, presentado por el estudiante Kevin Estuardo Montoya Valdez, con carné 201021071

Considero que el trabajo de graduación cumple satisfactoriamente los objetivos para los que fue planteado, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado.

Atentamente,


Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila
Ingeniero Civil, Colegiado No. 2089

Mario Rodolfo Corzo A.
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089

Jefe de Sección de Estructuras
Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
15 de febrero de 2016

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Kevin Estuardo Montoya Valdez quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





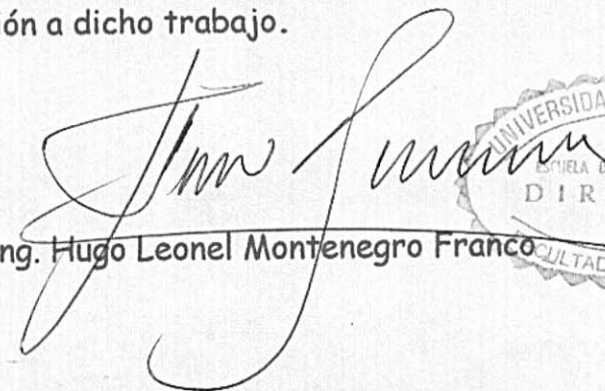
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Kevin Estuardo Montoya Valdez, titulado **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril 2016
/mrrm.

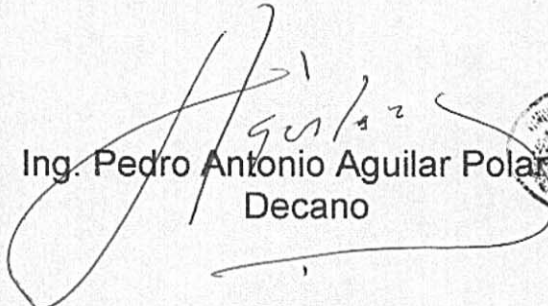
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN, ENTRE CONCRETO FIBROREFORZADO CON POLIPROPILENO Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS, PARA USO EN CARPETAS DE RODADURA EN PARQUEOS**, presentado por el estudiante universitario: **Kevin Estuardo Montoya Valdez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2016

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por el don de la vida, porque a través de su infinito amor, misericordia y bendición ilumina mi camino, guía mis pasos y me permite alcanzar con éxito mis metas.
- Mis padres** Sergio Montoya y Brenda Valdez de Montoya, por su amor, ejemplo de vida y apoyo incondicional. Este triunfo es también de ustedes que han sido fuente de inspiración y motivo para alcanzarlo.
- Mis hermanas** Josselyn y Stephanie Montoya, por su presencia y compañía, sigan adelante, que este logro sea ejemplo para ustedes.
- Mis abuelos** Laureano Rafael y María Georgina Montoya, José Guadalupe Valdez (q. e. p. d.) y Argelia Meza (q. e. p. d.).
- Mi familia en general** Por estar pendientes de mí, a ustedes mi respeto y cariño.
- Mi novia** Evelin Flores, por su amor, comprensión, paciencia y compañía en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Padre, Hijo y Espíritu Santo, por darme sabiduría y entendimiento.
Virgen María	Madre, intercesora y auxiliadora de los cristianos, por acompañarme en todo momento.
Mis padres	Por darme la oportunidad de estudiar y superarme.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter.
Facultad de Ingeniería	Escuela de Ingeniería Civil, por brindarme la formación académica para ser un profesional
Ing. Mario Corzo	Por sus enseñanzas al compartir sus conocimientos y experiencias, por el tiempo dedicado en la asesoría y revisión de este trabajo de graduación.
Sika	En especial al Ing. Kenneth Molina por su tiempo, asesoría y colaboración en la realización de este trabajo. A Esvin Mansilla y Josué Noj, por la ayuda que me brindaron.

Sección de Estructuras del CII

Don Fabio y compañeros practicantes, por su colaboración en los ensayos necesarios para este trabajo de graduación.

Mi familia

Abuelos, tíos, primos. Especialmente a mi tía Ana Meza, por estar pendiente de mí.

Mis compañeros

Santos Tumax, Mynor Saquic, Jorge Coutiño, Adrián Miranda y Jorge Alcor, por compartir los buenos y malos momentos en el transcurso de la carrera.

Carlos Sánchez

Por el conocimiento compartido, su apoyo y consejos.

Lic. Juan Carlos Pérez

Por ser profesor y amigo.

Evelin Flores García

Por tu apoyo en la etapa final de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MATERIALES FIBROREFORZADOS.....	1
1.1. Antecedentes históricos del uso de materiales fibroreforzados.....	1
2. MATERIALES COMPUESTOS	5
2.1. Matriz.....	5
2.2. Fibras.....	6
2.2.1. Fibras usadas para refuerzo de concreto	6
2.2.2. Fibras de polipropileno	8
2.2.3. Fibras metálicas.....	10
2.3. Materiales compuestos reforzados con fibras	13
2.3.1. Longitud y diámetro	13
2.3.2. Orientación de la fibra.....	13
2.3.3. Cantidad de fibra	14
2.3.4. Unión y rotura	14
3. PAVIMENTOS.....	15
3.1. Generalidades	15

3.2.	Estructura.....	17
3.2.1.	Subrasante.....	17
3.2.1.1.	Factores determinantes en el comportamiento.....	17
3.2.1.2.	Problemas frecuentes	17
3.2.1.2.1.	Causas y efectos.....	18
3.2.1.2.2.	Tratamiento y estabilización.....	19
3.2.1.2.2.1.	Estabilización física	20
3.2.1.2.2.2.	Estabilización química	20
3.2.1.2.2.3.	Estabilización mecánica ..	21
3.2.2.	Subbase y base.....	21
3.2.2.1.	Tipos según material	22
3.2.2.2.	Problemas, causas y efectos.....	23
3.2.2.3.	Estabilización	23
3.2.3.	Carpeta de rodadura	24
3.2.3.1.	Uso en pavimento rígido.....	25
3.2.3.1.1.	Concreto y sus generalidades.....	30
3.2.3.1.2.	Gradiente térmico.....	32
3.2.3.1.3.	Durabilidad	33
3.2.3.1.4.	Ensayo a flexión.....	35
3.2.3.1.5.	Módulo de rotura	35
3.3.	Calidad y durabilidad.....	36
3.4.	Mantenimiento.....	36
3.5.	Juntas.....	38
3.6.	Uso en parqueos	40
3.6.1.	Clasificación de parqueos según tráfico del área urbana	40

	3.6.1.1.	Tránsito liviano.....	41
		3.6.1.1.1. Eje y cargas.....	41
	3.6.1.2.	Tránsito pesado	42
		3.6.1.2.1. Eje y cargas.....	42
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL		43
4.1.	Procedimiento para la elaboración de losas y vigas		43
	4.1.1.	Materiales utilizados	43
	4.1.2.	Equipo y pruebas de laboratorio.....	56
	4.1.3.	Elaboración de losas y vigas de concreto.....	60
4.2.	Ensayo de concreto a flexión Norma EN 14488-5.....		66
	4.2.1.	Equipo y procedimiento para el ensayo.....	66
	4.2.2.	Consideraciones	68
	4.2.3.	Concreto sin refuerzo	70
		4.2.3.1. Losas de 10 cm de espesor.....	70
		4.2.3.2. Losas de 12 cm de espesor.....	76
	4.2.4.	Concreto fibroreforzado con polipropileno	80
		4.2.4.1. Losas de 10 cm de espesor.....	80
		4.2.4.2. Losas de 12 cm de espesor.....	98
	4.2.5.	Concreto reforzado con fibras metálicas	106
		4.2.5.1. Losas de 10 cm de espesor.....	106
		4.2.5.2. Losas de 12 cm de espesor.....	124
	4.2.6.	Deformación	132
4.3.	Ensayo de concreto a flexión según Norma ASTM C-78		133
	4.3.1.	Procedimiento y equipo para el ensayo.....	133
	4.3.2.	Consideraciones	135
	4.3.3.	Concreto sin refuerzo	136
	4.3.4.	Concreto fibroreforzado con polipropileno	136
	4.3.5.	Concreto reforzado con fibras metálicas	137

4.4.	Resultados obtenidos.....	138
5.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	173
5.1.	Comparación mecánica.....	173
5.2.	Análisis de resultados	180
5.3.	Análisis comparativo de costos	185
	CONCLUSIONES.....	187
	RECOMENDACIONES	189
	BIBLIOGRAFÍA.....	191
	APÉNDICES.....	195

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fibra macrosintética de polipropileno.....	9
2.	Fibra de metal	12
3.	Comportamiento de pavimentos	16
4.	Estructura del pavimento.....	25
5.	Pavimentos de concreto simple	26
6.	Pavimentos con refuerzo de acero.....	28
7.	Pavimento con refuerzo continuo.....	29
8.	Transferencia de carga entre losas del pavimento.....	30
9.	Mezcla de concreto	31
10.	Deformación del concreto por cambios de temperatura y humedad	33
11.	Escalonamiento por bombeo y erosión	37
12.	Juntas en proceso de construcción.....	39
13.	Elementos del pavimento rígido	40
14.	Cemento CFB	44
15.	Agregado grueso utilizado.....	45
16.	Arena triturada	47
17.	Aditivo reductor de agua de alto rango.....	48
18.	Integración de aditivo a la mezcla	49
19.	Fibra de polipropileno Sika Fiber Force PP/PE-700/55.....	51
20.	Adición de la fibra de polipropileno durante el mezclado	52
21.	Fibra metálica Sika Fiber CHO65/35 NB.....	54
22.	Fibras metálicas	54

23.	Adición de fibra metálica a la mezcla	55
24.	Equipo para la prueba de contenido de humedad	56
25.	Proceso de homogenización del material	57
26.	Prueba de asentamiento del concreto fresco.....	59
27.	Toma de temperatura al concreto fresco	59
28.	Moldes de madera para fundición de losas	60
29.	Molde de metal para hacer las vigas	61
30.	Desmoldante Separol	61
31.	Mezcladora utilizada	62
32.	Pesado de materiales	62
33.	Mezclado de materiales	64
34.	Colocación y fraguado de concreto.....	65
35.	Sistema para ensayo a flexión de losas.....	67
36.	Gráfica (típica) carga–deflexión Norma EN 14488-5	69
37.	Gráfica carga–deflexión de losas sin fibra de 10 cm de espesor.....	75
38.	Gráfica carga–deflexión de losas sin fibra de 12 cm de espesor.....	79
39.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno.....	85
40.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	85
41.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra de polipropileno.....	91
42.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	91
43.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno.....	97
44.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	97

45.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno	101
46.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5	101
47.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno	105
48.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5	105
49.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica.....	111
50.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5.....	111
51.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica.....	117
52.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica Norma EN 14488-5.....	117
53.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	123
54.	Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5.....	123
55.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica.....	127
56.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5.....	127
57.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	131
58.	Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica según Norma EN 14488-5	131
59.	Máquina universal Baldwin.....	134

60.	Gráfica de la media de carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, sin refuerzo	140
61.	Curva típica esfuerzo-deformación para concreto de 350 kg/cm ²	141
62.	Losa de 10 cm de espesor de concreto simple ensayada	141
63.	Efecto dovela en los agregados de la losa de 10 cm de espesor de concreto simple.....	142
64.	Gráfica de la media de carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, sin refuerzo	145
65.	Losa de 12 cm de espesor de concreto simple ensayada	146
66.	Efecto dovela en los agregados de la losa de 12 cm de espesor de concreto simple.....	146
67.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno.....	149
68.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	149
69.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno	151
70.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis media fibra polipropileno Norma EN 14488-5.....	151
71.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno	153
72.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	153
73.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno.....	155
74.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5.....	155
75.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno	157

76.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5	157
77.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	159
78.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5	159
79.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica	161
80.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis media fibra metálica Norma EN 14488-5	161
81.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica	163
82.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5	163
83.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	165
84.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5	165
85.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica	167
86.	Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5	167
87.	Comparación gráfica de concreto sin refuerzo	173
88.	Comparación gráfica de concreto con fibra de polipropileno	175
89.	Comparación gráfica de concreto con fibra metálica	176
90.	Comparación gráfica de concreto por carga máxima	178
91.	Comparación gráfica de concreto por módulo de rotura	179
92.	Espesor de losa–carga	184

TABLAS

I.	Propiedades de tipos de fibras seleccionadas.....	12
II.	Causa-efecto de los problemas frecuentes en la subrasante	18
III.	Materiales usados en la estabilización de subbases y bases	24
IV.	Valores de carga equivalente de referencia.....	41
V.	Tamaño máximo nominal del agregado grueso	45
VI.	Tamaño del agregado fino	46
VII.	Información técnica de aditivo	49
VIII.	Información fibra polipropileno Sika Fiber Force PP/PE-700/55	50
IX.	Información técnica fibra metálica Sika Fiber CHO65/35 NB.....	53
X.	Diseño de mezcla utilizado	64
XI.	Losas para ensayar a flexión	68
XII.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, sin fibra.....	70
XIII.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, sin fibra.....	71
XIV.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, sin fibra.....	72
XV.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, sin fibra.....	73
XVI.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, sin fibra.....	74
XVII.	Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, sin fibra.....	76
XVIII.	Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, sin fibra.....	77
XIX.	Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, sin fibra.....	78
XX.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno	80
XXI.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno	81
XXII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno	82

XXIII.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno.....	83
XXIV.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno.....	84
XXV.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno.....	86
XXVI.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno.....	87
XXVII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno.....	88
XXVIII.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno.....	89
XXIX.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno.....	90
XXX.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	92
XXXI.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	93
XXXII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	94
XXXIII.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	95
XXXIV.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	96
XXXV.	Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno.....	98
XXXVI.	Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno.....	99

XXXVII.	Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno.....	100
XXXVIII.	Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	102
XXXIX.	Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno.....	103
XL.	Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno	104
XLI.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	106
XLII.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	107
XLIII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	108
XLIV.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	109
XLV.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica	110
XLVI.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica	112
XLVII.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica	113
XLVIII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica.....	114
XLIX.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica	115
L.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica	116

LI.	Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	118
LII.	Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	119
LIII.	Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	120
LIV.	Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	121
LV.	Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	122
LVI.	Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica.....	124
LVII.	Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica.....	125
LVIII.	Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica.....	126
LIX.	Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	128
LX.	Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	129
LXI.	Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica.....	130
LXII.	Vigas para ensayar a flexión	135
LXIII.	Datos del ensayo de probetas de concreto simple Norma ASTM C-78.....	136
LXIV.	Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis baja fibra de polipropileno Norma ASTM C-78	136
LXV.	Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis alta fibra de polipropileno Norma ASTM C-78	137

LXVI.	Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis baja fibra metálica Norma ASTM C-78	137
LXVII.	Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis alta fibra metálica Norma ASTM C-78	138
LXVIII.	Promedio de losas sin refuerzo de 10 cm de espesor	139
LXIX.	Promedio de losas sin refuerzo de 12 cm de espesor	144
LXX.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno	148
LXXI.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis media de fibra de polipropileno	150
LXXII.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis alta de fibra de polipropileno	152
LXXIII.	Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis baja de fibra de polipropileno	154
LXXIV.	Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis alta de fibra de polipropileno	156
LXXV.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis baja de fibra metálica	158
LXXVI.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis media de fibra metálica.....	160
LXXVII.	Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis alta de fibra metálica.....	162
LXXVIII.	Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis baja de fibra metálica.....	164
LXXIX.	Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis alta de fibra metálica.....	166
LXXX.	Resumen de resultados obtenidos, ensayos del concreto según Norma EN 14488-5.....	168

LXXXI.	Resultados ensayo de probetas de concreto simple según Norma ASTM C-78.....	169
LXXXII.	Resultados ensayo probetas de concreto con dosis baja fibra polipropileno Norma ASTM C-78	170
LXXXIII.	Resultados ensayo probetas de concreto con dosis alta fibra polipropileno Norma ASTM C-78	170
LXXXIV.	Resultados ensayo probetas de concreto con dosis baja fibra metálica Norma ASTM C-78	171
LXXXV.	Resultados ensayo probetas de concreto con dosis alta fibra metálica Norma ASTM C-78	171
LXXXVI.	Resumen de resultados obtenidos por los ensayos del concreto según Norma ASTM C-78	172
LXXXVII.	Eficiencia de concreto simple.....	174
LXXXVIII.	Eficiencia de concreto con fibras de polipropileno	175
LXXXIX.	Eficiencia de concreto con fibras metálicas.....	177
XC.	Comparación por carga máxima	178
XCI.	Comparación por módulo de rotura.....	179
XCII.	Costo de materiales para 1 m ³ de concreto sin refuerzo.....	185
XCIII.	Costo de materiales para 1 m ³ de concreto con fibras.....	186

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
d	Altura de viga probeta
b	Ancho de sección
a.C.	Antes de Cristo
P	Carga
°C	Centígrados
cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
cm³	Centímetro cúbico
ρ	Cuantía
e	Deformación
ε	Deformación unitaria
∅	Diámetro
Fc	Factor de carga
g	Gramo
kg	Kilogramo
kgf	Kilogramo fuerza
kN	Kilonewton
psi	Libra por pulgada cuadrada
l	Litro
L	Luz, distancia entre apoyos, longitud
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico

mm	Milímetro
mm²	Milímetro cuadrado
MR	Módulo de rotura
N	Newton
núm.	Número
%	Porcentaje
pulg.	Pulgada
”	Pulgada
pulg²	Pulgada cuadrada
Q	Quetzales
λ	Relación de forma de la fibra
SI	Sistema internacional de medidas
TPDA	Tránsito promedio diario anual

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano de Concreto).
Agreca	Agregados de Centro América.
Álcali	Compuesto que es disolución acuosa se comporta como una base fuerte.
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
Betún	Nombre genérico de un material negro y amorfo que se reblandece con el calor y se usa en pavimentación.
Carga	Aplicación de fuerza sobre un elemento estructural.
Coguanor	Comisión Guatemalteca de Normas.
Comparación	Fijar la atención en dos o más objetos para descubrir sus relaciones, diferencias o semejanzas.

Contracción	Estrechamiento de un material.
Corrosión	Desgaste de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos.
Deflexión	Curvatura transitoria que experimenta un sólido elástico por la acción de una fuerza que lo deforma.
Deformómetro	Aparato que sirve para medir las deformaciones de un elemento estructural.
Durabilidad	Calidad de un material respecto a su duración.
Esfuerzo	Fuerza por unidad de área, intensidad de las fuerzas distribuidas sobre una sección determinada.
Extrusión	Dar forma a una masa metálica, haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta.
Fibra	Cada uno de los filamentos de diversa naturaleza y distintas aplicaciones.
Fisura	Grieta que se produce en un elemento estructural.
Flexión	Deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
Fractura	Rotura de un elemento estructural.

Frágil	Quebradizo, material que se hace pedazos con facilidad.
Fuerza	Energía que se aplica a un elemento para alterar su estado.
Funcionalidad	Cualidad de ser funcional.
Grieta	Hendidura alargada que se hace en un elemento estructural.
Homogeneizar	Hacer homogéneo un compuesto o mezcla de diversos elementos, por medios físicos o químicos.
Impermeabilidad	Cualidad de ser impenetrable al agua u otro fluido.
Intemperie	A cielo descubierto, sin techo ni otro reparo alguno.
Mecánica	Disciplina que trata del equilibrio y del movimiento de los cuerpos sometidos a cualquier fuerza.
PCA	Portland Cement Association (Asociación del Cemento Portland).
Polimerización	Proceso en que las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas pesadas.

Polipropileno	Material que se obtiene de la polimerización del propileno o propeno.
Resiliencia	Energía de deformación por unidad de volumen, que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa es esfuerzo que lo deforma.
Resistencia	Propiedad de un elemento para soportar una carga o fuerza aplicada.
Rigidez	Capacidad de un elemento sólido para soportar esfuerzos sin tener grandes deformaciones o desplazamientos.
Rotura	Raja o quiebra de un cuerpo sólido como los elementos estructurales.
Súbita	Tipo de falla repentina e imprevista en los elementos.
Tenacidad	Energía de deformación total que puede absorber un elemento antes de romper por impacto.
Tensión	Fuerza interna que actúa por unidad de superficie y provoca elongaciones de los materiales sometidos a esta.

RESUMEN

Este trabajo de graduación es un estudio comparativo sobre concreto reforzado con dos tipos de fibras con respecto al concreto simple, para plantear su uso en carpeta de rodadura en pavimentos de parqueos. Siendo el concreto fibroreforzado el que se estudia con mayor énfasis, por los importantes resultados que puede aportar, tanto a la investigación de este trabajo como a la información sobre el uso de las fibras en el país.

El primer capítulo trata sobre los materiales fibroreforzados. Los antecedentes históricos, la forma en que han sido utilizadas las fibras para reforzar materiales alrededor del mundo y el desarrollo que han tenido estas con el tiempo y con los avances en la tecnología. Esto permite que en la actualidad sea más frecuente su uso.

El segundo capítulo describe los materiales compuestos, las partes que lo componen y las características de cada una de esas partes.

En el capítulo tercero se desarrolla el tema de pavimentos rígidos, generalidades, su estructura, factores que determinan el comportamiento del mismo durante su vida útil, y los elementos que lo conforman.

El cuarto y quinto capítulo exponen el desarrollo experimental de los ensayos a los elementos de concreto fibroreforzado. Describe los materiales y el equipo utilizado, los datos y resultados obtenidos con los cuales se hacen los análisis y comparaciones necesarias para determinar la eficiencia de cada uno ante las cargas a flexión, correspondientes a una losa de rodadura.

OBJETIVOS

General

Proponer una alternativa para losas de rodadura, utilizando concreto reforzado con fibras, para su uso en los pavimentos de parqueos.

Específicos

1. Determinar el concreto más eficiente ante los esfuerzos de cargas a flexión, entre concreto reforzado con fibra metálica y con fibra de polipropileno.
2. Estudiar el comportamiento mecánico del concreto fibroreforzado por medio de su resistencia a flexión.
3. Conocer el aporte de las fibras a las características físicas y propiedades mecánicas del concreto.
4. Hacer un análisis y comparación de los elementos de concreto según las tablas y gráficas resultantes de los ensayos.
5. Evaluar con un análisis de costos, el concreto viable económicamente, considerando el costo inicial y el mantenimiento que requieren.
6. Dar a conocer los cambios que puede sufrir la carpeta de rodadura por la intemperie, temperatura y mala calidad de la estructura del pavimento.

INTRODUCCIÓN

Desde que se desarrolló la construcción a base de concreto ha sido un tema de interés la mejora continua de sus propiedades, comportamiento y rendimiento, dando lugar a la integración de diversos elementos entre los cuales están las fibras. Específicamente las fibras metálicas y sintéticas se han añadido como componentes del concreto empleado para diferentes estructuras, desarrollando nuevas tecnologías de construcción.

Considerando que el desempeño de una losa de rodadura de concreto está determinado por las cargas a flexión que soporta, la estructura interna del pavimento y los factores externos como la variación de temperatura, humedad y agentes nocivos que lo afectan. Se presenta en este trabajo de graduación alternativas al concreto simple, como lo son los concretos reforzados con fibras metálicas y de polipropileno.

Se propone el uso de estas fibras para mejorar las propiedades mecánicas y características físicas del concreto para disminuir las grietas que inducen a la inestabilidad de las losas de rodadura. En este caso, se sugiere para pavimentos rígidos de parqueos, por el mal estado que pueden llegar a tener debido al poco o nulo mantenimiento y a la mala calidad de la subestructura del mismo.

1. MATERIALES FIBROREFORZADOS

Son materiales compuestos que contienen fibra. Las fibras son un elemento presente en la construcción desde hace miles de años y han sido utilizadas para el refuerzo de materiales quebradizos.

1.1. Antecedentes históricos del uso de materiales fibroreforzados

- Edad Antigua

Según investigaciones que se han realizado, en 2500 a.C. en Egipto ya se usaba la paja como refuerzo en los bloques de adobe. Hace 4000 años en la región de Caldea de la Mesopotamia meridional también empleaban la paja como fibra natural, para amarrar y reforzar los adobes de barro cocidos al sol. A los revoques y al yeso para enlucido de estructuras se les agregaba pelo de cabra y crin de caballo para evitar fisuras.

De igual forma se tiene conocimiento que en grandes estructuras se hizo uso de fibras naturales para el refuerzo de las mismas, como en la Muralla China (220 a.C.) y en los caminos incas. Todas las fibras las obtenían de lo que la naturaleza les brindaba y eran de diferentes tamaños y formas.

- Edad Contemporánea, avances del siglo XX y situación actual

En tiempo más reciente, la búsqueda de hacer fibras más eficientes con menor diámetro y una longitud pequeña en comparación a las existentes en ese momento, dio paso a que en 1899, Ludwing Hatscheck inventara el asbesto

cemento. El primer material manufacturado por el hombre que contenía fibras de asbesto las cuales daban mayor resistencia al material disminuyendo las fisuras. Sin embargo fue retirado del mercado a mediados de 1950 porque representaba riesgos para la salud. Es a partir de acá cuando surge el interés por desarrollar más fibras sintéticas.

Desde 1910 se proponía experimentar con elementos metálicos en el hormigón. En 1911 Graham proponía el uso de acero en fibras como refuerzo para el concreto, pero fue Griffith en 1920, y años más tarde Romualdi, Batson y Mandel desde 1950 hasta 1963, quienes con sus estudios dieron un auge al desarrollo y uso de las fibras artificiales para agregarlas a materiales como el hormigón. Entonces al concreto fibroreforzado se le tomó más importancia desde ese período de tiempo.

Con más conocimientos, sobre las fibras como refuerzo en concreto, surgieron más estudios al respecto. En India K.T. Sundara, Raya Iyengar y C.S. Wiswanatha experimentaron con fibras de acero, vidrio y plástico. Sridhara, S. Kumar y M.A. Sinare reforzaron el concreto con fibras de *nylon* y fibras naturales de origen vegetal y lo sometieron a pruebas de impacto.

Para 1970, en Europa comienzan a usarse estos materiales compuestos con fibra como refuerzo. En Inglaterra se produjo fibra de vidrio resistente a los álcalis. Herberth Krenchel, en Dinamarca, trabajó las fibras vegetales y el asbesto cemento. En Suecia, Lennar Wilson hizo estudios sobre fibra tipo sisal. Para ese entonces, ya el concreto fibroreforzado se empleaba en muchos ámbitos y para varios propósitos, tales como: obras constructivas civiles y militares, prefabricados, pavimentación de pisos industriales, pavimentación para carros de combate, hangares, recintos que soportan impactos de proyectiles.

En esa misma década, pero en Estados Unidos, las fibras metálicas para reforzar el concreto se comercializan con éxito. En 1971, en Ohio, se coloca el primer pavimento con esta tecnología en una estación de pesaje de camiones. En Pennsylvania se coloca este material sobre las capas de tableros de puentes que aún prestan servicio.

A partir de 1985 surgen las fibras orgánicas de altas prestaciones y tienen la aprobación del mercado. Esto significa un avance en la tecnología del concreto y de la construcción.

Actualmente la fibra como refuerzo de concreto se sigue utilizando con gran aceptación en superficies grandes que tienden a fracturarse, como en la pavimentación de aeropuertos, pisos industriales, revestimiento de túneles y tableros de puentes.

2. MATERIALES COMPUESTOS

Son los formados por dos o más componentes, los cuales tiene mejores propiedades que las partes individuales que los conforman. Los materiales compuestos tienen matriz y refuerzo. La mayoría son diseñados y hechos por el hombre.

Estas partes son diferentes en forma y composición química. Sin embargo cuando trabajan en conjunto forman una interfase entre sí, durante este proceso el material resultante adquiere mejores cualidades.

El concreto reforzado, siendo un material compuesto, puede tener su parte reforzante en forma de partículas, fibras, barras y otros tipos de refuerzo que existen actualmente para el concreto. Sin embargo la fibra ha sido estudiada y probada en diferentes materiales y con base en ensayos ha demostrado dar resistencia y rigidez a varios de estos materiales.

El concreto reforzado está formado por las dos partes antes mencionadas: matriz y fibra.

2.1. Matriz

Es el componente que sirve como ligante y en donde queda embebido el refuerzo. Su función es distribuir de buena manera los esfuerzos exteriores a las fibras, darles cohesión, protección al exterior, evitar el deterioro de las mismas para aumentar la durabilidad del conjunto y que no se fisure.

La matriz define propiedades físicas, químicas y estabilidad del compuesto.

2.2. Fibra

Es la parte que complementa a la matriz. Es el refuerzo del compuesto cuya función es darle propiedades como rigidez y resistencia mecánica.

La fibra para estructuras tiene un gran módulo elástico, buena resistencia y poco peso. Las características de las fibras como el tamaño, forma, material y textura determinan si son o no adecuadas para reforzar distintas estructuras. Deben estar uniformemente distribuidas en la matriz.

Las fibras buscan mejorar las ventajas mecánicas del concreto.

2.2.1. Fibras usadas para refuerzo de concreto

Existen muchas fibras que se le pueden agregar a un concreto esperando que funcione como buen refuerzo. Esto para brindar una mejor resistencia y comportamiento en estado fresco y endurecido.

Una de las principales funciones de las fibras es complementar al concreto. Debido a que tiene debilidades mecánicas, aportándole mejoras en sus propiedades.

El adecuado contenido de fibra en el concreto busca que la resistencia a la flexión se incremente. Esto para que el compuesto soporte cargas a deflexiones que sobrepasen la deflexión por fractura del concreto simple, es decir, que las deformaciones unitarias a la tensión de ruptura sean más grandes. Lo que

hacen las fibras es formar una red que evita que el concreto se descascare, confinando las grietas del mismo. De esta manera que siga prestando servicio a pesar de su condición.

Las fibras deben añadirse al concreto durante su mezclado para que haya una buena adherencia entre los dos materiales. Por costos y entre otras razones, se busca optimizar el volumen de fibra dentro del concreto sin afectar el resultado mecánico de la estructura.

Las fibras se pueden clasificar por la funcionalidad que tienen y por el material con que están hechas.

Por su funcionalidad, existen dos tipos de fibras:

- Microfibras: se usan para evitar la fisuración del concreto cuando está fresco, son dosis muy bajas pero efectivas que previenen la retracción plástica.
- Macrofibras: utilizadas para evitar la fisuración del concreto endurecido, el objetivo es reducir el tamaño de la fisura si llega a darse y permitir que la estructura siga funcionando.

Por el material, las fibras pueden ser:

- Naturales: son las que se usan desde la antigüedad, actualmente en la construcción han perdido importancia en el refuerzo de concreto. Pueden ser de origen vegetal, animal o mineral. Entre estas fibras se pueden mencionar: la corteza, hojas, semillas, pelaje y asbestos.

- **Artificiales:** fibras que pueden provenir de la naturaleza con base celulósica, proteínica o mineral pero que han sido modificadas por el hombre. También pueden ser fibras químicas sintéticas, las cuales han sido creadas artificialmente. Las primeras provienen de polímeros naturales y las segundas de polímeros artificiales. Algunos ejemplos de fibras químicas sintéticas usadas para refuerzo de concreto son: acrílica, aramida, *nylon*, poliéster, polietileno y polipropileno.
- **Otras:** Vidrio, carbono y metálicas.

2.2.2. Fibras de polipropileno

Estas fibras son las más populares de las fibras macrosintéticas. Son químicamente inertes, ligeras e hidrófobas. El polipropileno es un polímero extrusionado por un estiramiento en caliente que se le hace al material. Se producen en forma de monofilamentos cilíndricos continuos que se cortan en longitudes específicas y se componen de fibrillas de sección transversal rectangular.

Por ser hidrófobas estas fibras tienen baja adherencia con la matriz cementicia, al usar bajo volumen no cumplen una buena función estructural, a pesar de tener bastante tenacidad presentan baja resistencia a la tensión y tienen alta combustibilidad. Para que funcionen bien como refuerzo se debe de usar un volumen mínimo de 0,1 % del volumen del concreto.

Tienen una alta resistencia a las sales, los ácidos, agentes oxidantes y microorganismos. Es por eso que no hay problema cuando sobresalen del concreto a la intemperie, ya que no se oxidan solo se cristalizan y no afecta a las demás embebidas en el hormigón.

Al tener la cantidad apropiada de fibra en el concreto se espera que mejore la resistencia del mismo, que se reduzcan las fisuras por contracción plástica y se incremente la tenacidad y resistencia a la abrasión e impacto.

Respecto a su resistencia al fuego, el polipropileno se funde a aproximadamente 150 °C y desde los 50 °C empieza a perder sus propiedades mecánicas y el efecto reforzante desaparece a altas temperaturas.

La densidad de la fibra es menor que la del agua, haciéndola una fibra muy liviana. El refuerzo de la fibra depende de su anclaje al concreto, de su resistencia a la tracción y de su módulo de elasticidad.

Estas fibras vienen adheridas unas con otras con un pegamento especial que se deshace durante el mezclado. Esto hace que las fibras se dispersen en todo el concreto.

El concreto fibroreforzado con polipropileno se usa en estructuras como pavimentos, revestimiento de túneles, bóvedas, pisos industriales, taludes con concreto lanzado y en elementos prefabricados.

Figura 1. **Fibra macrosintética de polipropileno**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

2.2.3. Fibras metálicas

Son secciones de metal, pequeños pedazos discontinuos de acero con poco contenido de carbono y con una relación de forma que varía entre 20 y 100. Pueden tener muchas secciones transversales las cuales pueden ser redondas, ovaladas, rectangulares, media luna y otras. Estas fibras tienen extremos doblados para mejorar la resistencia al arrancamiento de la matriz cementicia. Su superficie es rugosa y con irregularidades como ondulaciones en toda la longitud de la fibra para mejorar su adherencia con el concreto.

Las fibras metálicas pretenden modificar el comportamiento del hormigón transformándolo de material frágil a material dúctil, capaz de resistir las deformaciones importantes sin perder sus capacidades portantes. La ductilidad permite una nueva repartición de los esfuerzos así como una mejor capacidad portante de la estructura. Las propiedades mecánicas del concreto de base, no sufren alteraciones.

La Norma ASTM A 820 expone las tolerancias de longitud, diámetro y esbeltez de las fibras de acero así como las resistencias mínimas a la tensión y flexión. Esta norma clasifica, según su manufactura, en cuatro tipos a las fibras metálicas:

- Fibras fabricadas de alambre de acero conformado
- Fibras de acero cortadas de las chapas de acero
- Fibras extraídas de fundición
- Otras fibras

Normalmente el volumen de fibra metálica usado en concreto varía de 0,25 % a 2 %, más de este porcentaje reduciría la trabajabilidad del compuesto

y se tendría una mala distribución de la fibra. Se podría usar más del 2 % si se tiene un diseño especial en donde se aumente la pasta de la mezcla y también contar con una técnica peculiar de colado.

Las fibras metálicas pueden aumentar la resistencia a la tracción y a la flexión del hormigón. Estas fibras no afectan la contracción libre del concreto. Lo que suponen con su uso es retardar la fractura del concreto restringido durante la contracción y mejorar la relajación de tensiones por el mecanismo de fluencia.

Si el concreto se proporciona y coloca correctamente ocurrirá poca o ninguna corrosión de las fibras. Cualquier corrosión de las fibras en la superficie del concreto es un problema de apariencia y no estructural. Al no estar en contacto con todas las demás dentro del concreto, no les puede causar corrosión o afectar sus propiedades mecánicas, se puede usar fibras metálicas galvanizadas para que no oxiden, pero es cuestión de estética.

Las fibras metálicas se usan en pavimentos de aeropuertos, revestimiento de las pistas, tableros de puentes, pisos industriales, pavimentos de autopistas, concreto prefabricado, tanques sépticos, concreto lanzado en taludes, revestimiento de túneles y otros.

Una de las razones por las que son muy utilizadas estas fibras es porque no afectan a ninguno de los otros componentes del material compuesto. Al igual que las fibras macrosintéticas de polipropileno vienen unidas en manojos de fibras con pegamento soluble en agua haciendo que las fibras se distribuyan de mejor forma en el concreto.

Figura 2. **Fibra de metal**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

El módulo de elasticidad de estas fibras es relativamente alto, si se compara con la del concreto que es aproximadamente de 30 000 MPa. Tienen una densidad específica que las hace bastante pesadas con relación a otras fibras, como las macrosintéticas. Las propiedades de estos dos tipos de fibras se muestran en la tabla I.

Tabla I. **Propiedades de tipos de fibras seleccionadas**

Tipo de fibra	Densidad específica, kg/m³	Resistencia a la tracción, MPa	Módulo de elasticidad, MPa
Acero	7 800	500 - 2 500	210 000
Polipropileno	900	300 – 700	5 000 - 8 000

Fuente: elaboración propia.

2.3. Materiales compuestos reforzados con fibras

La tenacidad del material depende principalmente de la concentración, resistencia, relación de forma y armonía entre las fibras y la matriz de cemento.

2.3.1. Longitud y diámetro

De la correlación entre longitud (L) y el diámetro (D) se obtiene la relación de aspecto, cuando esta relación es grande la resistencia de la fibra tiende a aumentar. Se debe tener una fibra con un diámetro que sea lo más pequeño posible en relación a su longitud, ya que se disminuye su área superficial que es en donde se rompen. Se debe tener en cuenta que esta relación debe cumplirse tanto en fibras largas como en fibras cortas.

$$\lambda=L/D$$

La longitud es la distancia entre las dos extremidades de la fibra. La fibra puede ser rectilínea o perfilada, depende de su forma, la fibra puede tener sección circular, rectangular o variada. Es mejor usar fibras largas porque los extremos de la fibra son los que aguantan menos carga que el resto, entonces menos extremos mayor capacidad de carga de las fibras.

2.3.2. Orientación de la fibra

Las fibras se introducen y se distribuyen aleatoriamente en la matriz cementicia. La orientación aleatoria de las fibras puede ser unidireccional, bidimensional o tridimensional. Cuando las fibras son cortas con orientación aleatoria se introducen fácilmente en la fase continua dando como resultado un material con propiedades homogéneas (isotrópico). Cuando las fibras son largas y se ordenan unidireccionalmente produce un material con propiedades

anisotrópicas el cual tiene una buena rigidez y resistencia paralela a la fibra. Es decir que la resistencia es inversamente proporcional al ángulo que forman las fibras y la tensión aplicada.

La orientación aleatoria de la fibra depende del método de fabricación del concreto fibroreforzado. El método rociado favorece una orientación bidimensional y cuando se produce con mezcladoras forma una orientación tridimensional.

2.3.3. Cantidad de fibra

Mientras más volumen de fibra, más resistencia y rigidez tendrá el compuesto. No obstante hay un máximo de cantidad de fibra que se puede usar. Este límite depende y varía con cada tipo de fibra, porque la parte reforzante ya no quedaría totalmente embebida en la matriz y puede provocar cambios desfavorables al concreto.

2.3.4. Unión y rotura

Las fibras son las que transmiten y distribuyen las cargas a la fase continua, para que esto suceda de forma adecuada las fibras deben de estar unidas fuertemente a la matriz. Muchas fibras atraviesan las fisuras con poco ángulo y otras más tienen una longitud de anclaje menor que la necesaria lo que hace que no actúen como cuña y esto afecta la cohesión fibra-matriz. Si se tiene una unión débil las fibras se salen de la matriz cuando está bajo carga, esto le reduce la resistencia y se puede romper con más facilidad. Es importante mencionar que la adherencia entre fibra y matriz es mecánica y no fisicoquímica.

3. PAVIMENTOS

3.1. Generalidades

El pavimento es una estructura formada por capas de distintos materiales que descansa sobre un terreno natural. Las capas de la estructura son: subrasante, subbase, base y capa de rodadura; las cuales deben proporcionar una superficie funcional y durable. El principal objetivo del pavimento es resistir y distribuir uniformemente las cargas de las ruedas de los vehículos hacia el suelo que lo sustenta. Además de protegerlo de la intemperie para evitar una deformación excesiva.

Según el terreno de fundación, materiales, intensidad del tránsito, entre otros aspectos, se puede prescindir de una o más capas del pavimento. Pero siempre cumplir con una superficie de rodadura suave, uniforme e impermeable para la transitividad segura y cómoda de los vehículos.

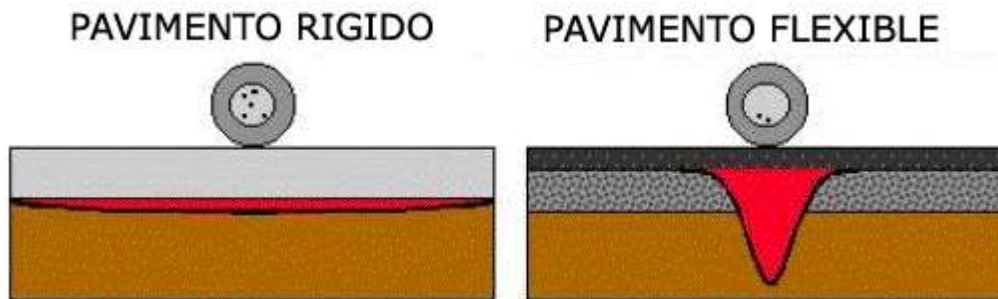
Los pavimentos se clasifican en:

- Pavimento rígido: carpeta de rodadura constituida por losas de concreto simple o reforzado. La característica principal de este pavimento es que la mayor capacidad estructural es proporcionada por el concreto, haciendo que el principal factor de diseño sea la resistencia a la flexión del mismo.
- Pavimento flexible: carpeta de rodadura asfáltica la cual tiene poca rigidez y distribuye la carga a través de las capas medias por todo el

grosor del pavimento, lo que ocasiona que la subrasante soporte mayores cargas.

- Pavimento semiflexibles: su capa de rodadura son los adoquines de concreto que se colocan sobre una capa de arena, pueden tener subbase y base y entre las juntas se pone un sello de arena. Su nombre se debe porque a pesar que el adoquín es de concreto, cuando recibe la carga la distribuye por todo su espesor y la transmite a la base que lo soporta en donde se distribuye de partícula a partícula como en el pavimento flexible.

Figura 3. **Comportamiento de pavimentos**



Fuente: AASHTO. *Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos*.
www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf. Consulta: 19 de octubre de 2015.

3.2. Estructura

Las partes que conforman la estructura del pavimento se mencionan a continuación:

3.2.1. Subrasante

Capa del terreno que sirve como cimiento del pavimento, se extiende hasta una profundidad donde no sea afectada por la carga de diseño de tránsito. Esta capa compactada y preparada brinda estabilidad a la estructura.

El valor soporte de la subrasante es un factor considerable para saber el espesor de la capa de rodadura del pavimento. Debe cumplir con buena resistencia y adecuado comportamiento.

3.2.1.1. Factores determinantes en el comportamiento

La granulometría, plasticidad, valor soporte, susceptibilidad a la variación de temperatura, cambio volumétrico por humedad del suelo pueden afectar a la subrasante al sostener el pavimento.

3.2.1.2. Problemas frecuentes

Las características físicas y propiedades mecánicas del material que compone al suelo de cimentación definen los problemas que se pueden presentar. Estas se determinan por ensayos normados en la ASTM y AASHTO y con base en esto saber la calidad de la subrasante.

3.2.1.2.1. Causas y efectos

Comúnmente la subrasante está compuesta por material grueso y fino, los cuales tienen diferentes resistencias y deformaciones. El material fino debe estar dentro de los límites aceptados. Con el suelo grueso, en el pavimento se tiene más resistencia, mejor estabilidad ante la presencia de agua y mínima deformación.

Tabla II. **Causa-efecto de los problemas frecuentes en la subrasante**

Causa	Efecto
Suelo con alto contenido de materia orgánica.	Subrasante de muy mala calidad.
Suelo con mucho material suelto sin cohesión.	Capacidad soporte muy baja.
Suelo fino propenso a saturarse, como el limo y la arcilla.	Poca estabilidad por variaciones volumétricas, grietas.
Falta de homogeneización, mezclado y compactado del suelo.	Apoyo desigual e inestable.

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.2.2. Tratamiento y estabilización

Los suelos recomendados para la subrasante son los granulares que cumplen con porcentajes de hinchamiento según AASHTO T-193, que no sean suelos clasificados en el grupo A8 de AASHTO M-145 y que tenga características iguales o mejores al que tiene el suelo del tramo.

Se extrae una muestra del suelo y se le hace pruebas de granulometría si es grueso y límites de Atterberg si es fino. Para conocer la relación de densidad y humedad se procede con el ensayo Próctor estándar AASHTO T-99 o modificado AASHTO T-180. La capacidad soporte del suelo se obtiene a través de ensayos de placa ASTM D-1195, pero esta prueba resulta costosa y requiere mucho tiempo, entonces se usa el ensayo de CBR que es más simple.

Si el suelo no cumple con los requerimientos mínimos, según los ensayos y normas utilizadas, se debe de estabilizar. Las técnicas de estabilización mejoran las propiedades de los suelos y se tienen las siguientes ventajas:

- Mejora de materiales para usarlos de subrasante
- Aumento de durabilidad, trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia
- Estabilización volumétrica
- Mejor capacidad de carga y compresibilidad
- Buen drenaje para evitar daños por el agua
- Menor impacto ambiental

3.2.1.2.2.1. Estabilización física

La granulometría es la técnica más fácil y útil en este tipo de estabilización. Consiste en una mezcla bien graduada de grava, arena, limo y arcilla que compactada alcanzará su máxima densidad. Existen otras formas de estabilización física:

- Confinamiento, para suelos friccionantes
- Consolidación previa, para suelos arcillosos
- Vibroflotación

3.2.1.2.2.2. Estabilización química

La adición de sustancias o materiales para hacer un cambio en la composición del suelo y darle mejores propiedades a la subrasante se ha implementado desde tiempo atrás en la construcción de pavimentos, se hace solo cuando es viable. Estos cambios químicos mejoran:

- La impermeabilización de las partículas del suelo para darles cohesión
- La unión entre partículas, las hace más resistentes a cargas y al agua
- La adherencia entre arcillas modificando su plasticidad

Los materiales más usados para estabilizar químicamente un suelo son:

- Cal
- Cemento
- Cenizas volátiles
- Otros: enzimas, polímeros, sales, cloruros, sulfuros, silicato de sodio y otros.

Los materiales deben cumplir los requerimientos según las Normas pertinentes de ASTM, AASHTO y Coguanor indicadas en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

Los geosintéticos son otro tipo de estabilizadores de subrasante, se fabrican con polímeros y pueden ser geotextiles, geomallas y geomembranas. Por el material con que están hechos y por sus propiedades mecánicas se consideran estabilizadores fisicoquímicos. Son usados para drenar, separar, reforzar y proteger suelos diferentes sin que se mezclen.

3.2.1.2.2.3. Estabilización mecánica

La compactación es el método de estabilización mecánica más utilizado y eficiente en la construcción. Es el proceso por el cual se busca tener un suelo estructurado con buen comportamiento durante la vida útil del pavimento.

3.2.2. Subbase y base

La subbase es la capa de la estructura del pavimento que soporta, transmite y distribuye uniformemente las cargas del tránsito al suelo de fundación. Está debajo de la capa base, su espesor depende de la calidad de la subrasante y varía entre 10 y 70 cm. El valor soporte debe ser mayor al del suelo de fundación. Se prefiere el uso de materiales granulares en su conformación para que sirva de drenaje del pavimento y evitar que la subrasante tenga cambios en su volumen.

En el pavimento rígido la subbase se usa solo si la subrasante es de muy mala calidad y las cargas son muy grandes, bastaría con hacerla de 15

centímetros de espesor. En esta clase de pavimento su principal función es evitar efectos de bombeo en los suelos de grano fino e impedir el ascenso capilar del agua a capas superiores.

La base es la encargada de transmitir y distribuir las cargas del tránsito a las capas inferiores del pavimento, brindando al pavimento capacidad estructural, protección al congelamiento y prevención de bombeo. Esta capa puede ser construida de materiales granulares que contengan piedra, grava, grava triturada, arena y estabilizantes. El objetivo es darle una superficie uniforme a la carpeta de rodadura.

3.2.2.1. Tipos según material

- Subbase y base granular: formadas por la combinación de piedra o grava con arena y suelo en su estado natural, pueden ser materiales clasificados o tener una trituración parcial, se debe conocer la proporción de agregado fino y grueso porque esto afecta las propiedades, características y comportamiento del material.
- Subbase y base triturada: contienen la combinación de piedra o grava triturada de buena calidad con material de relleno.

Los materiales tienen que estar bien graduados y cumplir con los requerimientos mínimos del código de AASHTO.

3.2.2.2. Problemas, causas y efectos

Si la subbase y base no cumplen los requerimientos mínimos se procede a estabilizarlas para que la estructura satisfaga las expectativas mecánicas y funcionales del pavimento en su tiempo de vida útil con el que fue diseñado.

Los problemas y sus efectos se notan en la estabilidad volumétrica, soporte, compactación, cohesión, resistencia e impermeabilidad. Se deben a que se usa un material mal graduado que no cumple con las Normas requeridas por ASTM y AASHTO.

La principal causa es el agregado fino que se pasa del porcentaje permitido. En el pavimento rígido cualquier matriz de suelo grueso usada en estas capas deben de tener un contenido de finos que no exceda el 10 % ya que se toma en cuenta que aproximadamente un 5 % de partículas finas son incorporadas por el mismo material grueso. El material fino arcilloso es el que más afecta por su baja cohesión cuando se compacta y su capacidad de retener agua que causa cambios volumétricos.

3.2.2.3. Estabilización

La estabilización mecánica, como la compactación, es la que se usa en la base y subbase. Hace que las capas resistan la humedad y sean estables para la distribución de las cargas. La compactación tiene que ser por lo menos del 95 % para tener una capa con buenas propiedades y valor soporte.

Si las capas aún compactadas son de mala calidad, se agregan materiales que mejoran sus propiedades mecánicas. Estas se muestran en la tabla III.

Tabla III. **Materiales usados en la estabilización de subbases y bases**

Material estabilizante	Descripción
Cal	Se usa en suelos con mucho limo o arcilla.
Cemento	Para suelos plásticos de rocas, gravas y arenas. No se recomienda usar en suelos mal graduados con mucho limo o arcilla por el agrietamiento.
Material bituminoso	Son materiales granulares pétreos recubiertos con bitumen, la base estabilizada se le conoce como base negra.
Resinas sintéticas	Se utilizan mayormente en la estabilización de la base.

Fuente: elaboración propia.

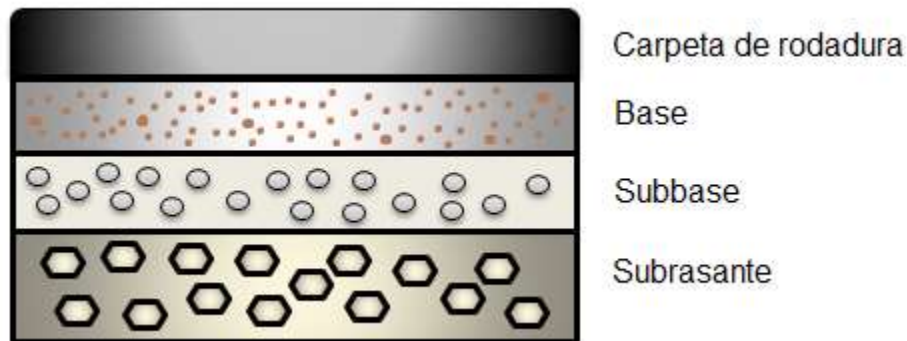
3.2.3. Carpeta de rodadura

Es la que recibe directamente las cargas del tránsito, las distribuye a las capas subyacentes y las protege de la intemperie y otros factores externos que puedan afectar su funcionalidad.

Las losas de concreto del pavimento rígido se colocan encima de la capa base. Estas forman una superficie resistente.

En la figura 4 se observa la capa de rodadura con las capas que puede llevar una estructura de pavimento terminada. En el pavimento rígido se puede obviar la capa base o subbase, dependiendo de la calidad de la subrasante.

Figura 4. **Estructura del pavimento**



Fuente: elaboración propia.

3.2.3.1. **Uso en pavimento rígido**

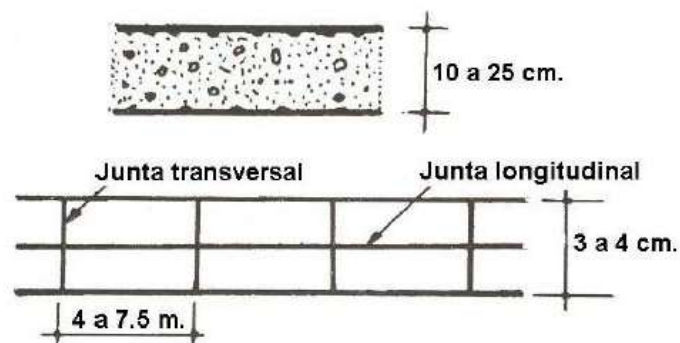
El concreto además de tener buena resistencia a la flexión y a la fatiga. También tiene rigidez y un alto módulo de elasticidad que permiten absorber la carga recibida y repartirla en un área grande de la superficie. Aún en las condiciones más adversas, las losas deben ser capaces de delegar solo esfuerzos reducidos al suelo de fundación.

En la carpeta de concreto se hacen juntas para prevenir grietas por deformaciones excesivas. Este pavimento se caracteriza por prestar servicio por largo tiempo y demandar poco mantenimiento, hay varios tipos:

- Pavimento de concreto simple: en este pavimento el hormigón es el que resiste todas las tensiones causadas por las cargas de tránsito y variaciones de temperatura. Puede ser:

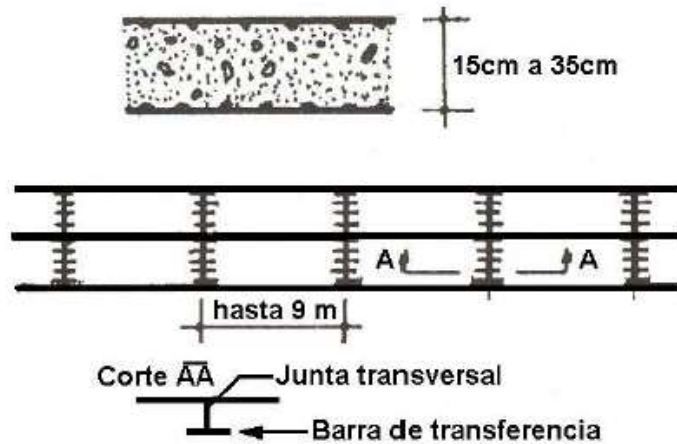
- Con pasadores: tiene elementos de transferencia de carga, son barras de acero puestas transversalmente en la junta de contracción para compartir la carga con la losa contigua, evitando escalonamiento entre las mismas.
- Sin pasadores: no tiene elementos de transferencia de carga, son los más comunes en Guatemala. Las juntas no deben estar separadas más de 4,50 m, cuando se usa cemento Portland, ya que debajo de estas los agregados se traban para evitar el quiebre de la losa agrietada.

Figura 5. **Pavimentos de concreto simple**



(a) Pavimento sin pasadores

Continuación de la figura 5.

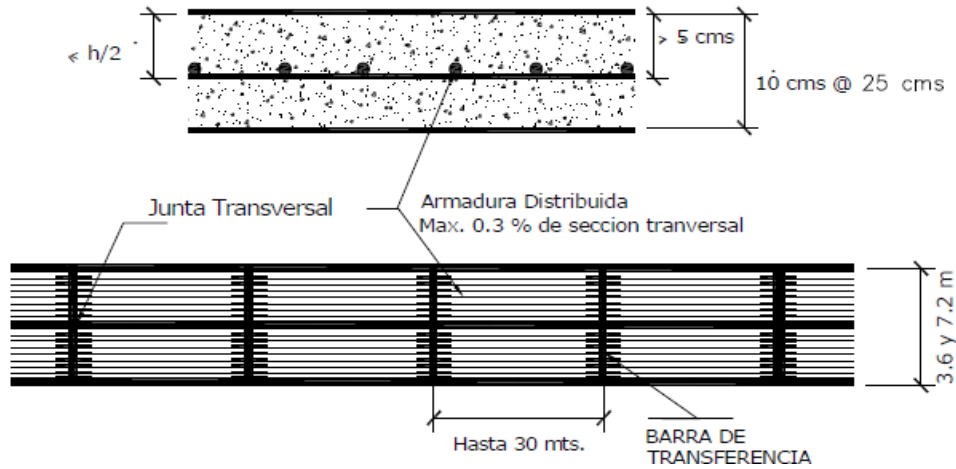


(b) Pavimento con pasadores

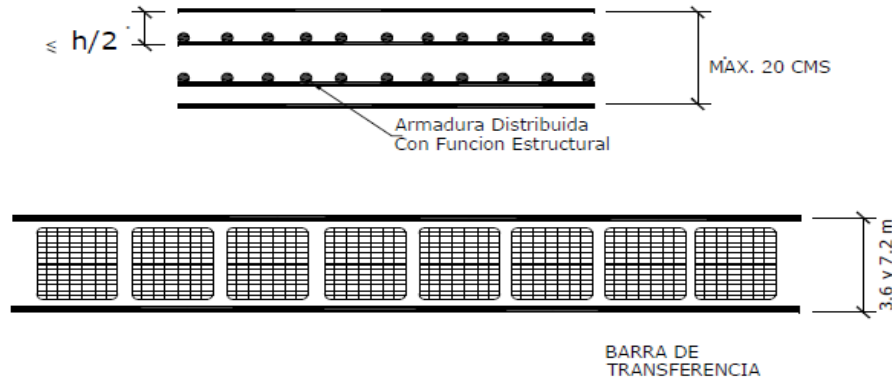
Fuente: AASHTO. *Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos*.
www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf. Consulta: 19 de octubre de 2015.

- Pavimento de concreto con refuerzo de acero: el acero puede o no cumplir con una función estructural. Existen pavimentos que solo usen acero para el control de contracciones y grietas en los primeros años de servicio del concreto, hay otros con acero estructural que absorbe los esfuerzos de tensión y compresión de la losa. El objetivo en cualquier caso es que el pavimento se comporte como una unidad capaz de transmitir cargas y mantener unidas las grietas.

Figura 6. Pavimentos con refuerzo de acero



(a) Pavimento con refuerzo de acero no estructural

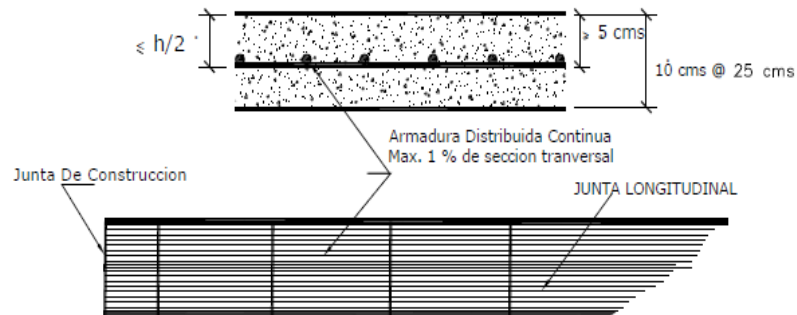


(b) Pavimento con refuerzo de acero estructural

Fuente: ROMÁN AVILA, Luis Rolando. Tesis *Método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico*. p. 9-10.

- Pavimento de concreto con refuerzo continuo: no tiene juntas de contracción porque el refuerzo asume todas las deformaciones, solo lleva juntas de construcción. El acero longitudinal es la armadura continua que va a lo largo del pavimento, el refuerzo transversal puede ser innecesario.

Figura 7. **Pavimento con refuerzo continuo**

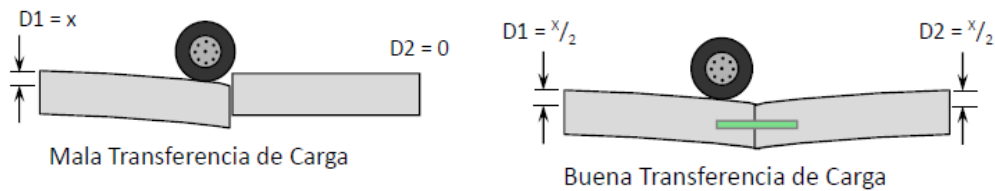


Fuente: AASHTO. *Método AASHTO 93 método diseño pavimentos rígidos.*

www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf. Consulta: 19 de octubre de 2015.

- Pavimento de concreto pre o postensado: no es muy utilizado en la construcción de pavimentos. Se ha desarrollado muy poco durante los últimos años. Su alto costo pretende justificar la reducción de espesor que ofrece.
- Pavimento de concreto reforzado con fibras: estructuralmente bueno y con adecuado comportamiento mecánico, aunque el costo inicial y cuidado durante su ejecución dificultan su construcción y pueden ser factores determinantes en su uso para infraestructura vial.

Figura 8. **Transferencia de carga entre losas del pavimento**



Fuente: CALO, Diego. *Diseño de pavimentos rígidos*.

www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf. Consulta: 21 de octubre de 2015.

3.2.3.1.1. **Concreto y sus generalidades**

El concreto es una mezcla dosificada de cemento, agua, agregados inertes y puede ser con o sin aditivos. El cemento es Portland debe cumplir con los estándares mínimos de calidad requeridos.

El agua potable es la recomendada a usar porque garantiza que esté libre de aceites, ácidos y otros agentes nocivos para el concreto.

Los agregados pueden proceder de depósitos naturales o ser producidos por trituración de canteras. Deben lavarse, tamizarse y mezclarse para tener una calidad uniforme. Se clasifican en finos y gruesos, dependiendo de tamaño, el fino pasa el tamiz núm. 4 y el grueso queda retenido en el tamiz de 4,76 mm y pasa por tamiz de 6". La función principal de los agregados es proveer un llenado relativamente barato para el material cementante con la calidad de resistir cargas, desgaste y humedad controlando los cambios volumétricos que el concreto experimenta en el endurecimiento. Todos los agregados deben cumplir con normas de calidad regidas por ASTM.

La resistencia del concreto endurecido depende de la pasta cementante. Por eso es importante tomar en cuenta a que menor relación agua/cemento mayor resistencia y mejor calidad del concreto.

Para los concretos reforzados con fibras regularmente se emplean aditivos fluidificantes, porque la presencia de fibras en altas dosificaciones provoca al concreto poca docilidad. Para no agregarle más agua a la mezcla y mantener la relación agua/cemento que da la resistencia adecuada, se añaden estos aditivos.

Figura 9. **Mezcla de concreto**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

3.2.3.1.2. Gradiente térmico

Los cambios de temperatura pueden generar un alabeo por gradiente térmico en el concreto. A temprana edad se da una contracción por el fraguado y ya endurecido el concreto sufre de expansión y contracción durante el día.

El proceso de endurecimiento del concreto se da por reacciones químicas entre el agua y el cemento que liberan grandes cantidades de calor. Pero una parte de este calor es conservado dentro del compuesto, haciéndolo que aumente su temperatura y se expanda.

El concreto se contrae a medida que se va enfriando a la temperatura de su entorno, a esto se le llama retracción térmica. También existe la retracción por secado, asociada con la pérdida de humedad. Las dos pueden causar agrietamiento al concreto.

La deformación asociada con el cambio de temperatura dependerá del coeficiente de expansión térmica del material y de la magnitud del descenso o ascenso de la temperatura. El coeficiente de expansión térmica es definido como el cambio en unidad de longitud por un grado de cambio de temperatura.

Por eso es importante seleccionar un agregado con bajo coeficiente de expansión térmica, puede llegar a ser un factor crítico en la prevención de grietas.

Figura 10. **Deformación del concreto por cambios de temperatura y humedad**



Fuente: CALO, Diego. *Diseño de pavimentos rígidos*. es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido. Consulta: 21 de octubre de 2015.

3.2.3.1.3. Durabilidad

Capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. El concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga al medio ambiente, durante una larga vida de servicio. Un material alcanza el final de su vida de servicio, cuando sus propiedades por condiciones de uso se han deteriorado a tal punto que continuar usando el material se considera inseguro o antieconómico.

El agua es el centro de la mayoría de los problemas de la durabilidad del concreto, causa muchos tipos de procesos de degradación física y por ser un vehículo de transporte de iones agresivos también es una fuente de procesos

de degradación química. Estos fenómenos fisicoquímicos ocasionados por el agua son controlados por la permeabilidad del concreto.

La permeabilidad se define como la propiedad que rige la velocidad de flujo de un fluido en un sólido poroso. El concreto tiene muchas microgrietas por eso es importante controlar la impermeabilidad de la pasta de cemento durante su hidratación porque el tamaño y continuidad de los poros en la pasta determinarán la permeabilidad del mismo.

La permeabilidad de los agregados es menor a la de la pasta de cemento. Sin embargo el concreto por ser un material compuesto tiene mejor permeabilidad que solo la pasta cementante.

Además del agua, el deterioro por causas químicas se debe al ataque de sulfatos y corrosión de acero dentro del concreto.

El deterioro por desgaste de la superficie se debe a la abrasión, erosión y cavitación. La abrasión es un desgaste en seco, como lo que pasa en los pavimentos. La erosión es el desgaste por la acción abrasiva de fluidos que contienen partículas sólidas en suspensión. La cavitación es la pérdida de masa por la formación de burbujas de vapor y su colapso posterior. Esto debido a un cambio repentino de la dirección en el agua que fluye rápidamente.

3.2.3.1.4. Ensayo a flexión

Sirve para determinar el esfuerzo de flexión del concreto. El método de ensayo más usado es el de la viga simplemente apoyada en la que se aplican cargas en los tercios de la luz, basado en la Norma ASTM C-78. El ensayo a flexión en los tercios es más recomendado que el de punto medio, porque en el tercio medio estará la zona sometida a un momento flector constante y en esa área se dará la falla, en cambio en el de punto medio se sabe que el momento flector es máximo a la mitad y es en donde se producirá la rotura del concreto.

Las vigas deben estar bien curadas y húmedas al momento del ensayo para que los resultados sean los esperados. La resistencia a la flexión se expresa como módulo de rotura.

Existen otros métodos de ensayo a flexión del concreto, normas no tan empleadas pero que también son efectivas. Por ejemplo la Norma europea EN 14488-5:2006.

3.2.3.1.5. Módulo de rotura

Valor obtenido de la determinación de la resistencia a la tensión del concreto por flexión, este valor se usa en el método PCA para diseño de pavimentos rígidos. La deformación causada por las repetidas cargas que se dan en el pavimento de concreto le produce esfuerzos de tensión y compresión a las losas que lo conforman. Generalmente se usa para el diseño un módulo de rotura de 600 lb/pulg² a 28 días de curado, basado en los códigos AASHTO y ASTM C-78.

3.3. Calidad y durabilidad

La calidad del pavimento rígido depende del buen diseño que se haga del mismo usando nomogramas de diseño como técnica práctica y racional, así como el uso del método PCA o AASHTO para el diseño del espesor. Se debe tomar en cuenta varias condiciones, como la transferencia de carga, el uso de sub bases estabilizadas, fatiga, erosión, los ejes y cargas que soportará. Para tener una buena calidad del pavimento no basta con el diseño, también se considera el proceso de su construcción. Por eso se debe de cumplir el plan de gestión y control de calidad por parte del contratista.

La durabilidad del pavimento rígido depende de su calidad, volumen de tránsito, clima, diseño vial, posición de la estructura y mantenimiento, para cumplir con el período de diseño.

3.4. Mantenimiento

Las reparaciones pueden ser de profundidad parcial o total, en el mantenimiento que requieren los pavimentos rígidos. Generalmente se deben a:

- Deficiente compactación del terreno de fundación
- Alguna falla en la instalación de las juntas
- Durabilidad del agregado, fractura de los áridos

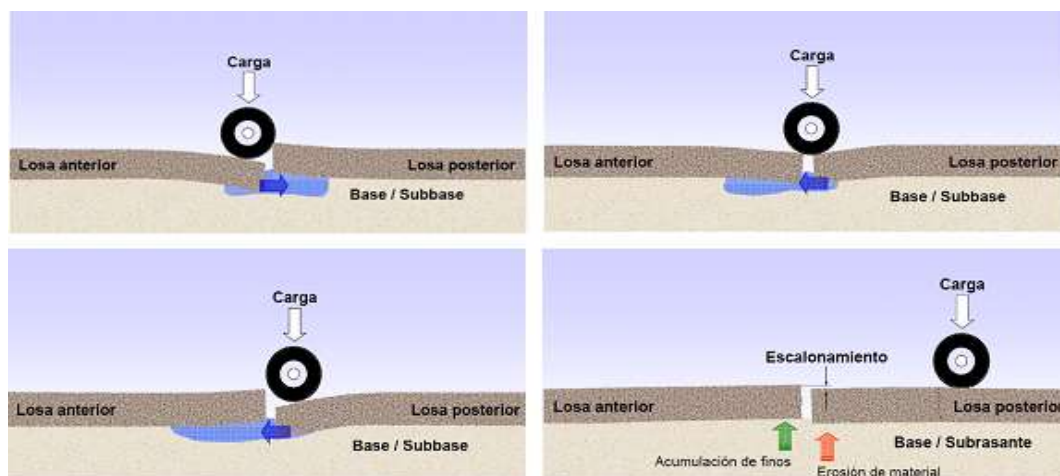
Los siguientes casos requieren procedimientos de reparación localizados y de profundidad parcial:

- Descascaramientos en las juntas, los cuales aparecen a lo largo de estas y en las discontinuidades transversales. que produce una superficie áspera y acelera el deterioro del pavimento.
- Penetración de material incompresible dentro de las juntas.

Las reparaciones de profundidad total se hacen con el objetivo de restaurar estructuralmente las losas de pavimento, eliminando las grietas y componiendo las juntas deterioradas causadas por la repetición de cargas pesadas, esfuerzos térmicos y pérdida de soporte. Se deben hacer cuando se presenten:

- Tensiones de compresión excesiva generadas por la presencia de partículas incompresibles en las juntas.
- Pérdida de transferencia de carga debido al exceso bombeo.

Figura 11. **Escalonamiento por bombeo y erosión**



Fuente: CALO, Diego. *Diseño de pavimentos rígidos*.

www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf. Consulta: 21 de octubre de 2015.

3.5. Juntas

Se diseñan para controlar la fisuración y agrietamiento transversal y longitudinal del concreto durante su vida útil. Las juntas permiten el movimiento y alabeo de las losas. También facilitan la transferencia de cargas entre las losas adyacentes minimizando deflexiones verticales en la junta producidas por las cargas de vehículos, al minimizar deflexiones se disminuye el bombeo de la subbase evitando el escalonamiento.

El diseño de las juntas debe considerar el clima, las características de los materiales, los tipos de subbase, el espesor de la losa y el tránsito. Existen varios tipos de juntas. Entre ellas, las más comunes son:

- Juntas transversales de construcción: también llamadas juntas principales y son juntas construidas al final de la jornada de trabajo o esperando un lapso de 60 a 90 minutos dependiendo el clima, el tiempo se mide desde la elaboración del concreto hasta su puesta en obra. La forma común de para finalizar es rematando la obra contra una formaleta de madera que genera una cara lisa. Por ello, es necesario dotar esta junta de pasadores de carga.
- Juntas transversales de expansión: permiten el movimiento de las losas sin afectar pavimentos adyacentes, intersección de calles, drenajes, puentes y otras estructuras fijas. Existen dos tipos de estas juntas, con elementos y sin transferencia de cargas.
- Juntas transversales de contracción: son juntas construidas transversalmente al eje central de la vía y son espaciadas. Sirven para controlar la fisuración transversal de la losa.

- Juntas longitudinales: son las juntas que van paralelas al eje central de la vía y controlan la fisuración, en algunos casos delimitan las líneas de tránsito. Es conveniente hacer el corte rápido si existen subbases estabilizadas o si hay cambios de temperatura bruscos.

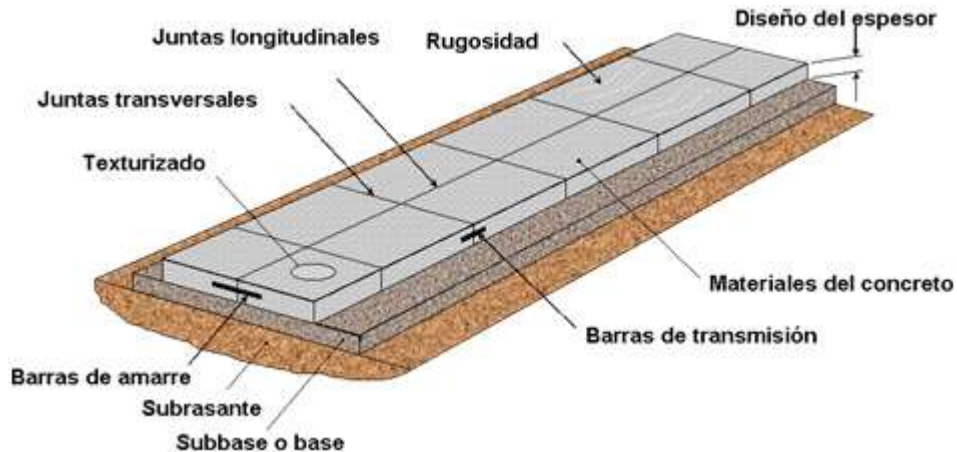
Los selladores de juntas se usan para minimizar la filtración de agua superficial dentro de las juntas y capas subyacentes. También para evitar la entrada de materiales incompresibles dentro de las juntas que puedan causar daños mayores. Para sellar las juntas, deben seguirse las especificaciones y los materiales de relleno y selladores para juntas deben ajustarse a las Normas AASHTO.

Figura 12. **Juntas en proceso de construcción**



Fuente: SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. *Construcción de pavimentos rígidos y de adoquines*.
copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%2016.pdf. Consulta: 24 de
octubre de 2015.

Figura 13. **Elementos del pavimento rígido**



Fuente: BECERRA SALAS, Mario Rafael, *Pavimentos de Concreto*.

es.slideshare.net/duravia/exposicion-mario-becerra-web. Consulta: 24 de octubre de 2015.

3.6. **Uso en parqueos**

El parqueo es el área designada para estacionar, almacenar o guardar vehículos. El diseño y desarrollo de parqueos requiere una planificación, orden y cálculo correcto porque el resultado debe ser seguro, efectivo y funcional. Se deben considerar la distribución de los espacios de estacionamiento, las dimensiones de los mismos y sobre todo las características de los vehículos, para el diseño y construcción de la losa de rodadura del parqueo.

3.6.1. **Clasificación de parqueos según tráfico del área urbana**

El tránsito puede ser liviano o pesado. Por ello se clasifican los parqueos de esta forma.

3.6.1.1. Tránsito liviano

Los vehículos livianos son aquellos de menos de 5 toneladas de capacidad, entre estos están los automóviles, *pick ups*, camionetas tipo *van*, camperos y microbuses. Clasificados como vehículos tipo A y estos son los que interesan para el diseño del pavimento de un parqueo de tránsito liviano.

3.6.1.1.1. Eje y cargas

Están compuestos por dos ejes que se analizan como ejes simples. Haciendo una carga equivalente de referencia sobre un eje estándar. Es importante conocer otras variables como el TPDA que son necesarias para obtener este valor de carga.

Tabla IV. Valores de carga equivalente de referencia

Tipo de eje	Carga equivalente de referencia
Eje simple de llanta simple	6,6 toneladas
Eje simple de llanta doble	8,2 toneladas
Eje tándem de llanta doble	15 toneladas
Eje tridem de llanta doble	23 toneladas

Fuente: elaboración propia.

En el método de diseño de AASHTO se requiere la transformación a ejes simples equivalentes de 8 toneladas o 18 000 lbs los ejes de diferentes pesos que circularán por el pavimento durante su periodo de diseño. Y usar los valores obtenidos en la ecuación empírica que este método utiliza.

3.6.1.2. Tránsito pesado

Se refiere a los vehículos tipo B y C, los cuales son buses y camiones respectivamente, son vehículos pesados por su capacidad de más de 5 toneladas.

3.6.1.2.1. Eje y cargas

Estos vehículos pesados pueden tener dos o más ejes con seis o más llantas en total. Para cada tipo de eje se utiliza una carga equivalente de referencia, como se muestra en la tabla IV.

Este trabajo se centra en el análisis de las losas de concreto para pavimento rígido en parqueo de vehículos livianos. La información de los ejes y las cargas que se muestran son referencia de los métodos de diseño de pavimentos.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Procedimiento para la elaboración de losas y vigas

A continuación se muestran los materiales y equipo utilizados para hacer y ensayar los elementos estructurales.

4.1.1. Materiales utilizados

- Cemento CFB: es un cemento Portland con adición de puzolana natural fabricado por Cementos Progreso, cumple con los requisitos de las normas para cementos hidráulicos ASTM C-1157 y Coguanor NGO 41095. Este cemento para fabricantes de *blocks* pertenece a una categoría de alta resistencia inicial, ya que a los 3 días tiene una resistencia de 3 460 psi (24 N/mm²). Esto significa que este valor es la resistencia mínima a compresión en morteros de cemento-arena normalizada por ASTM C-109, expresada en libras por pulgadas cuadradas o en su equivalente del SI (Newton por milímetros cuadrados).

La resistencia mínima del cemento CFB a los 28 días es de 5 000 psi. Es muy usado en la fabricación de bloques de concreto, adoquines, prefabricados de concreto y en estructuras que exigen mayores resistencias mecánicas.

Figura 14. **Cemento CFB**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

- Agregado grueso: material pétreo inerte que proviene de las rocas, se obtiene de un proceso de fragmentación natural o mediante un proceso físico mecánico. En ambos casos el agregado conserva las propiedades físicas y composición mineralógica de la roca madre.

El agregado grueso es la materia prima para fabricar el concreto, se debe usar la mayor cantidad posible y del tamaño adecuado teniendo en cuenta los requisitos de trabajabilidad, colocación y resistencia. En el pavimento un buen agregado grueso debe proveer agarre para que no se destrabe y mantener sujeta la estructura.

En la tabla V se muestra los tamaños de los agregados utilizados según ASTM y el porcentaje teórico de agregado que pasa cada tamiz.

Tabla V. **Tamaño máximo nominal del agregado grueso**

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Malla (mm)	Rango teórico (%)
3/4"	19,0	50–80
3/8"	9,5	10–40

Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron dos tamaños de agregados gruesos triturados. Esto con el objetivo de minimizar los vacíos en el concreto y reducir el volumen de la pasta de cemento. La figura 15 (a) muestra el agregado de 3/8" y la 15 (b) el de 3/4".

Figura 15. **Agregado grueso utilizado**



(a)



(b)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

- Agregado fino: o arena se usa como relleno. Además actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto. La falta de agregado fino se nota en la aspereza de la mezcla y cuando hay un exceso de la misma. La mezcla se vuelve más cohesiva demandando más cantidad de agua.

En la tabla VI se muestra que el agregado fino tiene un tamaño que varía aproximadamente de 0 a 4 mm, según ASTM.

Tabla VI. **Tamaño del agregado fino**

Tamiz	
Nombre	Malla
núm. 4	4,75 mm
núm. 8	2,36 mm
núm. 16	1,18 mm
núm. 30	600 μ m
núm. 50	300 μ m
núm. 100	150 μ m

Fuente: elaboración propia.

Al igual que el agregado grueso, el agregado fino debe estar bien gradado para llenar los espacios y producir mezcla más compacta. El agregado fino que se usa en el concreto de las losas y vigas es arena triturada caliza.

Figura 16. **Arena triturada**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Los agregados gruesos y finos son de la planta de trituración de Agregados de Centro América (Agreca), ubicada en finca La Pedrera, zona 6, ciudad de Guatemala. Otros bancos de materiales en el área metropolitana son: La Roca en la zona 18 y Agreca Amatitlán.

- Aditivo reductor de agua: su función es disminuir el contenido de agua en la mezcla, permitiendo una reducción en la relación agua/cemento mientras se conserva la trabajabilidad. El concreto que contiene esta clase de aditivo muestra baja segregación y buena plasticidad.

El aditivo reductor de agua utilizado para el concreto en este trabajo de graduación es Sika ViscoCrete 2 100. Con las características siguientes: aditivo líquido, reductor de agua de alto rango y super plastificante que no contiene cloruros ni sustancias corrosivas. Cumple con los requerimientos de la Norma ASTM C-494 tipos A y F.

Figura 17. **Aditivo reductor de agua de alto rango**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Los valores de dosificación para este aditivo son: cantidades pequeñas para obtener una reducción de agua de 10 % al 15 % y dosis altas para tener hasta un 45 % de reducción de agua.

Por ser plastificante brinda al concreto alto asentamiento, manejabilidad y cohesión de la matriz de cemento evitando excesiva exudación y segregación. Es adecuado para todos los niveles de reducción de agua y las dosis pueden variar dependiendo de los materiales usados, las condiciones ambientales y los requerimientos específicos del proyecto. Sin embargo, en la tabla VII se puede observar la dosis recomendada y demás información del aditivo.

Tabla VII. **Información técnica de aditivo**

Norma	ASTM C-494 Tipos A y F
Presentación	Toneles de 230 kilos
Apariencia	Azul claro translúcido
Densidad	1,08 kg/l \pm 0,02 kg/l
Dosis recomendada	65-390 ml / 100 kg
Dosis alta	325-780 ml / 100 kg
Almacenamiento	10 °C a 27 °C

Fuente: elaboración propia, basado en hoja técnica de Sika.

Para obtener mejores resultados, agregar el aditivo directamente sobre el concreto durante el mezclado al final del ciclo de mezclado.

Figura 18. **Integración de aditivo a la mezcla**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

- Fibra macrosintética Sika Fiber Force PP/PE-700/55: es una fibra macrosintética de alta densidad diseñada y usada para el refuerzo secundario de concreto, fabricada de polipropileno virgen y polímeros de alto desempeño. Por su forma, permite un área de contacto de mayor superficie dentro del concreto, dándole mayor unión interfacial, mejor anclaje en el concreto y resistencia de flexión.

Tabla VIII. **Información fibra polipropileno Sika Fiber Force PP/PE-700/55**

Aspecto y forma	Fibra monofilamento deformada mecánicamente de cuerpo circular y ondulaciones en toda su longitud
Color	Negro
Largo	55 mm
Absorción de agua	0 %
Gravedad específica	1,3
Resistencia a la tracción	360 N/mm ²
Resistencia al álcalis, sales y ácidos	Alta
Punto de ablandamiento	160 °C
Punto de fusión	430 °C

Fuente: elaboración propia, basado en hoja técnica de Sika.

Las ventajas que representa el uso de estas fibras son varias:

- Disminución de la tendencia al agrietamiento del concreto
- Mejor resistencia al arrancamiento dentro de la matriz del concreto
- Alta resistencia a los ataques químicos
- No se corroe con aguas agresivas
- No afecta la fluidez (asentamiento) de la mezcla
- Segura y más fácil de usar que el refuerzo tradicional

Por eso, estas fibras se utilizan mucho en áreas para estacionamiento, pavimentos exteriores, aceras y entradas de automóviles, *shotcrete* vía húmeda y seca, entre otros. En la figura 19, (a) muestra la forma en que viene la fibra en paquetes y (b) la longitud de lo misma

Figura 19. **Fibra de polipropileno Sika Fiber Force PP/PE-700/55**



(a)



(b)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

La dosis de aplicación para esta fibra es de 2 a 8 kg/m³ de concreto. Esto dependiendo de la ductilidad, resistencia, tenacidad o absorción de energía especificado.

La fibra macrosintética de polipropileno PP/PE-700/55 está diseñada y fabricada en una instalación certificada bajo la Norma ISO 9001:2 000 para ser usada como refuerzo. Cumple con la Norma ASTM C-1116 / C-1116M concreto tipo III reforzado con fibra y con la Norma europea EN 14889-2 como clase II.

Se agrega a la mezcladora durante o después de hacer mezclas con los otros materiales del concreto. Se requiere un tiempo de mezclado mínimo de cinco minutos por metro cúbico, según la Norma ASTM C-94.

Figura 20. **Adición de la fibra de polipropileno durante el mezclado**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

- Fibra metálica Sika Fiber CHO65/35 NB: son filamentos de acero cortados y doblados en determinadas longitudes dependiendo el uso al que será sometido, para el refuerzo de concreto. Al usar esta fibra se obtiene gran cantidad de fibras por volumen en el concreto, distribuyéndose uniformemente brindando comportamiento mecánico.

Tabla IX. **Información técnica fibra metálica Sika Fiber CHO65/35 NB**

Tipo	Alambre de acero trefilado
Largo	35 mm con doblez en las puntas
Relación de forma	65 ± 15 %
Resistencia a la tracción	1 200 N/mm ²
Presentación	Saco de 20 kg

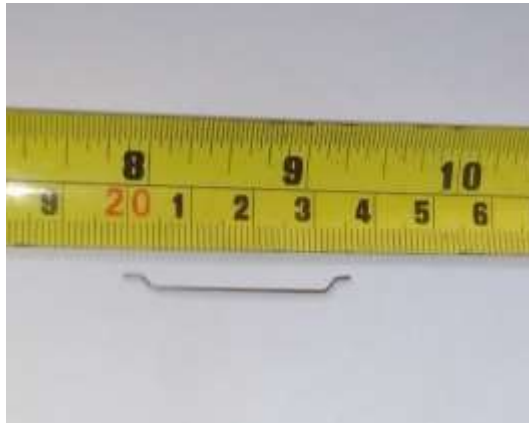
Fuente: elaboración propia, basado en hoja técnica de Sika.

Las ventajas que se esperan de usar fibra metálica son:

- Alta resistencia a tracción
- Mejor adherencia entre fibra y matriz
- Eliminar la colocación de malla y varillas convencionales
- Gran absorción de energía por el bajo contenido de carbono
- Aumenta la resistencia

En la figura 21, (a) muestra la longitud de la fibra y (b) la presentación del saco donde viene.

Figura 21. **Fibra metálica Sika Fiber CHO65/35 NB**



(a)



(b)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

La dosificación varía entre 30 y 45 kg/m³, se determina tomando en cuenta las necesidades específicas de cada proyecto. Esta fibra cumple con la Norma ASTM A-820, tipo I.

Figura 22. **Fibras metálicas**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Estas fibras no deben añadirse como primera adición en la mezcla de concreto, deben ser colocadas durante el mezclado del concreto ya habiendo finalizado con los demás materiales.

Figura 23. **Adición de fibra metálica a la mezcla**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

4.1.2. Equipo y pruebas de laboratorio

Para hacer las losas y vigas, el material utilizado debe estar en óptimas y similares condiciones en cada elemento. Así se tiene un concreto con una resistencia constante en todas las losas y en todas las vigas para evaluar la acción de las fibras. Entonces el contenido de humedad de los materiales granulares no debe afectar la relación agua/cemento de la que depende la resistencia. Los materiales granulares son sometidos a pruebas de porcentaje de humedad para proceder a secarlos. La resistencia del concreto también depende del curado y las condiciones del entorno donde se trabaje.

El equipo utilizado para la prueba de porcentaje de humedad consta de:

- Balanza con capacidad de 1 000 g \pm 0,1 g como en la figura 24 (b)
- Taras de metal
- Estufa para secar el agregado, mostrado en la figura 24 (a)

Figura 24. **Equipo para la prueba de contenido de humedad**



(a)



(b)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Para calcular el porcentaje de humedad, se homogeniza el agregado en la superficie de concreto (como se muestra en la figura 25). Luego se toma una muestra que pese 500 g. para ponerla a secar y cuando se tenga un peso seco constante se anota y se utiliza en la siguiente ecuación:

$$\%Humedad = \frac{Peso\ humedo - Peso\ seco}{Peso\ seco} \times 100$$

El porcentaje de humedad en los agregados se requiere para hacer el cálculo de ajuste de agua por humedad. En todas las mezclas varió por poco la cantidad de agua, el porcentaje de humedad en los agregados varió de 0,50 % a 5 %.

Figura 25. **Proceso de homogenización del material**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

El concreto, al contener fibras, está bastante reforzado y el colocado en campo puede ser pesado si no se tiene una consistencia adecuada en el mismo. Por eso además de pruebas en los agregados, cuando el concreto está fresco, se hace la prueba del revenimiento y se toma como valor adecuado de 3" a 5" de asentamiento. Esto considerando en el rango que el aditivo puede aumentarle la fluidez al concreto asentándolo hasta 1" sin modificar su relación agua/cemento.

Para hacer la prueba de revenimiento en el concreto fresco, se utilizó:

- Cono de Abrams.
 - Altura: 12"
 - Diámetro superior: 8"
 - Diámetro inferior: 4"
- Base de material liso y no absorbente.
- Metro.
- Varilla de 24" de largo por 5/8" de diámetro con ambos extremos redondeados.

El cono debe tener dos asas en la parte superior para levantarlo y dos estribos en la parte inferior, para sujetarlo contra la superficie lisa cuando se varilla. La figura 26 evidencia el ensayo realizado. En todas las mezclas que se hicieron el valor del asentamiento se mantuvo en los límites establecidos.

Otro dato importante a considerar es la temperatura de la mezcla, utilizando un termómetro digital, el cual se deja como máximo 5 minutos en la mezcla para que la lectura sea correcta. La toma de temperatura del concreto en estado fresco se observa en la figura 27.

Figura 26. **Prueba de asentamiento del concreto fresco**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Figura 27. **Toma de temperatura al concreto fresco**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

4.1.3. Elaboración de losas y vigas de concreto

Para conocer la resistencia a la flexión del concreto usado como pavimento, en este caso de parqueo, se elaboran losas y vigas.

Las losas tienen una dimensión de 60 cm x 60 cm de lado, con espesores de 10 y 12 cm. Las medidas están basadas en la Norma EN 14488-5:2006. Las vigas cumplen con las dimensionales especificadas en la Norma ASTM C-78. Los elementos son de concreto simple, concreto reforzado con fibras de acero y fibras macrosintéticas de polipropileno, variando la cantidad de fibra en cada caso.

Figura 28. **Moldes de madera para fundición de losas**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Para las vigas se usan moldes de metal, que cumplen con las dimensiones requeridas, como el de la figura 29.

Figura 29. **Molde de metal para hacer las vigas**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

A las formaletas se le aplica Separol solvente que es un desmoldante líquido con base en parafina. Esto para facilitar el desmoldado los elementos.

Figura 30. **Desmoldante Separol**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Para mezclar los materiales se utilizó una concreteira con capacidad para cien litros de concreto.

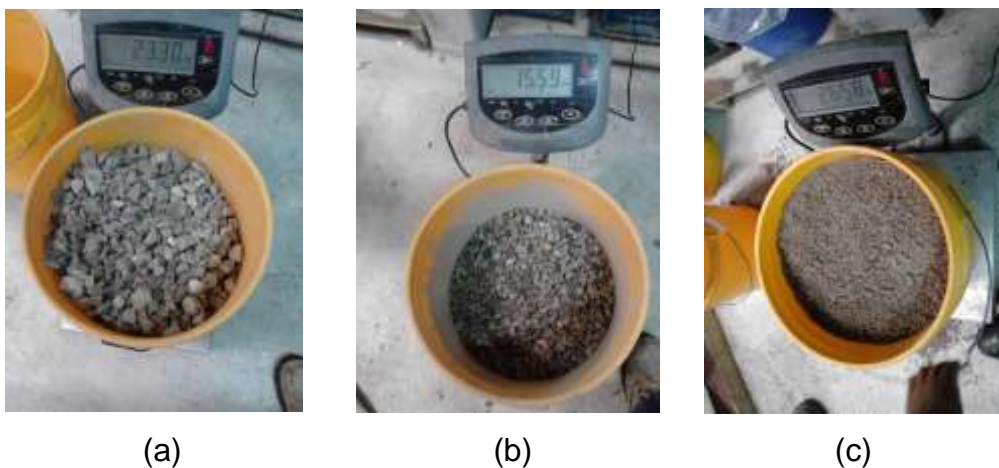
Figura 31. **Mezcladora utilizada**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Se pesa cada material según las proporciones indicadas en el diseño de mezclas y se colocan en la mezcladora.

Figura 32. **Pesado de materiales**



Continuación de la figura 32.



(d)



(e)



(f)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

En la figura 32 (a), (b) y (c) se representan los pesos de los agregados gruesos de 3/4", 3/8" y fino, respectivamente. En (d), (e) y (f) se muestran los pesos de cemento y fibras.

Para las losas de espesor de 10 cm se mezcla un volumen de concreto de 0,038 m³ (38 litros) por losa, tomando en cuenta un desperdicio del 5 %. Y para las losas de espesor de 12 cm se mezcla un volumen de concreto de 0,047 m³ (47 litros) por losa, también tomando en cuenta 5 % de desperdicio. El mezclado se hace de la siguiente manera:

- Se humedece la concretera y se echan los agregados, dejándolos mezclar por 1 minuto.
- Se agrega todo el cemento y la mitad del agua se mezcla hasta que los agregados estén bien cubiertos por la pasta de cemento.
- Se deja descansar la mezcla por 3 minutos.

- Se reanuda el proceso de mezclado por otros 3 minutos y se le agrega la otra mitad de agua, durante este tiempo se echa el aditivo reductor de agua y las fibras correspondientes.

Para todos los elementos se utiliza el mismo diseño de mezcla. Los únicos ajustes que pueden hacerse son por humedad y por volumen, los cuales no representan un cambio significativo en la resistencia del concreto.

Tabla X. **Diseño de mezcla utilizado**

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	311	kg/m ³
Agua	183	kg/m ³
Piedra 3/4"	584	kg/m ³
Piedra 3/8"	390	kg/m ³
Arena	864	kg/m ³
ViscoCrete	3	ml/kg

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Figura 33. **Mezclado de materiales**



Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

Se hace la prueba de asentamiento para comprobar que la mezcla está en el rango de asentamiento deseado, si no lo está, hay que repetirla.

Después del mezclado se procede a colocar el concreto en los moldes como en la figura 34 (a), (b) y (c), varillando y acomodando la mezcla para llenar bien los espacios evitando dejar agujeros o “ratoneras”. Se deja fraguar en el molde durante 15 horas y luego se desmoldan para estar en continuo remojo y que el curado asegure la adecuada humedad durante 28 días de fraguado, ver figura 34 (d).

Figura 34. **Colocación y fraguado de concreto**



(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: laboratorio de concreto SIKA Guatemala.

4.2. Ensayo de concreto a flexión Norma EN 14488-5

Para hacer los ensayos conforme esta norma es necesario utilizar el equipo y procedimiento adecuado, los cuales se describen a continuación:

4.2.1. Equipo y procedimiento para el ensayo

- 2 planchas cuadradas de acero
- 2 barras metálicas
- Disco de 95 cm² de área
- Gato hidráulico de 10 y 25 toneladas inglesas.
- Deformómetro

Las planchas de acero sirven de base y encima se ponen las dos barras metálicas espaciadas 50 cm. Sobre las barras se apoya la losa a ensayar. Se coloca el disco en el centro de la losa donde va a ir aplicada la fuerza por medio del gato hidráulico. El deformómetro se coloca lo más cercano posible al disco.

Se aplica presión al gato hidráulico de 200 en 200 psi, esta presión se convierte en carga cuando el gato aplica el esfuerzo sobre la superficie. Mientras se carga el elemento se lee su deformación (el deformómetro da las lecturas en milipulgadas, por lo tanto se multiplican las lecturas por 0,001). Se apuntan los datos, se hacen las conversiones de presión a fuerza y de deformación (lectura de deformómetro) a deflexión. La deflexión es la diferencia entre la deformación inicial y las deformaciones dadas durante la aplicación de cargas al elemento, se convierten las pulgadas a milímetros. Los datos se usan para trazar la gráfica carga-deflexión. En el apéndice 1 se explica la conversión.

Presión x área de gato hidráulico = libras → kilogramos fuerza → kilonewtons.

En la figura 35 (a) se aprecia el equipo usado en el ensayo a flexión de las losas (b) la carga aplicada en el elemento y medición de la deflexión, en (c) la lectura de presión ejercida por el gato hidráulico.

Figura 35. **Sistema para ensayo a flexión de losas**



(a)



(b)



(c)

Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

4.2.2. Consideraciones

Esta norma establece un método para la determinación de la respuesta carga-deflexión de una probeta plana. Regularmente se hace para conocer la absorción de energía hasta cierta deflexión.

Su aplicación, en este caso, es para medir la capacidad que tiene una losa de soportar cargas, conocer su deflexión y el punto de falla. Las condiciones hiperestáticas de apoyo permiten una buena distribución de esfuerzos en el objeto de ensayo.

Tabla XI. **Losas para ensayar a flexión**

Cantidad de losas	Espesor (cm)	Refuerzo	Dosificación (kg/m³)	Dosis
5	10	-	-	-
5	10	Fibra polipropileno	2,00	Baja
5	10	Fibra polipropileno	5,00	Media
5	10	Fibra polipropileno	8,00	Alta
5	10	Fibra metálica	30,00	Baja
5	10	Fibra metálica	37,50	Media
5	10	Fibra metálica	45,00	Alta
3	12	-	-	-
3	12	Fibra polipropileno	2,00	Baja
3	12	Fibra polipropileno	8,00	Alta
3	12	Fibra metálica	22,00	Baja
3	12	Fibra metálica	30,00	Alta

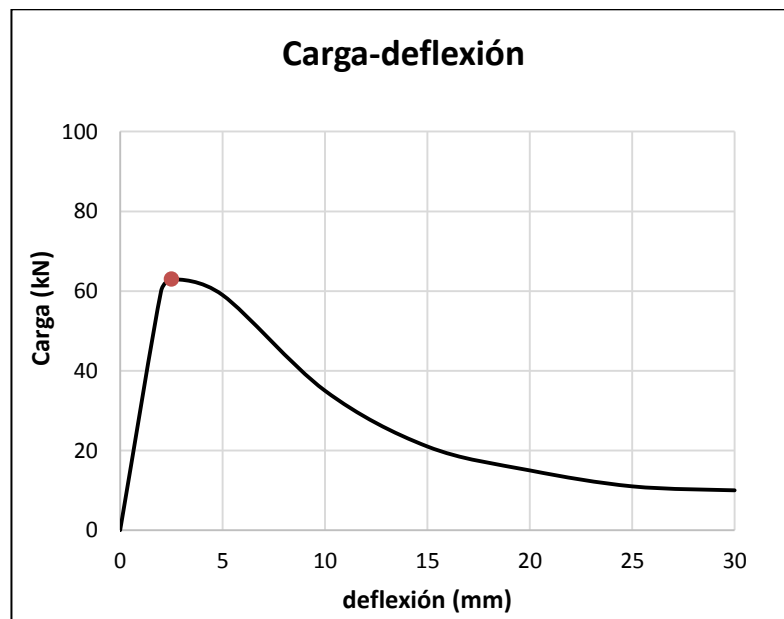
Fuente: elaboración propia.

Las losas sin refuerzo de 10 cm de espesor se ensayaron con el gato hidráulico de 10 toneladas. Las demás losas con el de 25 toneladas.

En el caso de las losas de 12 cm de espesor, la dosificación baja de la fibra metálica es 22 kg/m^3 y la dosificación alta es de 30 kg/m^3 . Se hizo con estas cantidades de fibra para probar el comportamiento de la losa al bajarle el refuerzo teniendo ese espesor.

El punto de interés para la gráfica carga-deflexión es el punto de falla. Sin embargo, para las losas reforzadas con fibras, la norma requiere que las losas se lleven a una deflexión máxima de 30 mm para apreciar el trabajo y acción de la fibra después de fallado el elemento.

Figura 36. **Gráfica (típica) carga–deflexión Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Concreto sin refuerzo

A continuación se presentan los datos de las losas de concreto simple.

4.2.3.1. Losas de 10 cm de espesor

Con este espesor se ensayaron cinco losas.

Tabla XII. Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, sin fibra

Núm. de Lectura	Equipo		Norma	
	Presión (psi)	Deformación (0,001")	Carga (kN)	Deflexión (mm)
1	0	40	0	0
2	200	34	2,04	0,15
3	400	32	4,07	0,20
4	600	30	6,11	0,25
5	800	29	8,15	0,28
6	1 000	27	10,18	0,33
7	1 200	26	12,22	0,36
8	1 400	25	14,25	0,38
9	1 600	24	16,29	0,41
10	1 800	23	18,33	0,43
11	2 000	22	20,36	0,46
12	2 200	22	22,4	0,46
13	2 400	21	24,44	0,48
14	2 600	20	26,47	0,51
15	2 800	20	28,51	0,51
16	3 000	19	30,55	0,53
17	3 200	19	32,58	0,53
18	3 400	18	34,62	0,56
19	3 600	17	36,65	0,58
20	3 800	17	38,69	0,58
21	4 000	16	40,73	0,61
22	4 200	15	42,76	0,64
23	4 400	14	44,8	0,66
24	4 500	14	45,82	0,66

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, sin fibra**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	48	0	0
2	200	46	2,04	0,05
3	400	41	4,07	0,18
4	600	35	6,11	0,33
5	800	30	8,15	0,46
6	1 000	26	10,18	0,56
7	1 200	24	12,22	0,61
8	1 400	21	14,25	0,69
9	1 600	18	16,29	0,76
10	1 800	17	18,33	0,79
11	2 000	15	20,36	0,84
12	2 200	12	22,4	0,91
13	2 400	12	24,44	0,91
14	2 600	10	26,47	0,96
15	2 800	9	28,51	0,99
16	3 000	8	30,55	1,02
17	3 200	6	32,58	1,07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, sin fibra

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	80	0	0
2	200	78	2,04	0,05
3	400	74	4,07	0,15
4	600	70	6,11	0,25
5	800	66	8,15	0,36
6	1 000	58	10,18	0,56
7	1 200	55	12,22	0,64
8	1 400	51	14,25	0,69
9	1 600	49	16,29	0,79
10	1 800	45	18,33	0,89
11	2 000	44	20,36	0,91
12	2 200	42	22,4	0,97
13	2 400	40	24,44	1,02
14	2 600	38	26,47	1,07
15	2 800	38	28,51	1,07
16	3 000	36	30,55	1,12
17	3 200	35	32,58	1,14
18	3 400	10	34,62	1,78
19	3 600	5	36,65	1,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, sin fibra**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	81	0	0
2	200	79	2,04	0,05
3	400	77	4,07	0,10
4	600	75	6,11	0,15
5	800	72	8,15	0,23
6	1 000	70	10,18	0,28
7	1 200	68	12,22	0,33
8	1 400	67	14,25	0,36
9	1 600	65	16,29	0,41
10	1 800	64	18,33	0,43
11	2 000	62	20,36	0,48
12	2 200	61	22,4	0,51
13	2 400	60	24,44	0,53
14	2 600	59	26,47	0,56
15	2 800	58	28,51	0,58
16	3 000	56	30,55	0,64
17	3 200	55	32,58	0,66
18	3 400	54	34,62	0,69
19	3 600	53	36,65	0,71
20	3 800	52	38,69	0,74
21	4 000	51	40,73	0,76
22	4 200	50	42,76	0,79

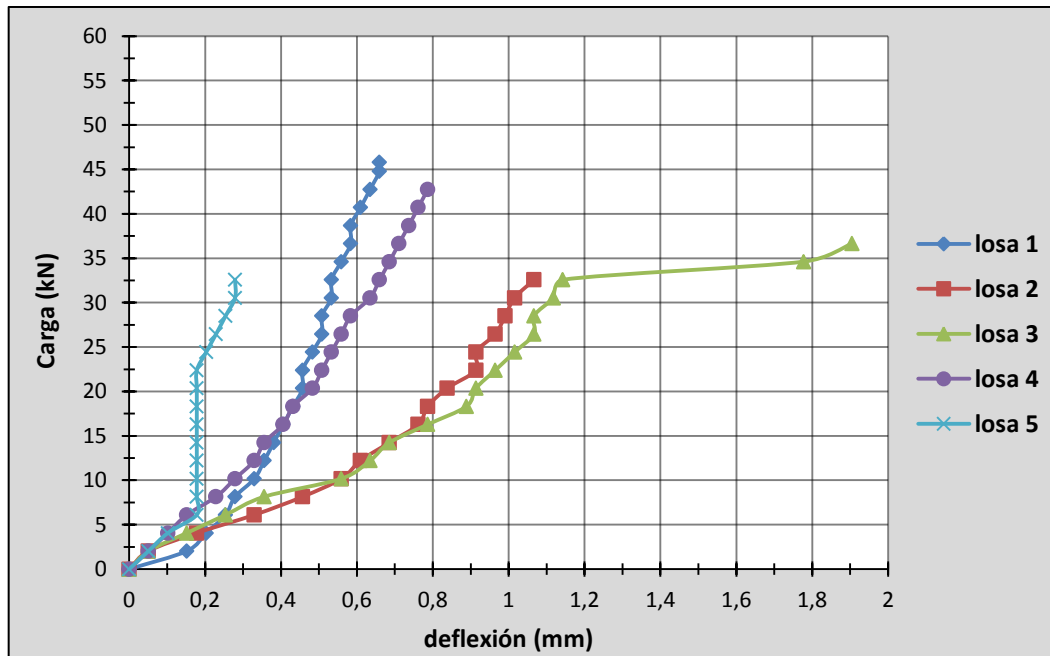
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, sin fibra**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	105	0	0
2	200	103	2,04	0,05
3	400	101	4,07	0,10
4	600	98	6,11	0,18
5	800	98	8,15	0,18
6	1 000	98	10,18	0,18
7	1 200	98	12,22	0,18
8	1 400	98	14,25	0,18
9	1 600	98	16,29	0,18
10	1 800	98	18,33	0,18
11	2 000	98	20,36	0,18
12	2 200	98	22,4	0,18
13	2 400	97	24,44	0,20
14	2 600	96	26,47	0,23
15	2 800	95	28,51	0,25
16	3 000	94	30,55	0,28
17	3 200	94	32,58	0,28

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfica carga–deflexión de losas sin fibra de 10 cm de espesor**



Fuente: elaboración propia.

La losa 5 no se tomará en cuenta porque el proceso de su fabricación no se hizo de forma correcta, por eso su gráfica tiene esa forma. Además se nota una dispersión grande entre los pares de losas 1 y 4 y losas 2 y 3.

4.2.3.2. Losas de 12 cm de espesor

Se muestran los datos de las tres losas de 12 cm de espesor de concreto simple. A las cuales se les aplicó carga de 100 en 100 psi.

Tabla XVII. Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, sin fibra

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión (psi)	Deformación (0,001")	Carga (kN)	Deflexión (mm)
1	0	60	0	0
2	100	60	2,37	0
3	200	58	4,75	0,05
4	300	58	7,12	0,05
5	400	57	9,49	0,08
6	500	57	11,86	0,08
7	600	56	14,24	0,10
8	700	56	16,61	0,10
9	800	56	18,98	0,10
10	900	56	21,35	0,10
11	1 000	55	23,73	0,11
12	1 100	55	26,1	0,11
13	1 200	55	28,47	0,12
14	1 300	55	30,85	0,12
15	1 400	55	33,22	0,12
16	1 500	55	35,59	0,12
17	1 600	55	37,96	0,13
18	1 700	55	40,34	0,13
19	1 800	55	42,71	0,13
20	1 900	53	45,08	0,18
21	2 000	52	47,45	0,20
22	2 100	51	49,83	0,23
23	2 200	51	52,2	0,23
24	2 300	50	54,57	0,25
25	2 400	49	56,95	0,28
26	2 500	0	59,32	1,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, sin fibra

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	74	0	0
2	100	74	2,37	0
3	200	74	4,75	0
4	300	74	7,12	0
5	400	71	9,49	0,08
6	500	69	11,86	0,13
7	600	68	14,24	0,15
8	700	67	16,61	0,18
9	800	65	18,98	0,23
10	900	65	21,35	0,23
11	1 000	64	23,73	0,25
12	1 100	63	26,1	0,28
13	1 200	62	28,47	0,30
14	1 300	61	30,85	0,33
15	1 400	60	33,22	0,36
16	1 500	59	35,59	0,38
17	1 600	59	37,96	0,38
18	1 700	57	40,34	0,43
19	1 800	56	42,71	0,46
20	1 900	55	45,08	0,48
21	2 000	54	47,45	0,51
22	2 100	53	49,83	0,53
23	2 200	52	52,2	0,56
24	2 300	51	54,57	0,58
25	2 400	50	56,95	0,61
26	2 500	0	59,32	1,88

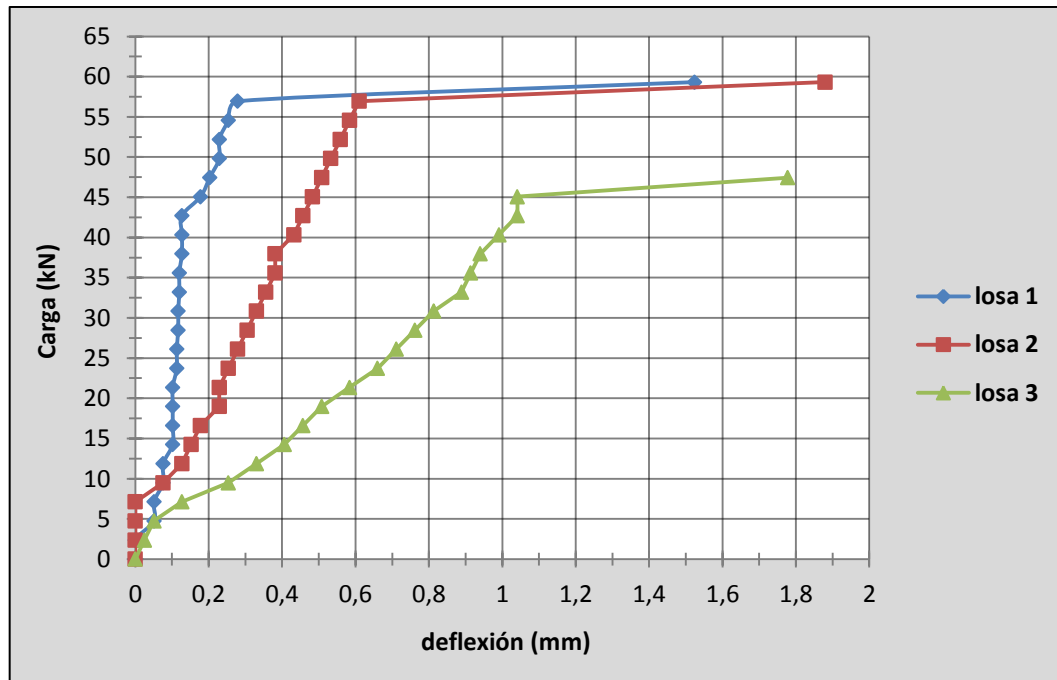
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, sin fibra**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	135	0	0
2	100	134	2,37	0,03
3	200	133	4,75	0,05
4	300	130	7,12	0,13
5	400	125	9,49	0,25
6	500	122	11,86	0,33
7	600	119	14,24	0,41
8	700	117	16,61	0,46
9	800	115	18,98	0,51
10	900	112	21,35	0,58
11	1 000	109	23,73	0,66
12	1 100	107	26,1	0,71
13	1 200	105	28,47	0,76
14	1 300	103	30,85	0,81
15	1 400	100	33,22	0,89
16	1 500	99	35,59	0,91
17	1 600	98	37,96	0,94
18	1 700	96	40,34	0,99
19	1 800	94	42,71	1,04
20	1 900	94	45,08	1,04
21	2 000	65	47,45	1,78

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfica carga–deflexión de losas sin fibra de 12 cm de espesor**



Fuente: elaboración propia.

En las gráficas de estas losas se puede observar un comportamiento distinto de las mismas, porque que hay una dispersión considerable entre cada una de ellas. Se hace más evidente conforme siguen soportando carga, y se nota por la deflexión que maneja cada una.

4.2.4. Concreto fibroreforzado con polipropileno

Se presentan los datos de las losas de concreto reforzado con fibras de polipropileno.

4.2.4.1. Losas de 10 cm de espesor

Se ensayaron cinco losas por cada dosificación de esta fibra.

- Dosificación baja

Tabla XX. Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	114	0	0
2	200	105	4,75	0,23
3	400	92	9,49	0,56
4	600	81	14,24	0,84
5	800	74	18,98	1,02
6	1 000	66	23,73	1,22
7	1 200	63	28,47	1,30
8	1 400	60	33,22	1,37
10	1 600	58	37,96	1,42
11	1 700	30	40,34	2,13
12	1 520	-	36	5
13	890	-	21	10
14	500	-	12	15
15	340	-	8	20
16	250	-	6	25
17	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	134	0	0
2	200	120	4,75	0,36
3	400	113	9,49	0,53
4	600	106	14,24	0,71
5	800	100	18,98	0,86
6	1 000	95	23,73	0,99
7	1 200	90	28,47	1,12
8	1 400	82	33,22	1,32
9	1 600	21	37,96	2,87
10	1 430	-	34	5
11	840	-	20	10
12	460	-	11	15
13	295	-	7	20
14	210	-	5	25
15	170	-	4	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	49	0	0
2	200	45	4,75	0,10
3	400	39	9,49	0,25
4	600	33	14,24	0,41
5	800	27	18,98	0,56
6	1 000	22	23,73	0,69
7	1 200	17	28,47	0,81
8	1 400	12	33,22	0,94
9	1 600	7	37,96	1,07
10	1 800	1	42,71	1,22
11	1 600	-	38	5
12	930	-	22	10
13	500	-	12	15
14	295	-	7	20
15	250	-	6	25
16	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	81	0	0
2	200	70	4,75	0,28
3	400	60	9,49	0,53
4	600	52	14,24	0,74
5	800	42	18,98	0,99
6	1 000	36	23,73	1,14
7	1 200	28	28,47	1,35
8	1 400	22	33,22	1,50
9	1 600	16	37,96	1,65
10	1 430	-	34	5
11	800	-	19	10
12	500	-	12	15
13	380	-	9	20
14	295	-	7	25
15	250	-	6	30

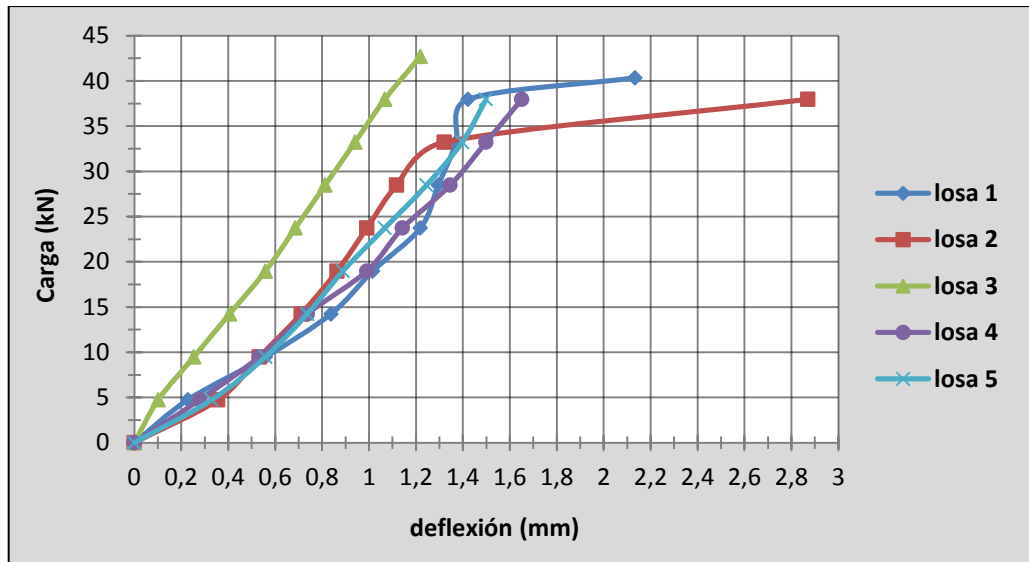
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	130	0	0
2	200	117	4,75	0,33
3	400	108	9,49	0,56
4	600	101	14,24	0,74
5	800	95	18,98	0,89
6	1 000	88	23,73	1,07
7	1 200	81	28,47	1,25
8	1 400	75	33,22	1,40
9	1 600	71	37,96	1,50
10	1 430	-	34	5
11	840	-	20	10
12	420	-	10	15
13	275	-	6,5	20
14	230	-	5,5	25
15	210	-	5	30

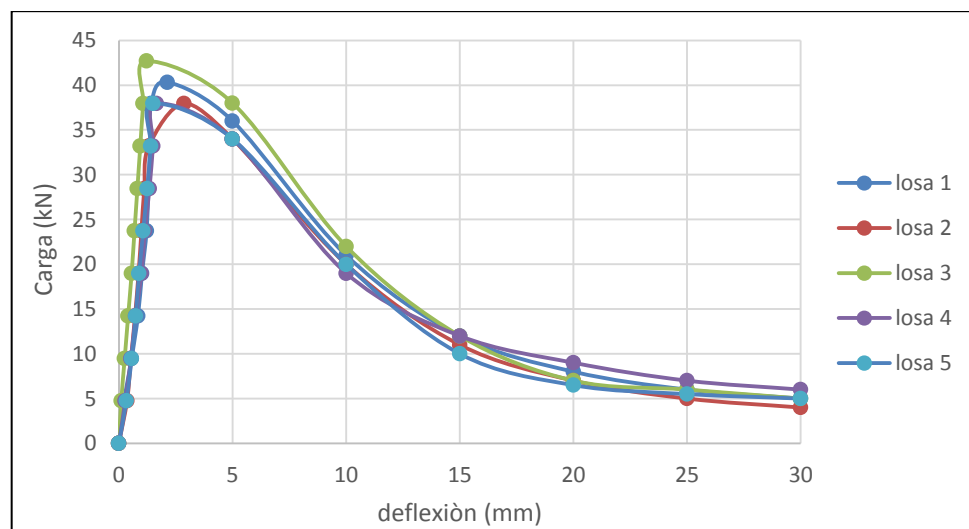
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación media

Tabla XXV. **Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	118	0	0
2	200	112	4,75	0,15
3	400	105	9,49	0,33
4	600	100	14,24	0,46
5	800	95	18,98	0,58
6	1 000	89	23,73	0,74
7	1 200	85	28,47	0,84
8	1 400	79	33,22	0,99
9	1 600	73	37,96	1,14
10	1 650	29	39,15	2,26
11	1 475	-	35	5
12	840	-	20	10
13	590	-	14	15
14	420	-	10	20
15	295	-	7	25
16	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	100	0	0
2	200	94	4,75	0,15
3	400	86	9,49	0,36
4	600	77	14,24	0,58
5	800	69	18,98	0,79
6	1 000	61	23,73	0,99
7	1 200	51	28,47	1,25
8	1 300	23	30,85	1,96
9	1 180	-	28	5
10	590	-	14	10
11	420	-	10	15
12	250	-	6	20
13	250	-	6	25
14	170	-	4	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	103	0	0
2	200	96	4,75	0,18
3	400	89	9,49	0,36
4	600	80	14,24	0,58
5	800	73	18,98	0,76
6	1 000	66	23,73	0,94
7	1 200	61	28,47	1,07
8	1 300	29	30,85	1,88
9	1 140	-	27	5
10	500	-	12	10
11	340	-	8	15
12	295	-	7	20
13	250	-	6	25
14	200	-	4,75	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	172	0	0
2	200	163	4,75	0,23
3	400	155	9,49	0,43
4	600	146	14,24	0,66
5	800	138	18,98	0,86
6	1 000	130	23,73	1,07
7	1 200	124	28,47	1,22
8	1 400	117	33,22	1,40
9	1 600	110	37,96	1,58
10	1 700	88	40,34	2,13
11	1 520	-	36	5
12	840	-	20	10
13	550	-	13	15
14	380	-	9	20
15	250	-	6	25
16	210	-	5	30

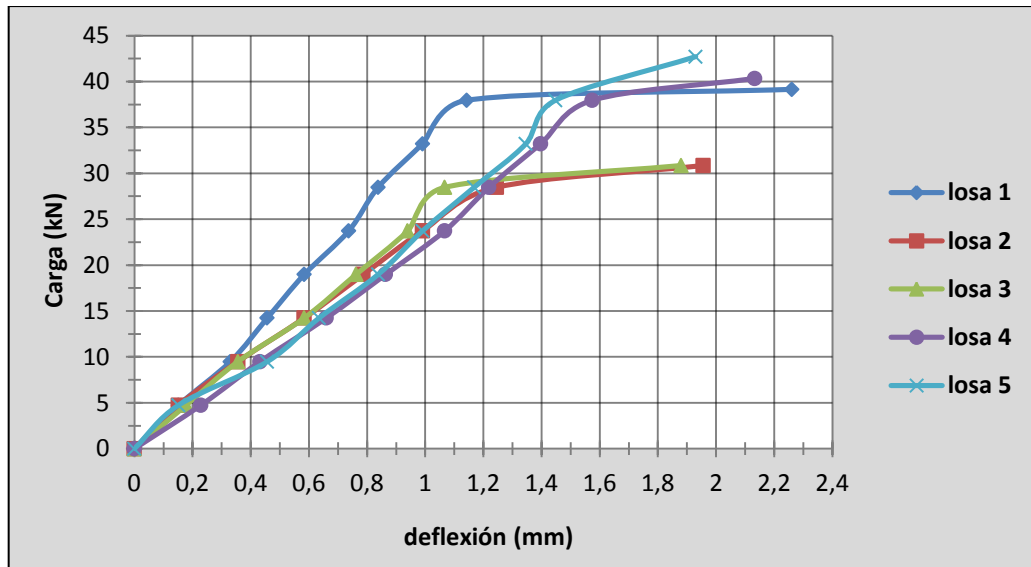
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	94	0	0
2	200	88	4,75	0,15
3	400	76	9,49	0,46
4	600	69	14,24	0,64
5	800	61	18,98	0,84
6	1 000	55	23,73	0,99
7	1 200	48	28,47	1,17
8	1 400	41	33,22	1,35
9	1 600	37	37,96	1,45
10	1 800	18	42,71	1,93
11	1 600	-	38	5
12	885	-	21	10
13	500	-	12	15
14	360	-	8,5	20
15	250	-	6	25
16	190	-	4,5	30

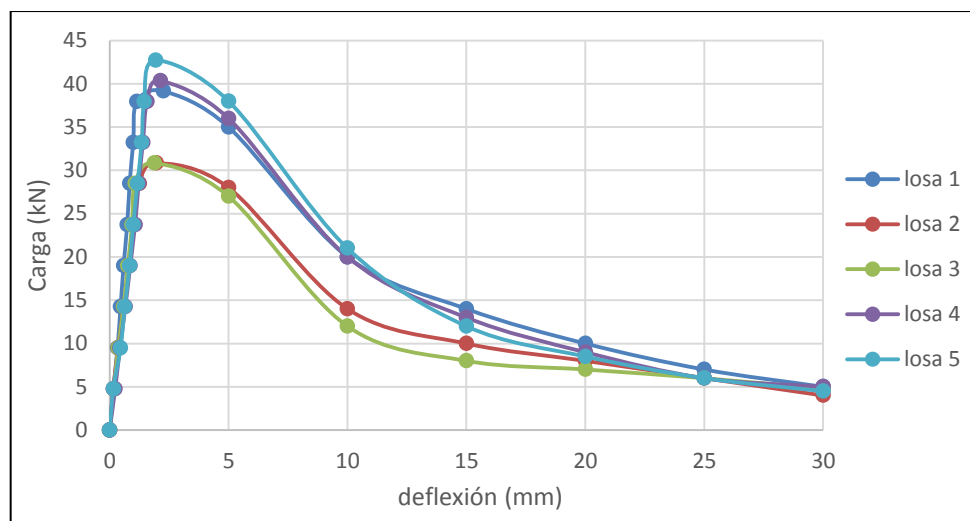
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación alta

Tabla XXX. **Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	104	0	0
2	200	102	4,75	0,05
3	400	92	9,49	0,31
4	600	86	14,24	0,46
5	800	81	18,98	0,58
6	1 000	77	23,73	0,69
7	1 200	74	28,47	0,76
8	1 400	70	33,22	0,86
9	1 600	68	37,96	0,91
10	1 800	32	42,71	1,83
11	1 560	-	37	5
12	840	-	20	10
13	550	-	13	15
14	380	-	9	20
15	275	-	6,5	25
16	230	-	5,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	120	0	0
2	200	108	4,75	0,31
3	400	92	9,49	0,71
4	600	85	14,24	0,89
5	800	77	18,98	1,09
6	1 000	74	23,73	1,17
7	1 200	71	28,47	1,25
8	1 400	67	33,22	1,35
9	1 600	28	37,96	2,34
10	1 390	-	33	5
11	760	-	18	10
12	500	-	12	15
13	380	-	9	20
14	295	-	7	25
15	230	-	5,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	112	0	0
2	200	111	4,75	0,03
3	400	101	9,49	0,28
4	600	90	14,24	0,56
5	800	79	18,98	0,84
6	1 000	72	23,73	1,02
7	1 200	66	28,47	1,17
8	1 400	61	33,22	1,30
9	1 600	25	37,96	2,21
10	1 430	-	34	5
11	760	-	18	10
12	500	-	12	15
13	380	-	9	20
14	295	-	7	25
15	250	-	6	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	98	0	0
2	200	90	4,75	0,20
3	400	83	9,49	0,38
4	600	76	14,24	0,56
5	800	71	18,98	0,69
6	1 000	68	23,73	0,76
7	1 200	64	28,47	0,86
8	1 400	62	33,22	0,91
9	1 600	60	37,96	0,97
10	1 700	20	40,34	1,98
11	1 520	-	36	5
12	800	-	19	10
13	550	-	13	15
14	420	-	10	20
15	295	-	7	25
16	250	-	6	30

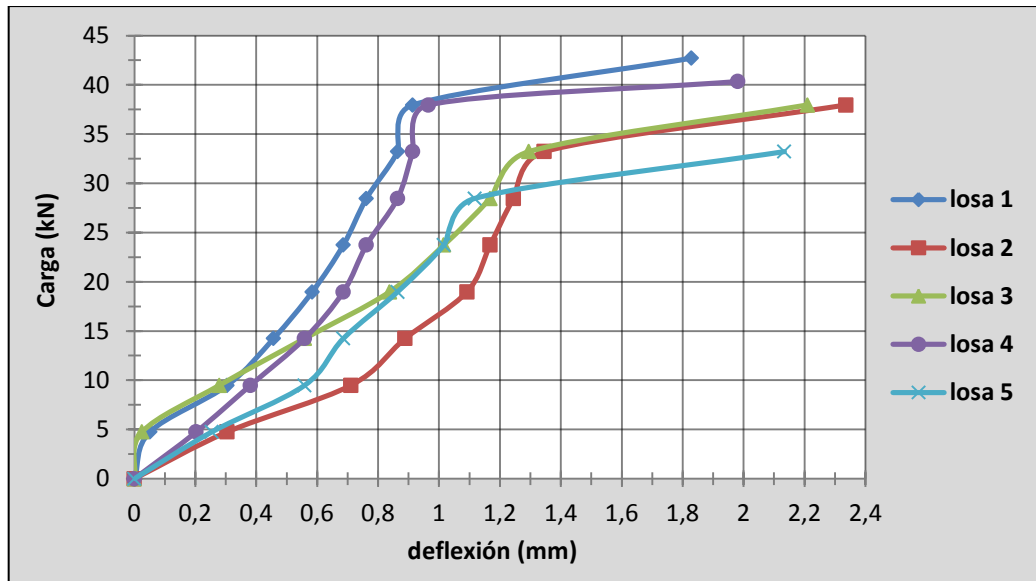
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	102	0	0
2	200	92	4,75	0,25
3	400	80	9,49	0,56
4	600	75	14,24	0,69
5	800	68	18,98	0,86
6	1 000	62	23,73	1,02
7	1 200	58	28,47	1,12
8	1 400	18	33,22	2,13
9	1 260	-	30	5
10	630	-	15	10
11	420	-	10	15
12	340	-	8	20
13	250	-	6	25
14	210	-	5	30

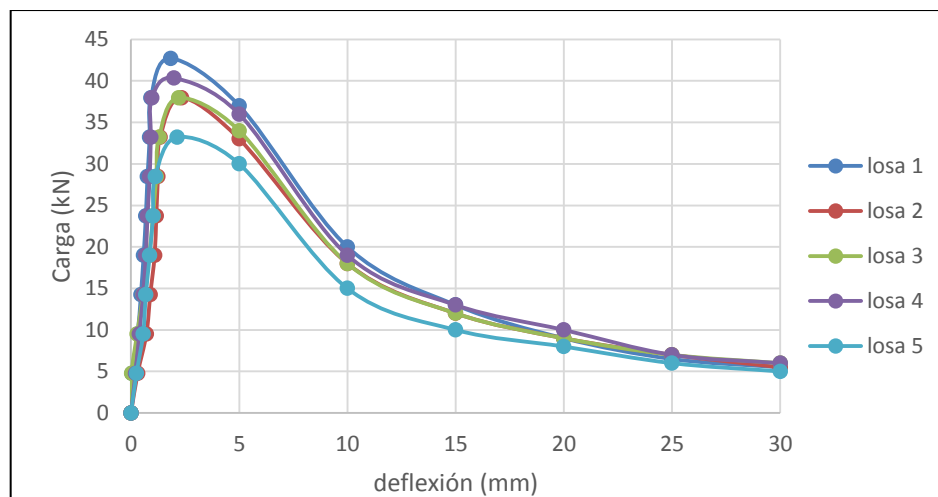
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

4.2.4.2. Losas de 12 cm de espesor

Se ensayaron tres losas por cada dosificación

- Dosificación baja

Tabla XXXV. Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	90	0	0
2	200	79	4,75	0,28
3	400	71	9,49	0,48
4	600	67	14,24	0,58
5	800	64	18,98	0,66
6	1 000	63	23,73	0,69
7	1 200	63	28,47	0,69
8	1 400	63	33,22	0,69
9	1 600	63	37,96	0,69
10	1 800	63	42,71	0,69
11	2 000	62	47,45	0,71
12	2 200	61	52,2	0,74
13	2 400	58	56,95	0,81
14	2 150	-	51	5
15	1 220	-	29	10
16	760	-	18	15
17	500	-	12	20
18	420	-	10	25
19	380	-	9	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	72	0	0
2	200	68	4,75	0,10
3	400	63	9,49	0,23
4	600	58	14,24	0,36
5	800	55	18,98	0,43
6	1 000	52	23,73	0,51
7	1 200	49	28,47	0,58
8	1 400	48	33,22	0,61
9	1 600	45	37,96	0,69
10	1 800	43	42,71	0,74
11	2 000	41	47,45	0,79
12	2 200	39	52,2	0,84
13	2 300	25	54,57	1,19
14	2 150	-	51	5
15	1 300	-	31	10
16	840	-	20	15
17	590	-	14	20
18	465	-	11	25
19	420	-	10	30

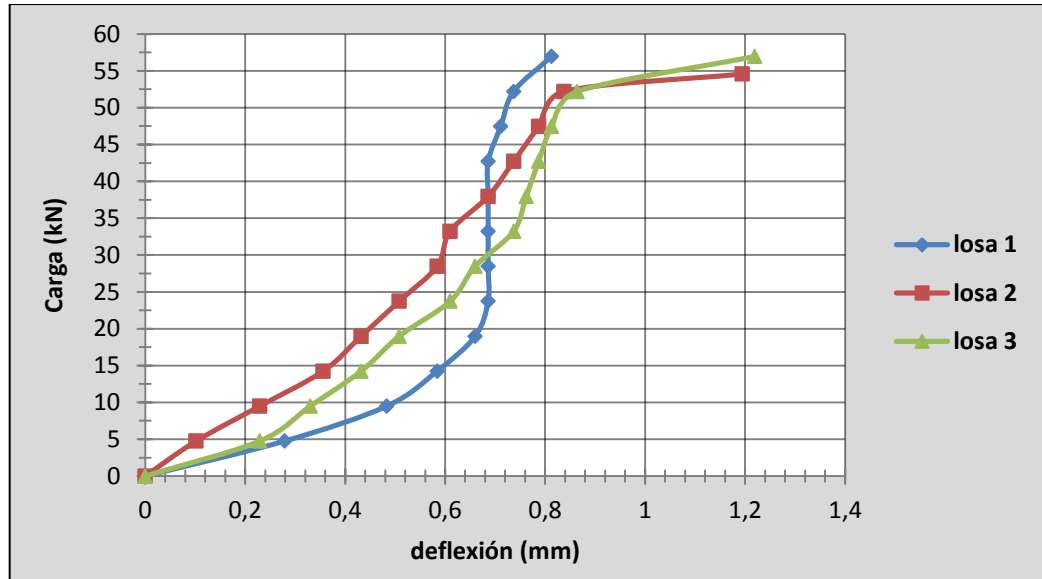
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	89	0	0
2	200	80	4,75	0,23
3	400	76	9,49	0,33
4	600	72	14,24	0,43
5	800	69	18,98	0,51
6	1 000	65	23,73	0,61
7	1 200	63	28,47	0,66
8	1 400	60	33,22	0,74
9	1 600	59	37,96	0,76
10	1 800	58	42,71	0,79
11	2 000	57	47,45	0,81
12	2 200	55	52,2	0,86
13	2 400	41	56,95	1,22
14	2 230	-	53	5
15	1 260	-	30	10
16	840	-	20	15
17	630	-	15	20
18	500	-	12	25
19	465	-	11	30

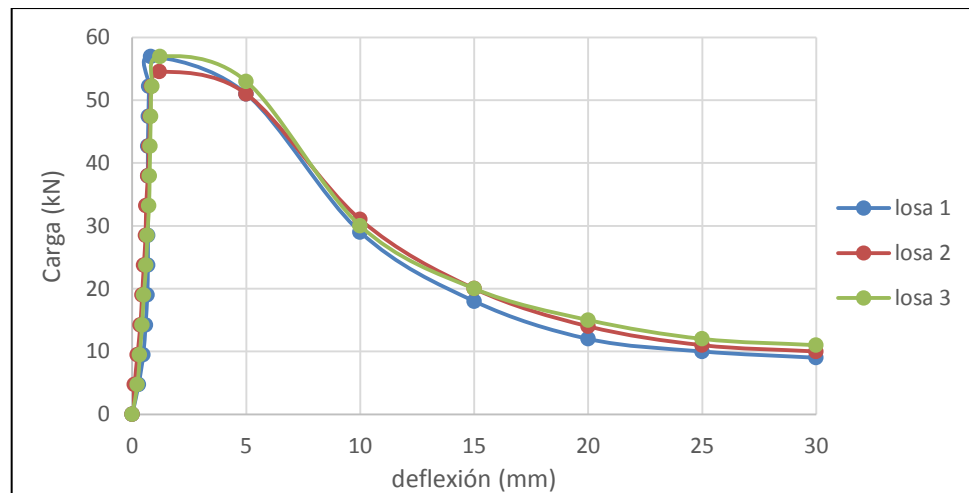
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación alta

Tabla XXXVIII. **Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	42	0	0
2	200	31	4,75	0,28
3	400	27	9,49	0,38
4	600	26	14,24	0,41
5	800	26	18,98	0,41
6	1 000	26	23,73	0,41
7	1 200	25	28,47	0,43
8	1 400	23	33,22	0,48
9	1 600	20	37,96	0,56
10	1 800	18	42,71	0,61
11	2 000	16	47,45	0,66
12	2 200	15	52,2	0,69
13	2 400	13	56,95	0,74
14	2 600	6	61,69	0,91
15	2 320	-	55	5
16	1 350	-	32	10
17	930	-	22	15
18	680	-	16	20
19	550	-	13	25
20	530	-	12,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	107	0	0
2	200	98	4,75	0,23
3	400	90	9,49	0,43
4	600	85	14,24	0,56
5	800	81	18,98	0,66
6	1 000	79	23,73	0,71
7	1 200	77	28,47	0,76
8	1 400	75	33,22	0,81
9	1 600	73	37,96	0,86
10	1 800	71	42,71	0,91
11	2 000	70	47,45	0,94
12	2 200	69	52,2	0,97
13	2 400	67	56,95	1,02
14	2 600	66	61,69	1,04
15	2 800	60	66,44	1,19
16	2 445	-	58	5
17	1 475	-	35	10
18	970	-	23	15
19	760	-	18	20
20	630	-	15	25
21	500	-	12	30

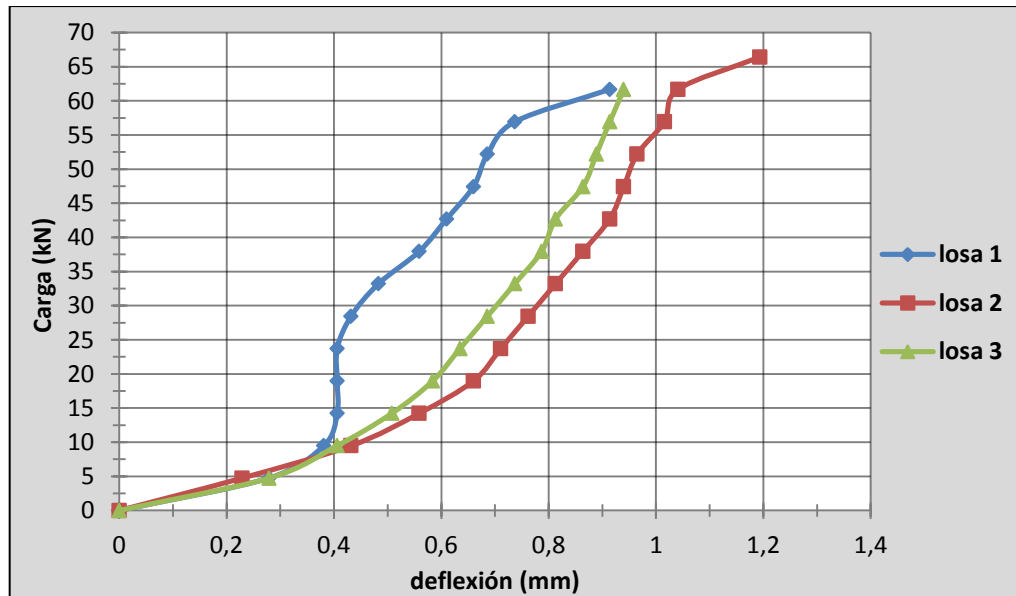
Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra polipropileno**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	41	0	0
2	200	30	4,75	0,28
3	400	25	9,49	0,41
4	600	21	14,24	0,51
5	800	18	18,98	0,58
6	1 000	16	23,73	0,64
7	1 200	14	28,47	0,69
8	1 400	12	33,22	0,74
9	1 600	10	37,96	0,79
10	1 800	9	42,71	0,81
11	2 000	7	47,45	0,86
12	2 200	6	52,2	0,89
13	2 400	5	56,95	0,91
14	2 600	4	61,69	0,94
15	2 275	-	54	5
16	1 350	-	32	10
17	885	-	21	15
18	675	-	16	20
19	550	-	13	25
20	465	-	11	30

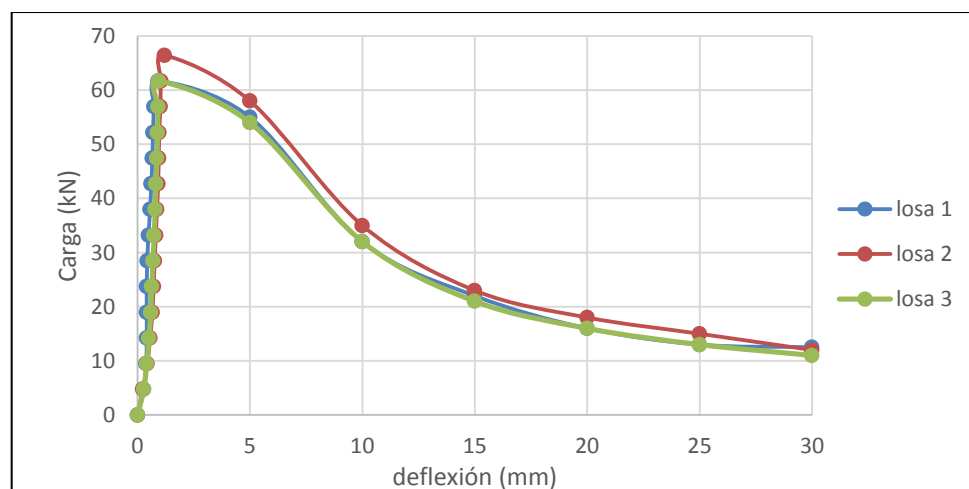
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Concreto reforzado con fibras metálicas

Se presentan los datos obtenidos de las losas reforzadas con fibra metálica.

4.2.5.1. Losas de 10 cm de espesor

Se ensayaron cinco losas para cada dosificación.

- Dosificación baja

Tabla XLI. Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	120	0	0
2	200	110	4,75	0,25
3	400	103	9,49	0,43
4	600	98	14,24	0,56
5	800	95	18,98	0,64
6	1 000	92	23,73	0,71
7	1 200	90	28,47	0,76
8	1 400	88	33,22	0,81
9	1 600	87	37,96	0,84
10	1 800	85	42,71	0,89
11	2 000	75	47,45	1,14
12	1 770	-	42	5
13	840	-	20	10
14	420	-	10	15
15	250	-	6	20
16	170	-	4	25
17	150	-	3,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	128	0	0
2	200	119	4,75	0,23
3	400	114	9,49	0,36
4	600	110	14,24	0,46
5	800	108	18,98	0,51
6	1 000	107	23,73	0,53
7	1 200	106	28,47	0,56
8	1 400	105	33,22	0,58
9	1 600	105	37,96	0,58
10	1 800	85	42,71	1,09
11	1 600	-	38	5
12	840	-	20	10
13	420	-	10	15
14	210	-	5	20
15	170	-	4	25
16	125	-	3	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	32	0	0
2	200	23	4,75	0,23
3	400	17	9,49	0,38
4	600	14	14,24	0,46
5	800	12	18,98	0,51
6	1 000	10	23,73	0,56
7	1 200	9	28,47	0,58
8	1 400	8	33,22	0,61
9	1 600	8	37,96	0,61
10	1 800	7	42,71	0,64
11	2 000	6	47,45	0,66
12	2 200	5	52,2	0,69
13	2 020	-	48	5
14	1 100	-	26	10
15	590	-	14	15
16	340	-	8	20
17	190	-	4,5	25
18	170	-	4	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	66	0	0
2	200	55	4,75	0,28
3	400	50	9,49	0,41
4	600	46	14,24	0,51
5	800	44	18,98	0,56
6	1 000	41	23,73	0,64
7	1 200	40	28,47	0,66
8	1 400	39	33,22	0,69
9	1 600	38	37,96	0,71
10	1 800	36	42,71	0,76
11	2 000	32	47,45	0,86
12	1 810	-	43	5
13	970	-	23	10
14	460	-	11	15
15	295	-	7	20
16	230	-	5,5	25
17	190	-	4,5	30

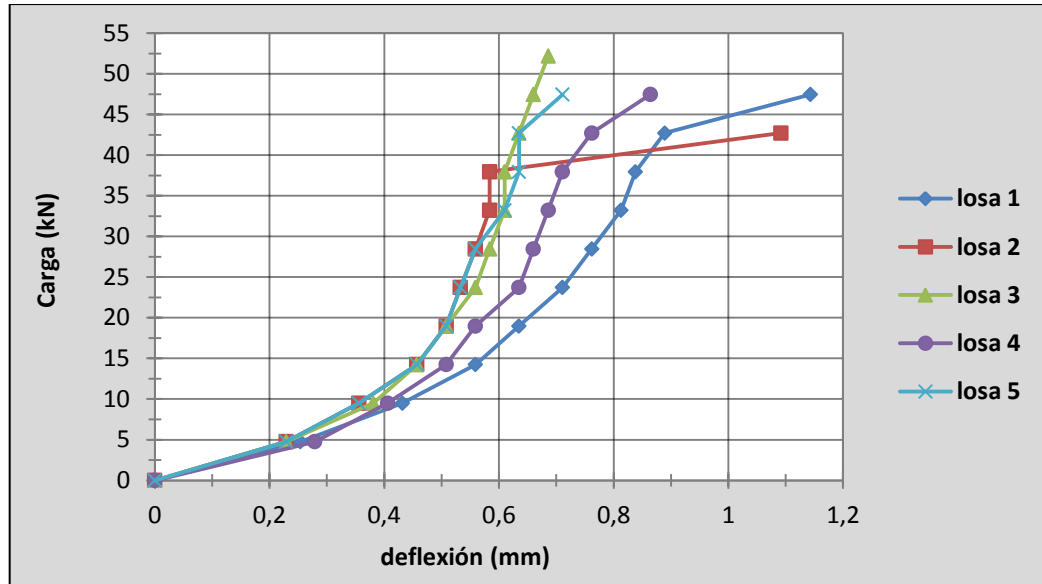
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	56	0	0
2	200	47	4,75	0,23
3	400	42	9,49	0,36
4	600	38	14,24	0,46
5	800	36	18,98	0,51
6	1 000	35	23,73	0,53
7	1 200	34	28,47	0,56
8	1 400	32	33,22	0,61
9	1 600	31	37,96	0,64
10	1 800	31	42,71	0,64
11	2 000	28	47,45	0,71
12	1 850	-	44	5
13	1 055	-	25	10
14	500	-	12	15
15	295	-	7	20
16	200	-	4,75	25
17	170	-	4	30

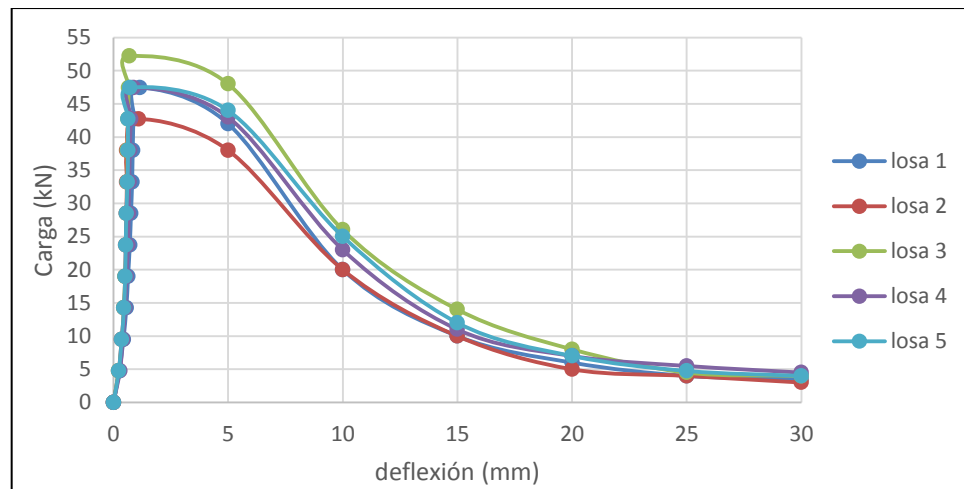
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación media

Tabla XLVI. **Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	105	0	0
2	200	92	4,75	0,33
3	400	89	9,49	0,41
4	600	84	14,24	0,53
5	800	81	18,98	0,61
6	1 000	78	23,73	0,69
7	1 200	75	28,47	0,76
8	1 400	72	33,22	0,84
9	1 600	72	37,96	0,84
10	1 800	70	42,71	0,89
11	1 950	29	46,27	1,93
12	1 770	-	42	5
13	1 050	-	25	10
14	550	-	13	15
15	340	-	8	20
16	230	-	5,5	25
17	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	61	0	0
2	200	56	4,75	0,13
3	400	48	9,49	0,33
4	600	44	14,24	0,43
5	800	41	18,98	0,51
6	1 000	39	23,73	0,56
7	1 200	37	28,47	0,61
8	1 400	35	33,22	0,66
9	1 600	34	37,96	0,69
10	1 800	32	42,71	0,74
11	2 000	25	47,45	0,91
12	1 835	-	43,5	5
13	1 055	-	25	10
14	630	-	15	15
15	380	-	9	20
16	250	-	6	25
17	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	169	0	0
2	200	155	4,75	0,36
3	400	146	9,49	0,58
4	600	137	14,24	0,81
5	800	130	18,98	0,99
6	1 000	124	23,73	1,14
7	1 200	119	28,47	1,27
8	1 400	111	33,22	1,47
9	1 600	87	37,96	2,08
10	1 800	76	42,71	2,36
11	2 000	45	47,45	3,15
12	2 100	20	49,83	3,79
13	1 685	-	40	5
14	1 000	-	24	10
15	500	-	12	15
16	315	-	7,5	20
17	230	-	5,5	25
18	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	54	0	0
2	200	49	4,75	0,13
3	400	44	9,49	0,25
4	600	38	14,24	0,41
5	800	35	18,98	0,48
6	1 000	32	23,73	0,56
7	1 200	30	28,47	0,61
8	1 400	28	33,22	0,66
9	1 600	26	37,96	0,71
10	1 800	25	42,71	0,74
11	2 000	23	47,45	0,79
12	2 200	0	52,2	1,37
13	1 430	-	34	5
14	840	-	20	10
15	500	-	12	15
16	340	-	8	20
17	250	-	6	25
18	210	-	5	30

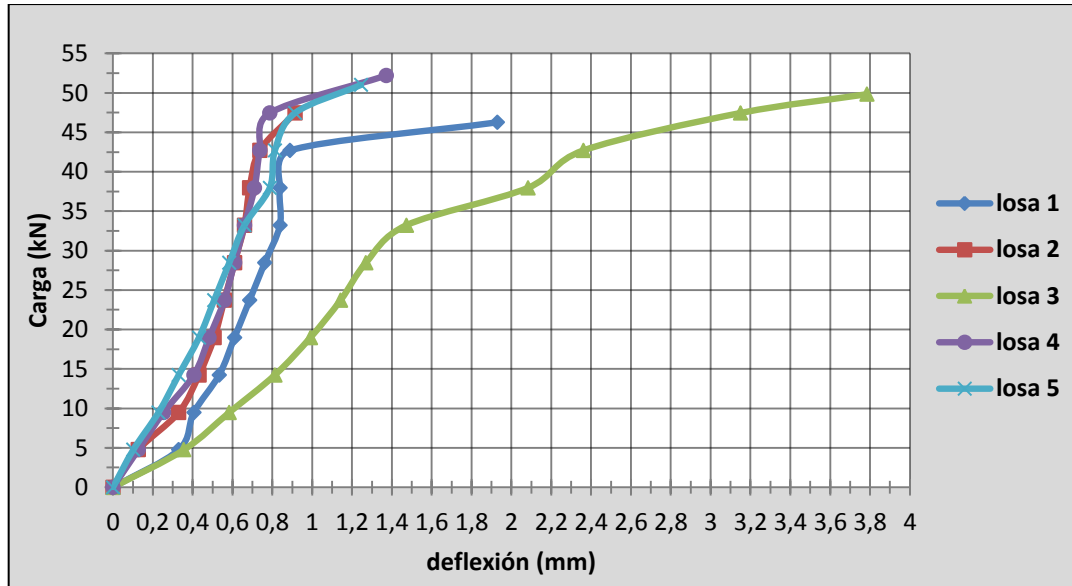
Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	99	0	0
2	200	95	4,75	0,10
3	400	90	9,49	0,23
4	600	86	14,24	0,33
5	800	82	18,98	0,43
6	1 000	79	23,73	0,51
7	1 200	76	28,47	0,58
8	1 400	73	33,22	0,66
9	1 600	68	37,96	0,79
10	1 800	67	42,71	0,81
11	2 000	63	47,45	0,91
12	2 150	50	51,01	1,24
13	1 475	-	35	5
14	840	-	20	10
15	500	-	12	15
16	295	-	7	20
17	210	-	5	25
18	170	-	4	30

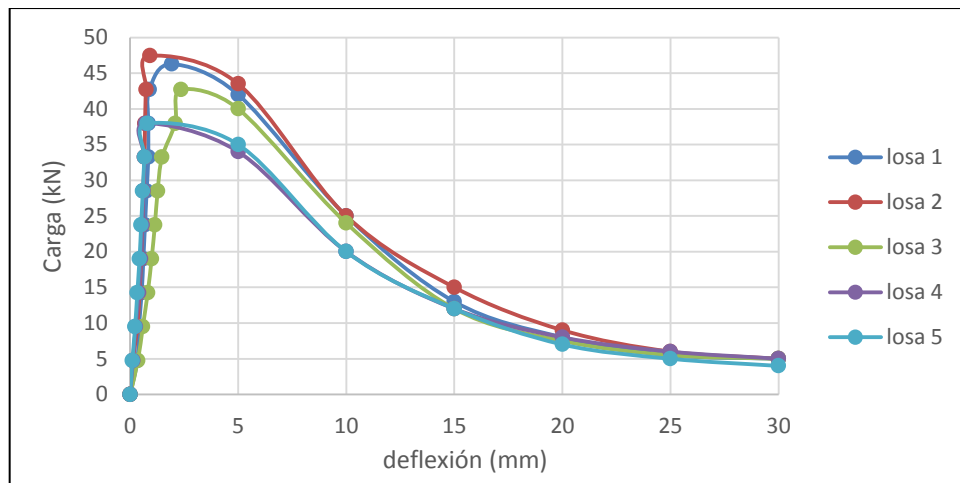
Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Gráfica carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Gráfica carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación alta

Tabla LI. **Datos obtenidos losa 1 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	167	0	0
2	200	159	4,75	0,20
3	400	151	9,49	0,41
4	600	145	14,24	0,56
5	800	134	18,98	0,84
6	1 000	128	23,73	0,99
7	1 200	120	28,47	1,19
8	1 400	116	33,22	1,30
9	1 600	111	37,96	1,42
10	1 800	74	42,71	2,36
11	2 000	51	47,45	2,95
12	1 895	-	45	5
13	1 000	-	24	10
14	630	-	15	15
15	420	-	10	20
16	295	-	7	25
17	250	-	6	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Datos obtenidos losa 2 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	94	0	0
2	200	81	4,75	0,33
3	400	72	9,49	0,56
4	600	65	14,24	0,74
5	800	58	18,98	0,91
6	1 000	53	23,73	1,04
7	1 200	46	28,47	1,22
8	1 400	39	33,22	1,40
9	1 600	34	37,96	1,52
10	1 800	30	42,71	1,63
11	2 000	27	47,45	1,70
12	2 150	0	51,01	2,39
13	2 020	-	48	5
14	1 180	-	28	10
15	760	-	18	15
16	460	-	11	20
17	270	-	6,5	25
18	230	-	5,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Datos obtenidos losa 3 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	147	0	0
2	200	131	4,75	0,41
3	400	113	9,49	0,86
4	600	105	14,24	1,07
5	800	92	18,98	1,40
6	1 000	82	23,73	1,65
7	1 200	76	28,47	1,80
8	1 400	72	33,22	1,91
9	1 600	68	37,96	2,00
10	1 475	-	35	5
11	930	-	22	10
12	590	-	14	15
13	760	-	18	20
14	250	-	6	25
15	210	-	5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Datos obtenidos losa 4 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	120	0	0
2	200	116	4,75	0,10
3	400	109	9,49	0,28
4	600	102	14,24	0,46
5	800	96	18,98	0,61
6	1 000	90	23,73	0,76
7	1 200	84	28,47	0,91
8	1 400	81	33,22	0,99
9	1 600	79	37,96	1,04
10	1 800	70	42,71	1,27
11	1 685	-	40	5
12	1 050	-	25	10
13	630	-	15	15
14	360	-	8,5	20
15	295	-	7	25
16	250	-	6	30

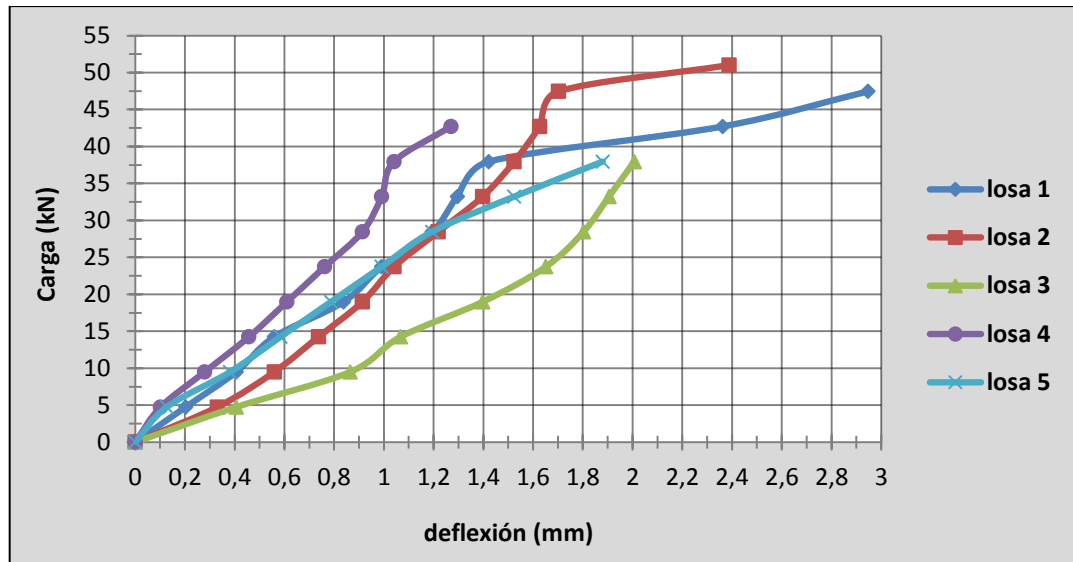
Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Datos obtenidos losa 5 de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	172	0	0
2	200	167	4,75	0,13
3	400	157	9,49	0,38
4	600	149	14,24	0,58
5	800	141	18,98	0,79
6	1 000	133	23,73	0,99
7	1 200	125	28,47	1,19
8	1 400	112	33,22	1,52
9	1 600	98	37,96	1,88
10	1 475	-	35	5
11	885	-	21	10
12	590	-	14	15
13	420	-	10	20
14	315	-	7,5	25
15	275	-	6,5	30

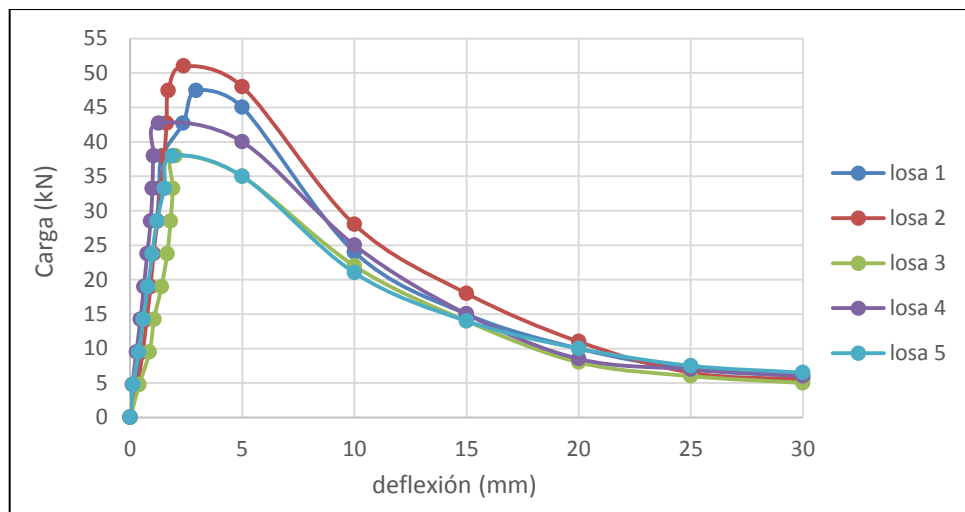
Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Gráfica carga–deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

4.2.5.2. Losas de 12 cm de espesor

Para estos ensayos se hicieron 3 losas por cada dosificación

- Dosificación baja

Tabla LVI. **Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	124	0	0
2	200	116	4,75	0,20
3	400	110	9,49	0,36
4	600	107	14,24	0,43
5	800	104	18,98	0,51
6	1 000	101	23,73	0,58
7	1 200	99	28,47	0,64
8	1 400	98	33,22	0,66
9	1 600	96	37,96	0,71
10	1 800	95	42,71	0,74
11	2 000	92	47,45	0,81
12	2 200	90	52,2	0,86
13	2 400	88	56,95	0,91
14	2 450	80	58,13	1,12
15	2 230	-	53	5
16	1 350	-	32	10
17	840	-	20	15
18	590	-	14	20
19	420	-	10	25
20	360	-	8,5	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	141	0	0
2	200	131	4,75	0,25
3	400	124	9,49	0,43
4	600	119	14,24	0,56
5	800	115	18,98	0,66
6	1 000	112	23,73	0,74
7	1 200	110	28,47	0,79
8	1 400	108	33,22	0,84
9	1 600	106	37,96	0,89
10	1 800	104	42,71	0,94
11	2 000	102	47,45	0,99
12	2 200	100	52,2	1,04
13	2 400	98	56,95	1,09
14	2 600	96	61,69	1,14
15	2 360	-	56	5
16	1 475	-	35	10
17	970	-	23	15
18	630	-	15	20
19	465	-	11	25
20	380	-	9	30

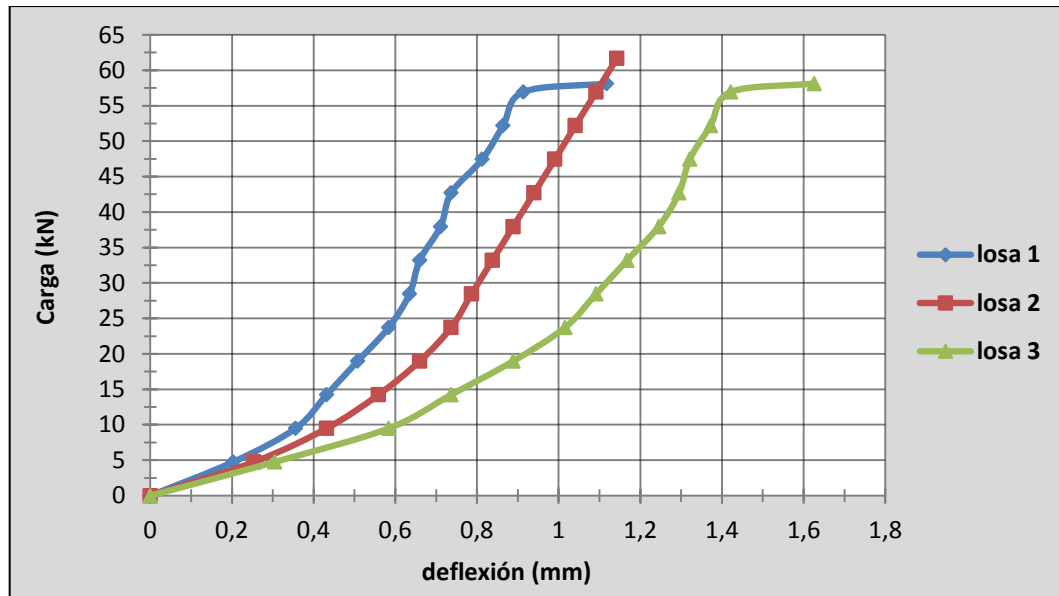
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	86	0	0
2	200	74	4,75	0,31
3	400	63	9,49	0,58
4	600	57	14,24	0,74
5	800	51	18,98	0,89
6	1 000	46	23,73	1,02
7	1 200	43	28,47	1,09
8	1 400	40	33,22	1,17
9	1 600	37	37,96	1,24
10	1 800	35	42,71	1,30
11	2 000	34	47,45	1,32
12	2 200	32	52,2	1,37
13	2 400	30	56,95	1,42
14	2 450	22	58,13	1,63
15	2 320	-	55	5
16	1 520	-	36	10
17	930	-	22	15
18	650	-	15,5	20
19	420	-	10	25
20	340	-	8	30

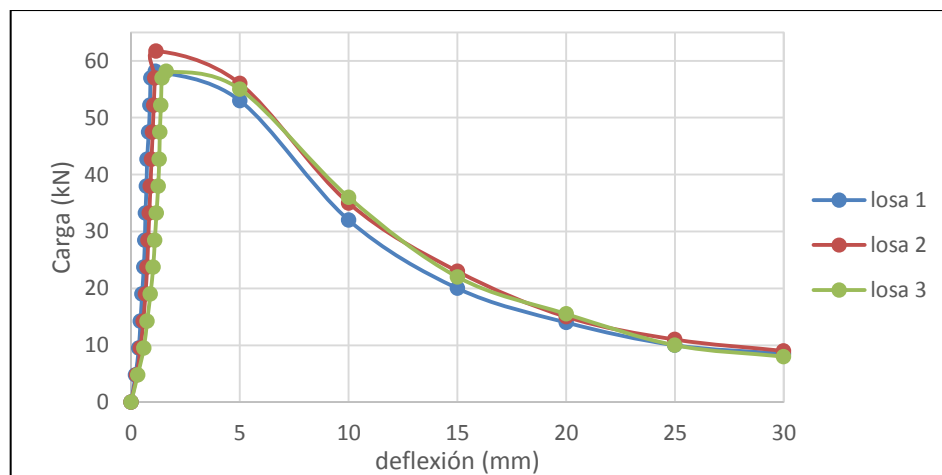
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Dosificación alta

Tabla LIX. **Datos obtenidos losa 1 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	114	0	0
2	200	104	4,75	0,25
3	400	98	9,49	0,41
4	600	89	14,24	0,64
5	800	80	18,98	0,86
6	1 000	75	23,73	0,99
7	1 200	72	28,47	1,07
8	1 400	70	33,22	1,12
9	1 600	67	37,96	1,19
10	1 800	65	42,71	1,25
11	2 000	64	47,45	1,27
12	2 200	62	52,2	1,32
13	2 400	60	56,95	1,37
14	2 600	60	61,69	1,37
15	2 800	55	66,44	1,50
16	2 525	-	60	5
17	1 685	-	40	10
18	1 050	-	25	15
19	630	-	15	20
20	465	-	11	25
21	420	-	10	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Datos obtenidos losa 2 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	96	0	0
2	200	85	4,75	0,28
3	400	78	9,49	0,46
4	600	72	14,24	0,61
5	800	68	18,98	0,71
6	1 000	65	23,73	0,79
7	1 200	62	28,47	0,86
8	1 400	60	33,22	0,91
9	1 600	59	37,96	0,94
10	1 800	57	42,71	0,99
11	2 000	55	47,45	1,04
12	2 200	54	52,2	1,07
13	2 400	52	56,95	1,12
14	2 600	50	61,69	1,17
15	2 800	45	66,44	1,30
16	2 570	-	61	5
17	1 770	-	42	10
18	1 180	-	28	15
19	675	-	16	20
20	500	-	12	25
21	420	-	10	30

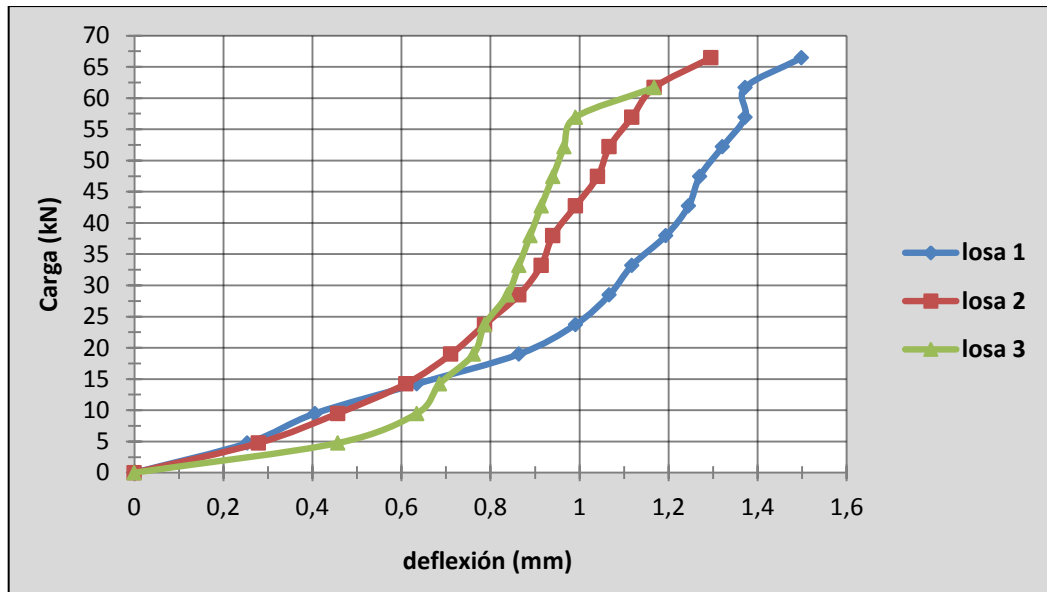
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Datos obtenidos losa 3 de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**

Núm. de lectura	Equipo		Norma	
	Presión	Deformación	Carga	Deflexión
	(psi)	(0,001")	(kN)	(mm)
1	0	131	0	0
2	200	113	4,75	0,46
3	400	106	9,49	0,64
4	600	104	14,24	0,69
5	800	101	18,98	0,76
6	1 000	100	23,73	0,79
7	1 200	98	28,47	0,84
8	1 400	97	33,22	0,86
9	1 600	96	37,96	0,89
10	1 800	95	42,71	0,91
11	2 000	94	47,45	0,94
12	2 200	93	52,2	0,97
13	2 400	92	56,95	0,99
14	2 600	85	61,69	1,17
15	2 320	-	55	5
16	1 350	-	32	10
17	840	-	20	15
18	550	-	13	20
19	465	-	11	25
20	420	-	10	30

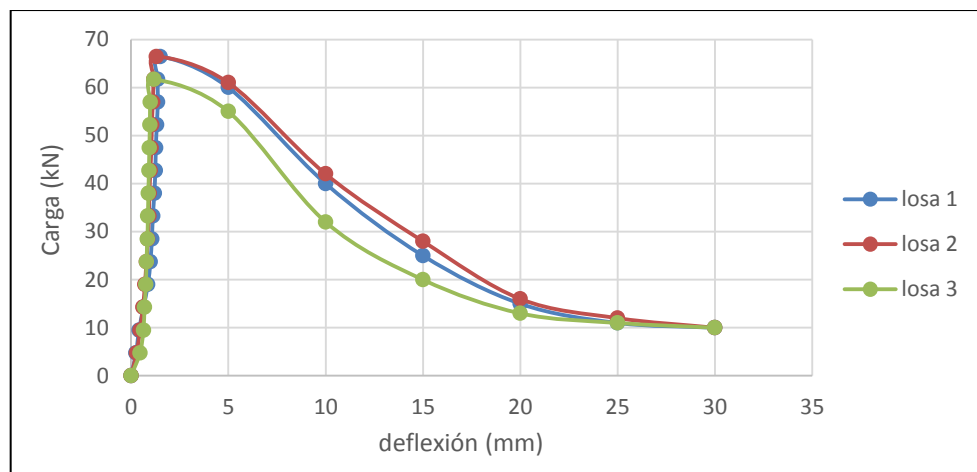
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Gráfica carga–deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica según Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

4.2.6. Deformación

Es el cambio de forma de un cuerpo, que puede ser ocasionado por un esfuerzo, cambio térmico o de humedad. Junto con el esfuerzo directo, la deformación se supone como cambio lineal y se mide en unidades de longitud. La deformación se mide como ángulo de torsión entre dos secciones dadas, en los ensayos de torsión.

La deformación unitaria debida a un esfuerzo es un número sin dimensional o una razón. Se define como el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo que va acompañado por un cambio de esfuerzo. Por lo tanto, su cálculo se puede realizar de la siguiente manera:

$$\varepsilon = e/L$$

ε = deformación unitaria

e = deformación

L = longitud de elemento

La deformación puede ser plástica o elástica, la deformación plástica es irreversible o permanente, es decir que el material no regresa a su forma original después de haberle aplicado y retirado la carga. La deformación elástica es reversible, el cuerpo recupera su forma original al retirar la carga aplicada. En la deformación el material presenta cambios en su estado tensional aumenta su energía potencial elástica. La diferencia es que en la plástica los cambios termodinámicos son irreversibles, en cambio en la elástica el elemento experimenta cambios termodinámicos reversibles.

4.3. Ensayo de concreto a flexión según Norma ASTM C-78

Este método de ensayo se hace para determinar la resistencia a la flexión del concreto utilizando una viga simple con carga en los tercios medios y apoyos en sus extremos.

4.3.1. Procedimiento y equipo para el ensayo

Se hacen las vigas en moldes prismáticos con las dimensiones requeridas de (6 x 6 x 21) pulg, o (15 x 15 x 53) cm Los moldes son metálicos, cada lateral longitudinal está unida con bisagras a la placa inferior y con mariposas a los laterales transversales, el molde se abre de los 4 lados y facilita sacar la viga. Aunque como se mencionó anteriormente se usa un desmoldante para evitar complicaciones. Se desmoldan a las 24 horas, para colocarlas en humedad. El ensayo se hizo a los 28 días de edad de las vigas.

Las vigas se ensayaron en la máquina universal Baldwin con capacidad máxima de 60 000 kg, en donde se acomodaron para aplicarles carga, se pusieron los apoyos a aproximadamente 2,5 cm de los bordes de la viga. La carga fue aplicada a $L/3$.

La figura 59 (a) y (b) muestra la máquina universal para hacer el ensayo a flexión de la viga. También en (c) los apoyos y la aplicación de carga en la viga.

Figura 59. **Máquina universal Baldwin**



(a)



(b)



(c)

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Para realizar el ensayo se debe seguir el procedimiento:

- Identificar la viga a ensayar.
- Medir las dimensiones de la viga de acuerdo a lo normado. Así mismo tomar la medida de la distancia entre apoyos.
- Marcar la viga a L/3.
- Preparar la máquina universal para colocar y aplicar cargas a la probeta, evitando dejar la parte irregular de la misma perpendicular a las cargas, la máquina aplica carga constante a aproximadamente 10 kg/cm²/min.
- Realizar el ensayo, tomando nota de la carga máxima que soporta cada probeta.
- Hacer los cálculos y presentar los resultados.

4.3.2. Consideraciones

Se hacen estos ensayos para determinar la capacidad que tiene el concreto de soportar cargas y resistir la flexión a la que se someten. A continuación se muestran la cantidad de probetas de concreto que se hicieron.

Tabla LXII. Vigas para ensayar a flexión

Cantidad de vigas	Edad (días)	Refuerzo	Dosificación (kg/m ³)	Dosis
3	28	-	-	-
3	28	Fibra polipropileno	2,00	Baja
3	28	Fibra polipropileno	8,00	Alta
3	28	Fibra metálica	30,00	Baja
3	28	Fibra metálica	45,00	Alta

Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Concreto sin refuerzo

Se ensayaron tres vigas de concreto sin refuerzo.

Tabla LXIII. **Datos del ensayo de probetas de concreto simple Norma ASTM C-78**

Probeta	Alto (cm)	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Carga máxima (kg)
Viga 1	15,15	15,25	52,40	47,40	3 200
Viga 2	15,20	15,15	53,85	49,00	3 060
Viga 3	15,30	15,35	53,80	48,80	3 620
Promedio	15,22	15,25	53,35	48,40	3 293

Fuente: elaboración propia.

4.3.4. Concreto fibroreforzado con polipropileno

Se ensayaron tres vigas para cada dosificación de fibras.

Tabla LXIV. **Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis baja fibra de polipropileno Norma ASTM C-78**

Probeta	Alto (cm)	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Carga máxima (kg)
Viga 1	15,60	15,60	52,85	47,80	3 800
Viga 2	15,60	15,30	52,30	47,25	3 500
Viga 3	15,80	15,60	53,50	48,50	4 100
Promedio	15,67	15,50	52,88	47,85	3 800

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. **Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis alta fibra de polipropileno Norma ASTM C-78**

Probeta	Alto (cm)	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Carga máxima (kg)
Viga 1	15,50	15,15	53,17	48,20	3 100
Viga 2	15,55	15,20	53,50	48,40	3 140
Viga 3	15,70	15,60	53,00	48,20	3 000
Promedio	15,58	15,32	53,22	48,27	3 080

Fuente: elaboración propia.

4.3.5. **Concreto reforzado con fibras metálicas**

Se ensayaron tres vigas para cada dosificación de fibras.

Tabla LXVI. **Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis baja fibra metálica Norma ASTM C-78**

Probeta	Alto (cm)	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Carga máxima (kg)
Viga 1	15,30	15,50	53,85	48,80	3 800
Viga 2	15,25	15,40	54,55	49,50	3 825
Viga 3	15,65	15,55	53,35	48,40	3 900
Promedio	15,40	15,48	53,92	48,90	3 842

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Datos del ensayo de probetas de concreto con dosis alta fibra metálica Norma ASTM C-78**

Probeta	Alto (cm)	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Carga máxima (kg)
Viga 1	15,50	15,45	53,00	47,80	4 000
Viga 2	15,40	15,85	52,60	47,50	3 050
Viga 3	15,80	15,65	53,67	48,70	3 100
Promedio	15,57	15,65	53,09	48,00	3 383

Fuente: elaboración propia.

4.4. Resultados obtenidos

A partir de los datos obtenidos mediante los ensayos a flexión de los elementos se procede a calcular los resultados. Se hace el promedio de datos de las losas de concreto simple y concreto fibroreforzado. Estos resultados se grafican para observar el comportamiento de la gráfica media para cada losa. En el caso de las vigas, se calcula el módulo de rotura y la carga última que soportan estos elementos.

- Losas sin refuerzo

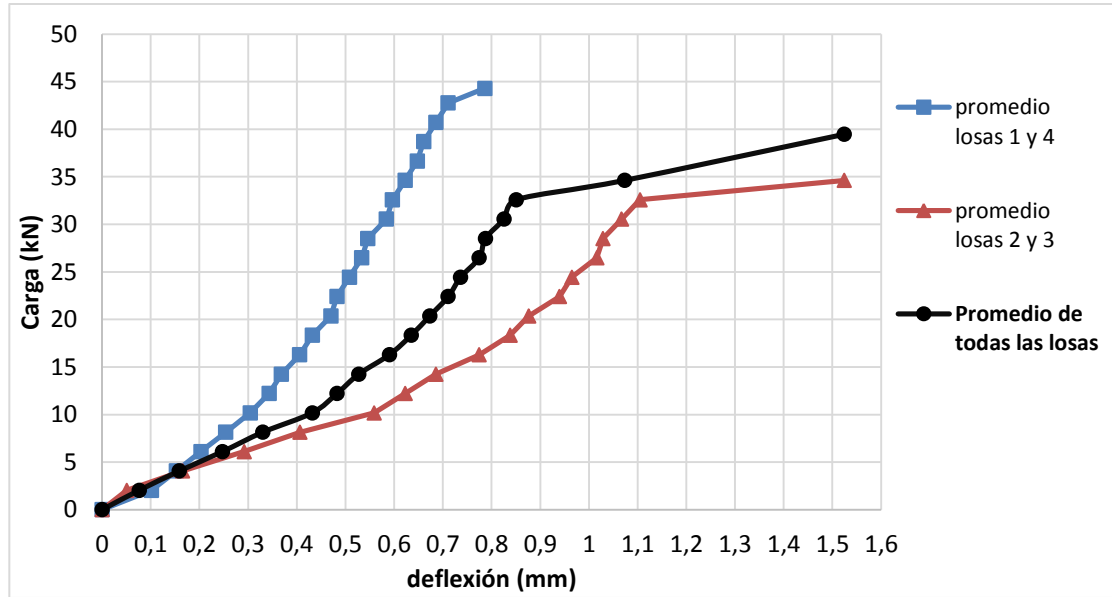
Tabla LXVIII. **Promedio de losas sin refuerzo de 10 cm de espesor**

Carga (kN)	Deflexión (mm)
0	0,00
2,04	0,08
4,07	0,16
6,11	0,25
8,15	0,33
10,18	0,43
12,22	0,48
14,25	0,53
16,29	0,59
18,33	0,64
20,36	0,67
22,4	0,71
24,44	0,74
26,47	0,77
28,51	0,79
30,55	0,83
32,58	0,85
34,62	1,07
39,50	1,52

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica de la figura 37 existe una dispersión muy grande entre dos pares de gráficas. Como es mucho mayor a la aceptada estadísticamente se hace el promedio de cada par de gráficas similares (losas 1 y 4, losas 2 y 3).

Figura 60. **Gráfica de la media de carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, sin refuerzo**



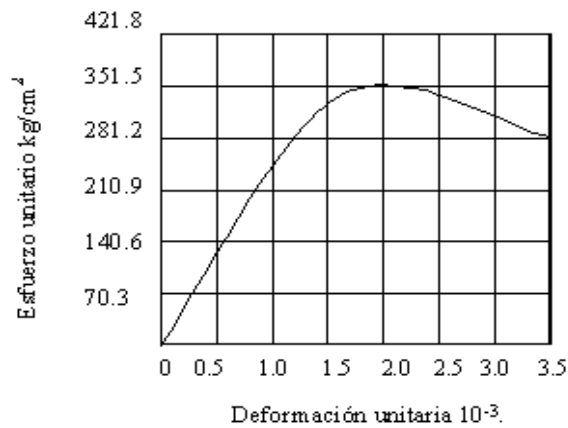
Fuente: elaboración propia.

La gráfica muestra el valor de la media de todas las losas sin refuerzo. Esto se hace para analizar el comportamiento y la tendencia del concreto a resistir cargas a flexión. El valor último es de 33 kN y el punto de ruptura se da cuando el concreto de estas losas soporta 39 kN y tiene una deflexión de 1,53 mm (este valor corresponde a longitud entre apoyos de la muestra multiplicada por la deformación unitaria del concreto simple: $500 \text{ mm} \times 0,003 = 1.50 \text{ mm}$)

Si se compara la gráfica de la figura 60 con la gráfica típica del concreto de la figura 61 se nota que la falla del concreto tiende a ser frágil. En el ensayo a flexión el concreto se somete a tensión y compresión, cuando se carga la losa, el concreto se empieza a tensionar. Sucesivamente se da una compresión

hasta llegar a su falla, en donde el concreto quiebra súbitamente (como característica de los concretos con mayor resistencia).

Figura 61. **Curva típica esfuerzo-deformación para concreto de 350 kg/cm²**



Fuente: AGUILAR, Heber. *La deformación del concreto*.

<http://tecaguilarblog.blogspot.com/2015/07/semana-13.html>. Consulta: 20 de noviembre de 2015.

Figura 62. **Losa de 10 cm de espesor de concreto simple ensayada**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Del espesor de la losa, la mitad trabaja a tensión y la otra mitad a compresión. Por eso en la figura 62 se muestra la losa que falla frágilmente y que tiene un cambio de dirección la grieta justo a la mitad en su espesor.

También se observa el efecto dovela en los agregados de la losa, como en la figura 63.

Figura 63. **Efecto dovela en los agregados de la losa de 10 cm de espesor de concreto simple**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

La tensión en el concreto corresponde del 8 % al 12 % de su resistencia a la compresión, entonces:

$$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{espesor} = 100 \text{ mm}$$

$$\text{deformación unitaria} = 0,003$$

$$100 \text{ mm} * 0,003 = 0,3 \text{ mm}$$

En la gráfica promedio de la figura 60, para la deflexión de 0,3 mm la carga que resiste es de 8 kN o 80 kg. Según los ensayos, el eje de la falla es exactamente a la mitad del espesor de la losa (5 cm) se determina que:

$$\frac{80 \text{ kg}}{5 \text{ cm} * 0,5 \text{ cm}} = 32 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia a la tensión se encuentra en el rango del 8 % al 12 % siendo de 9 %, ya que $350 \text{ kg/cm}^2 * 0,09 = 32 \text{ kg/cm}^2$.

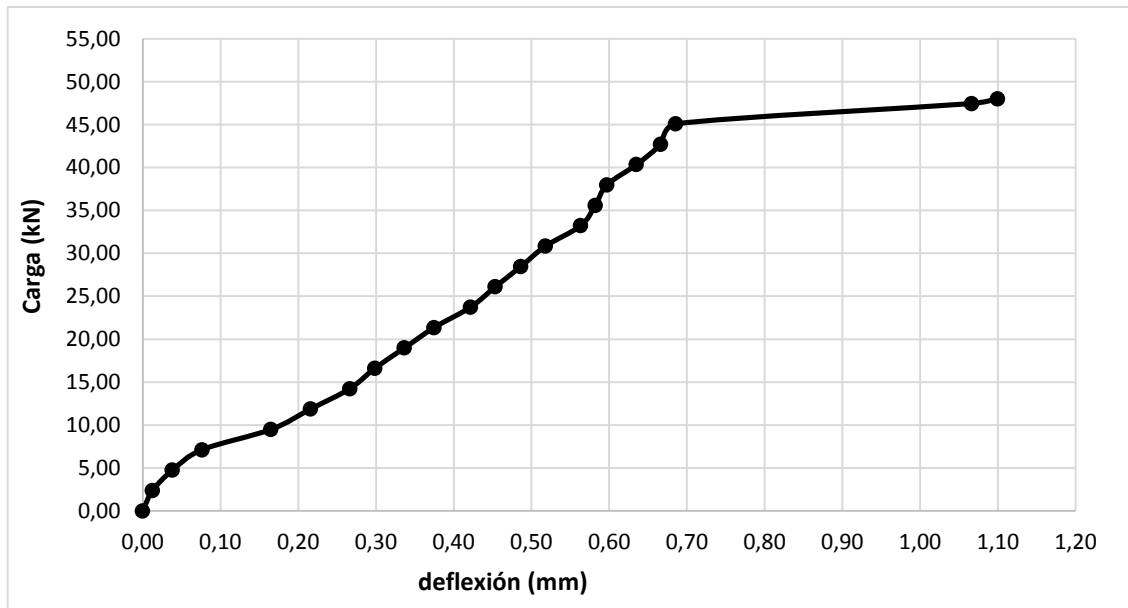
Tabla LXIX. **Promedio de losas sin refuerzo de 12 cm de espesor**

Carga (kN)	Deflexión (mm)
0,00	0,00
2,37	0,01
4,75	0,04
7,12	0,08
9,49	0,17
11,86	0,22
14,24	0,27
16,61	0,30
18,98	0,34
21,35	0,37
23,73	0,42
26,10	0,45
28,47	0,49
30,85	0,52
33,22	0,56
35,59	0,58
37,96	0,60
40,34	0,64
42,71	0,67
45,08	0,69
47,45	1,07
53,40	1,10

Fuente: elaboración propia.

Para analizar el comportamiento de las losas sin refuerzo de 12 cm de espesor sometidas a flexión ver las gráficas que se muestran en la figura 38. Se hace el promedio de las mismas.

Figura 64. **Gráfica de la media de carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, sin refuerzo**



Fuente: elaboración propia.

Se observa la limitada ductilidad a esfuerzos de compresión del concreto. Desde el punto donde la carga es de 45 kN y su deflexión de 0,7 mm se ve una tendencia del concreto a deformarse bastante aunque la carga no aumente considerablemente. A pesar que el material está débil sigue soportando carga hasta llegar al último punto donde falla abruptamente. La dispersión entre graficas se hace más evidente porque hay más volumen de concreto.

Al igual que la losa de 10 cm de espesor, la falla del concreto simple de la losa de 12 cm tiende a ser frágil. En el ensayo a flexión el concreto se somete a tensión y compresión, hasta llegar a su falla, en donde el concreto quiebra súbitamente.

Figura 65. **Losa de 12 cm de espesor de concreto simple ensayada**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Figura 66. **Efecto dovela en los agregados de la losa de 12 cm de espesor de concreto simple**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

La tensión en el concreto corresponde del 8 % al 12 % de su resistencia a la compresión, se toma el 10 %. Entonces la resistencia a la tensión es de 35 kg/cm², se supone que la zona de tensión corresponde a la mitad del espesor de la losa, siendo de 6 cm, entonces: 35 kg/cm² * 6 cm * 1 cm = 210 kg. Esto es lo que soporta el elemento a tensión. Se obtiene un aumento significativo en la resistencia a la tensión, si se compara con la losa de 10 cm de espesor.

$$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{espesor} = 120 \text{ mm}$$

$$\text{deformación unitaria} = 0,003$$

$$120 \text{ mm} * 0,003 = 0,36 \text{ mm}$$

En la gráfica promedio de la figura 60, para la deflexión de 0,36 mm la carga que resiste es de 20,5 kN o 205 kg. Siendo esto aproximadamente los 210 kg calculados anteriormente.

- Losas reforzadas con fibra de polipropileno

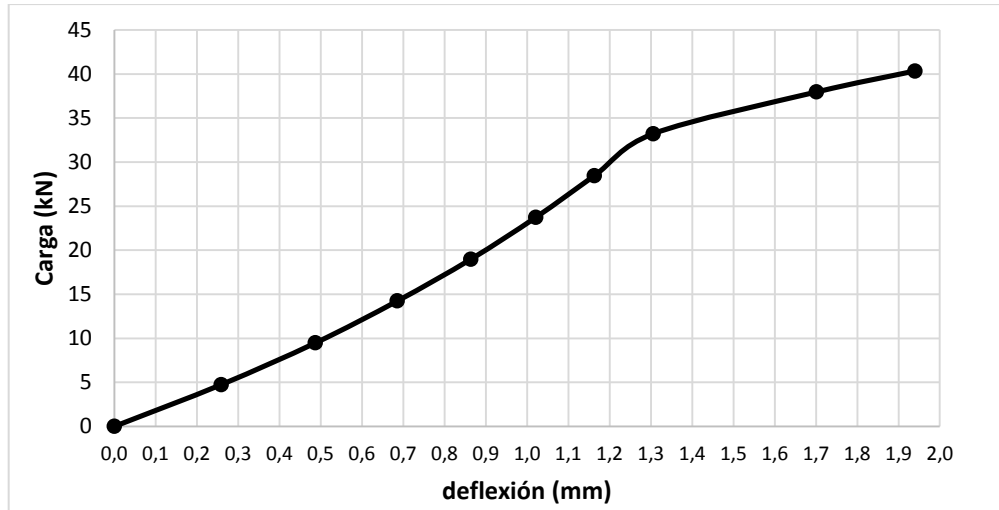
Tabla LXX. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0,00	0,00	Compresión
4,75	0,26	
9,49	0,49	
14,24	0,69	
18,98	0,86	Flexo compresión
23,73	1,02	
28,47	1,16	
33,22	1,31	Tensión
37,96	1,70	
40,00	1,94	
35,2	5	
20,4	10	
11,4	15	
7,5	20	
5,9	25	
5	30	

Fuente: elaboración propia.

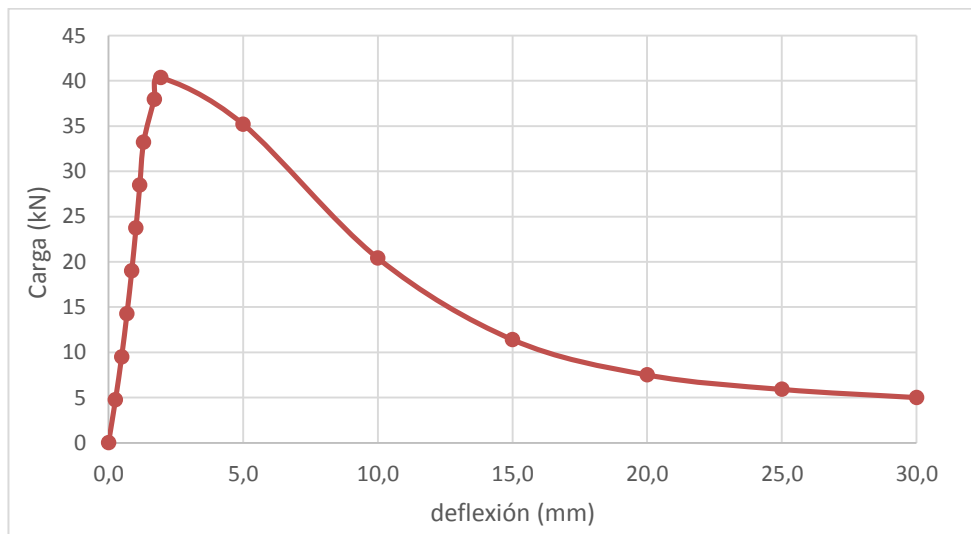
En la figura 39 la dispersión que tienen las gráficas es aceptable, a pesar que el procedimiento de mezclado y vertido fue el mismo. Haciendo dos losas por bacheada y una bacheada para la losa restante, que fue la que varió su comportamiento respecto a las otras cuatro.

Figura 67. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXI. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis media de fibra de polipropileno**

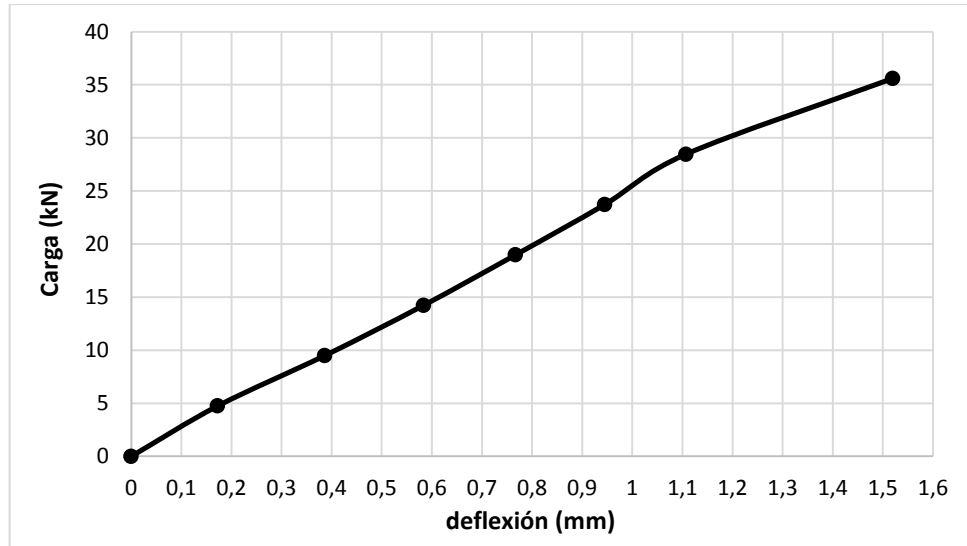
Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0	Compresión
4,75	0,17	
9,49	0,39	
14,24	0,58	Flexo Compresión
18,98	0,77	
23,73	0,95	
28,47	1,11	Tensión
36,00	1,52	
32,8	5	
17,4	10	
11,4	15	
8,5	20	
6,2	25	
4,65	30	

Fuente: elaboración propia.

Las gráficas de la figura 41 muestran una mejor dispersión, además por la forma de las gráficas evidencia una misma tendencia.

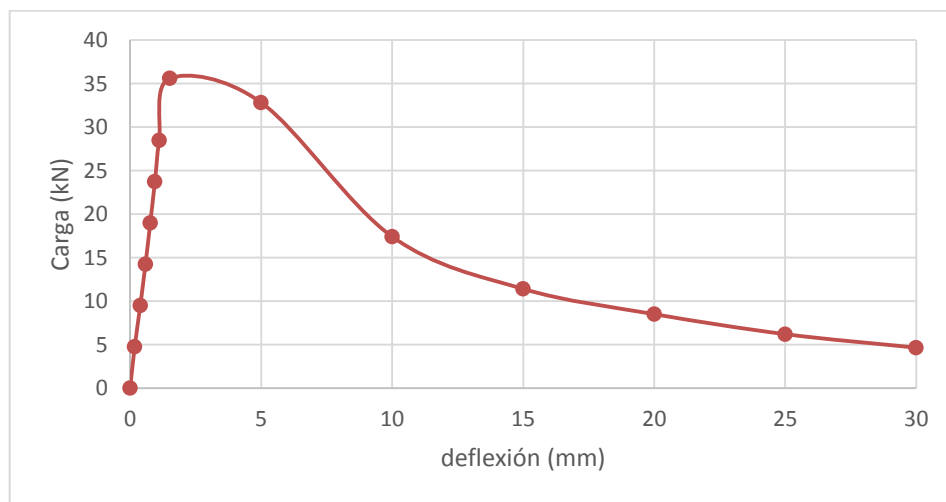
En la gráfica promedio que resulta de las 5 losas ensayadas el material compuesto ya presenta un poco más de ductilidad, aunque poca. El promedio de las gráficas se muestra en la figura 69.

Figura 69. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis media fibra polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

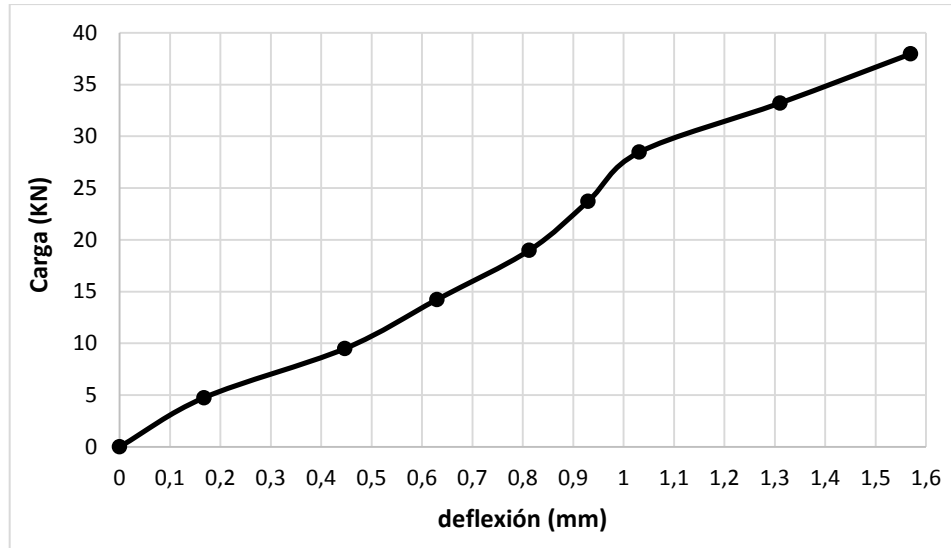
Tabla LXXII. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis alta de fibra de polipropileno**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0	Compresión
4,75	0,17	
9,49	0,45	
14,24	0,63	Flexo compresión
18,98	0,81	
23,73	0,93	Tensión
28,47	1,03	
33,22	1,31	
38,00	1,57	
34	5	
18	10	
12	15	
9	20	
6,7	25	
5,6	30	

Fuente: elaboración propia.

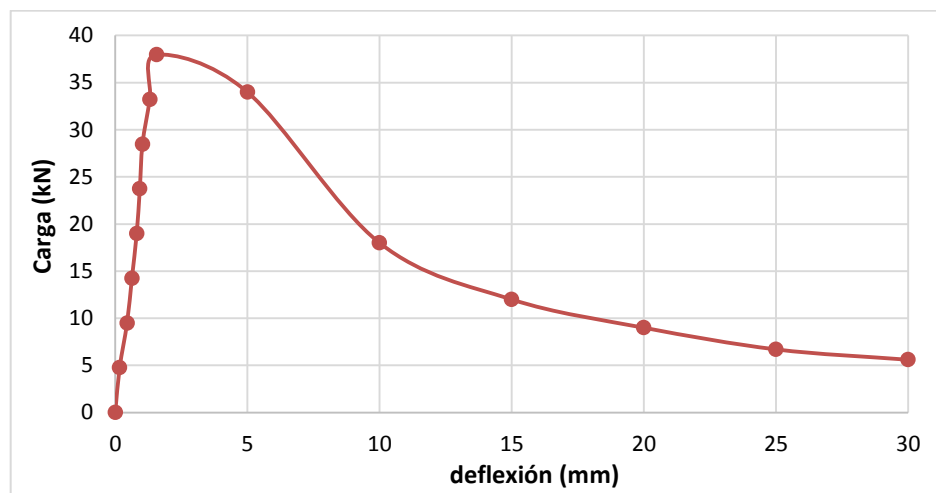
En la figura 43 se observa que la dispersión entre gráficas es considerable, se hace la gráfica promedio de las 5 losas en la figura 71.

Figura 71. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia

Figura 72. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

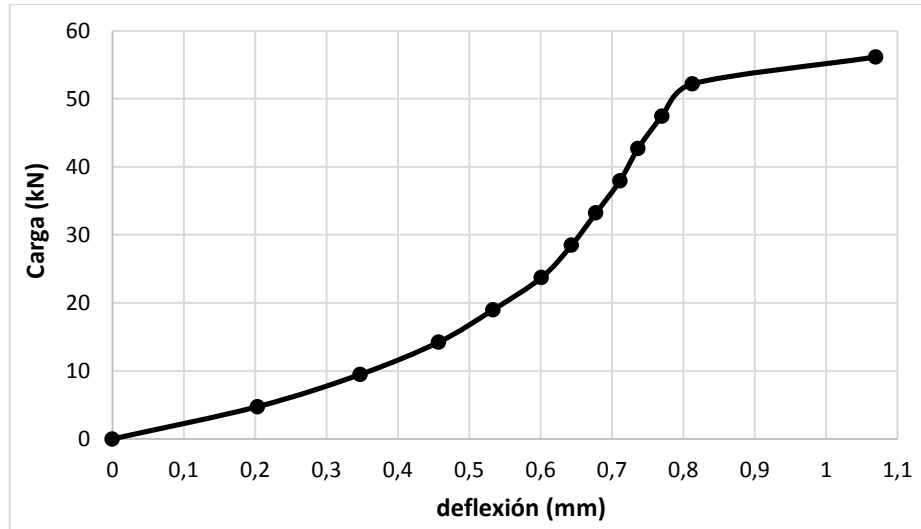
Tabla LXXIII. **Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis baja de fibra de polipropileno**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0	Compresión
4,75	0,20	
9,49	0,35	
14,24	0,46	
18,98	0,53	
23,73	0,60	
28,47	0,64	Flexo compresión
33,22	0,68	
37,96	0,71	
42,71	0,74	
47,45	0,77	Tensión
52,2	0,81	
56,00	1,07	
51,67	5	
30	10	
19,33	15	
13,67	20	
11	25	
10	30	

Fuente: elaboración propia.

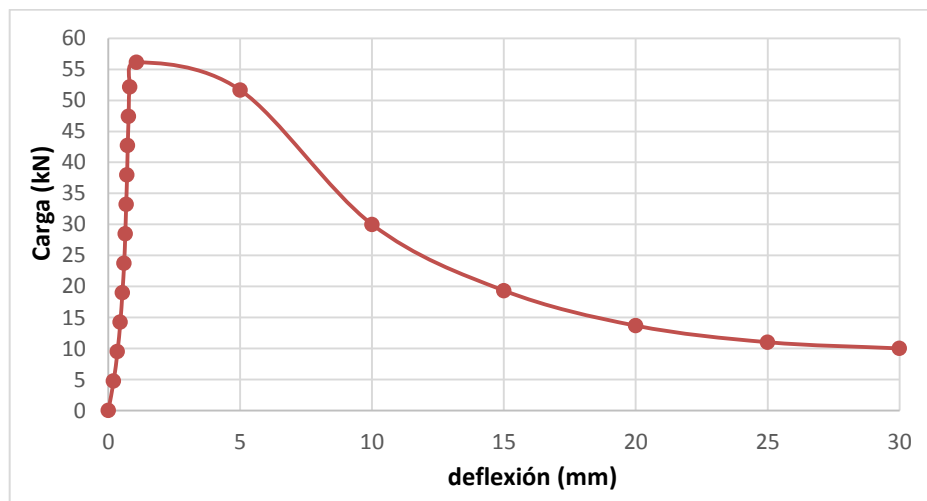
La gráfica de la losa 1 difiere un poco en forma a las gráficas de las otras dos losas en la figura 45. La gráfica promedio de las tres losas ensayadas se presenta en la figura 73, la que sirve para ver las características del material con fibra de polipropileno en dosis baja, en losas con más volumen de concreto.

Figura 73. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis baja fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

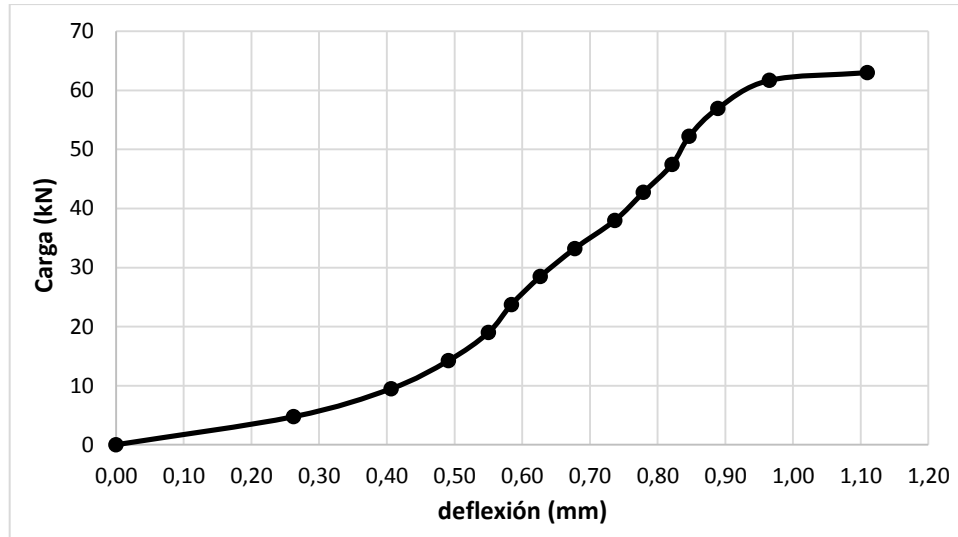
Tabla LXXIV. **Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis alta de fibra de polipropileno**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0,00	Compresión
4,75	0,26	
9,49	0,41	
14,24	0,49	
18,98	0,55	
23,73	0,58	
28,47	0,63	Flexo compresión
33,22	0,68	
37,96	0,74	
42,71	0,78	
47,45	0,82	
52,2	0,85	Tensión
56,95	0,89	
61,69	0,97	
63,00	1,11	
55,67	5	
33	10	
22	15,00	
16,67	20,00	
13,67	25,00	
11,83	30,00	

Fuente: elaboración propia.

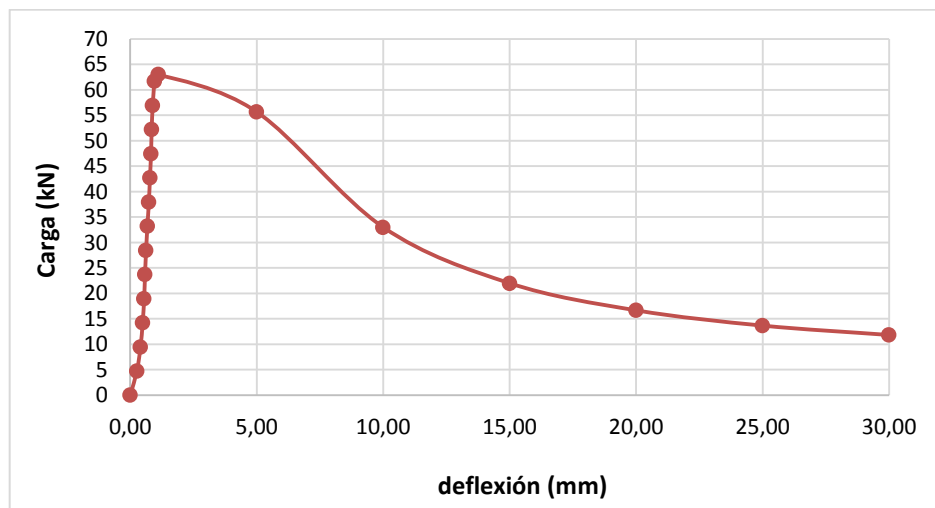
Al igual que las losas anteriores, en la figura 47, la gráfica de la losa 1 difiere en su forma, a las demás. Es importante analizar la gráfica promedio de las tres losas, ver figura 75.

Figura 75. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra de polipropileno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis alta fibra de polipropileno Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

- Losas reforzadas con fibras metálicas

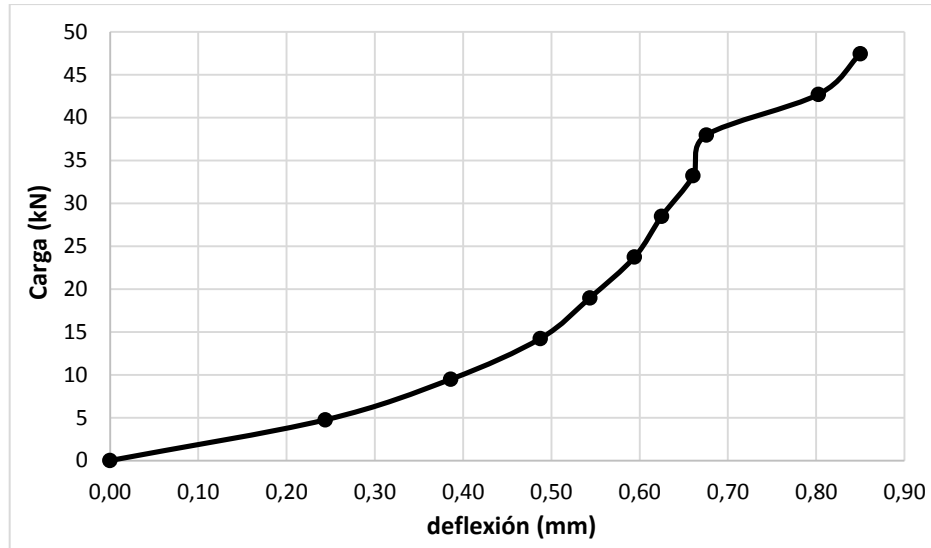
Tabla LXXV. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis baja de fibra metálica**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0,00	Compresión
4,75	0,24	
9,49	0,39	
14,24	0,49	
18,98	0,54	Flexo compresión
23,73	0,59	
28,47	0,62	
33,22	0,66	
37,96	0,68	Tensión
42,71	0,80	
47,00	0,85	
43	5	
22,8	10	
11,4	15,00	
6,6	20,00	
4,55	25,00	
3,8	30,00	

Fuente: elaboración propia.

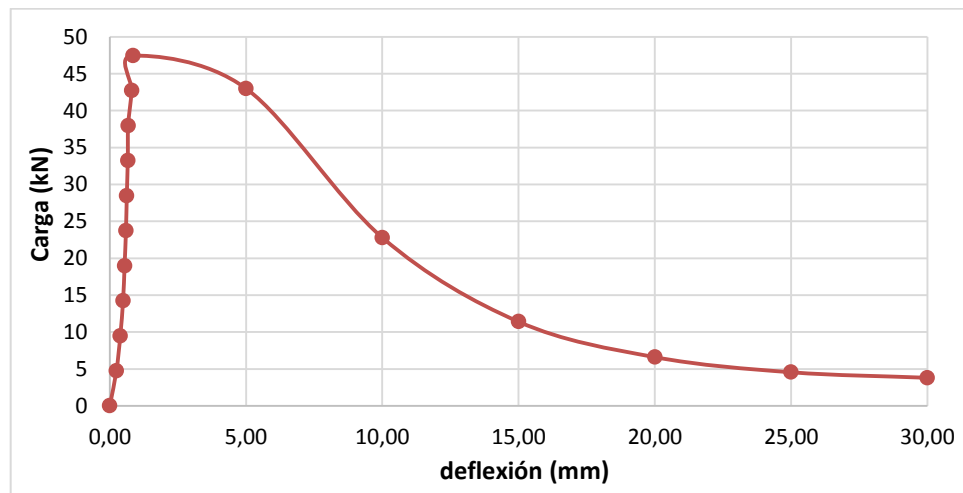
La dispersión entre losas es muy buena. En la figura 49 se observa que las gráficas de las losas ensayadas son parecidas, la gráfica promedio de estas losas con fibra metálica en dosis baja se puede ver en la figura 77.

Figura 77. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

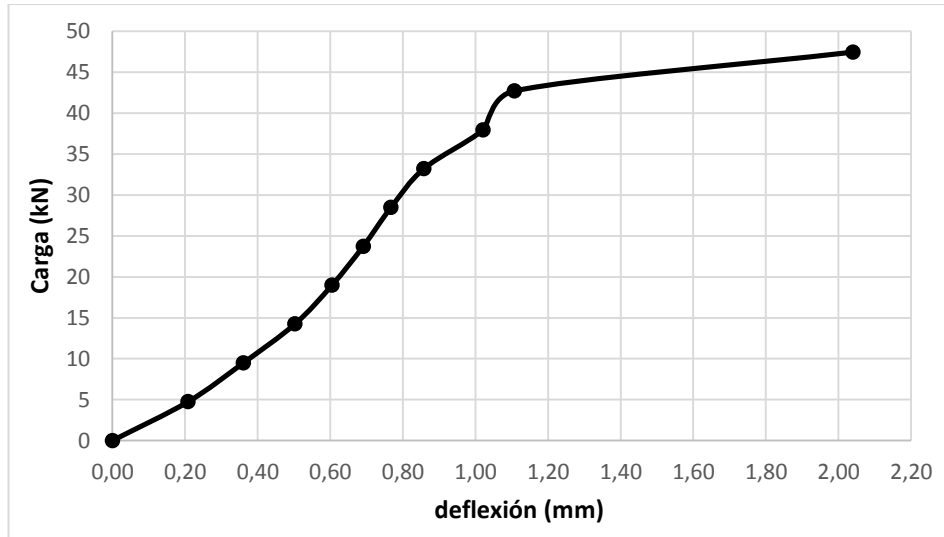
Tabla LXXVI. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis media de fibra metálica**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0,00	Compresión
4,75	0,21	
9,49	0,36	
14,24	0,50	
18,98	0,60	
23,73	0,69	
28,47	0,77	Flexo compresión
33,22	0,86	
37,96	1,02	
42,71	1,11	Tensión
47,00	2,04	
38,9	5	
22,8	10	
12,8	15,00	
7,9	20,00	
5,6	25,00	
4,8	30,00	

Fuente: elaboración propia.

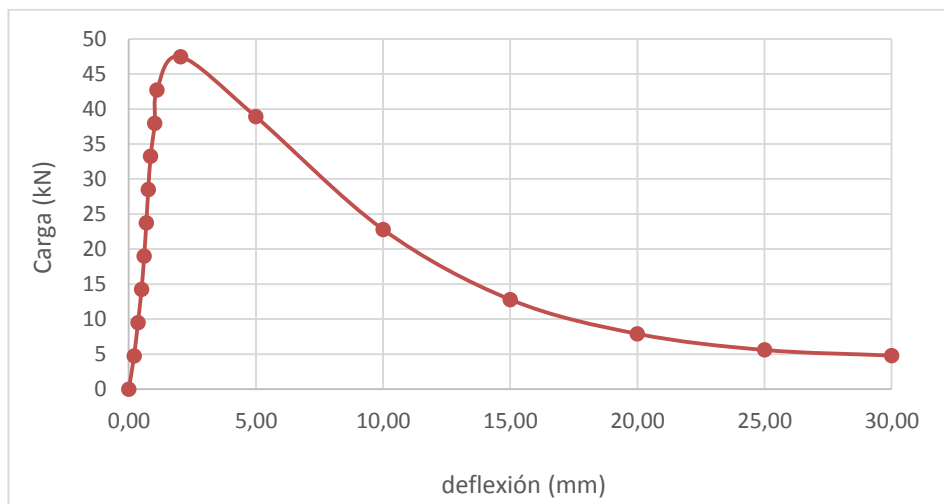
Según los datos obtenidos y graficados en la figura 51, las losas tienen dispersión aceptable estadísticamente, exceptuando la losa 3. Esta se extiende más que las otras llegando a soportar carga similar a las demás pero su deflexión es mucho mayor. En la figura 79 se muestra la gráfica promedio.

Figura 79. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis media fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 80. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis media fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

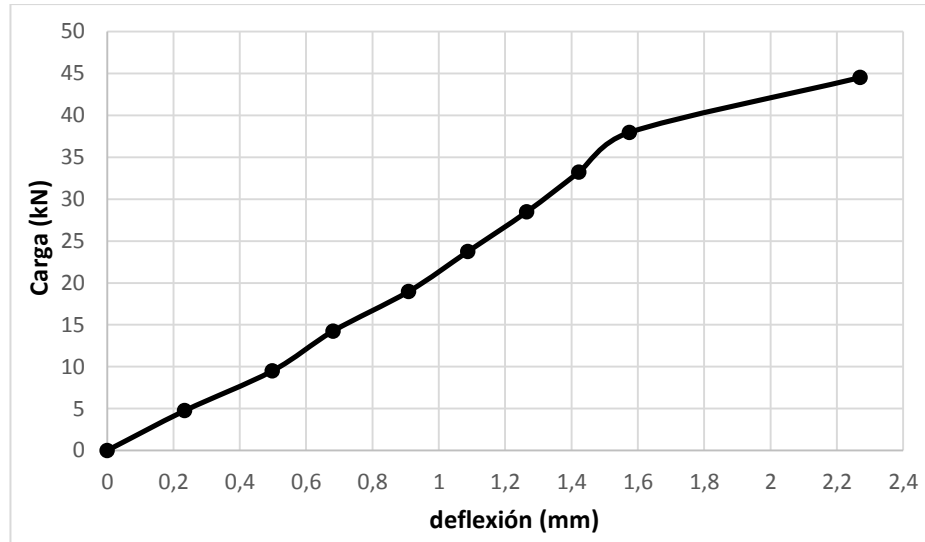
Tabla LXXVII. **Promedio de losas de 10 cm de espesor, dosis alta de fibra metálica**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0	Compresión
4,75	0,2336	
9,49	0,4978	
14,24	0,6808	
18,98	0,9092	
23,73	1,0872	Flexo compresión
28,47	1,2648	
33,22	1,4224	
37,96	1,5748	Tensión
45,00	2,27	
40,6	5	
24	10	
15,2	15	
9,5	20	
6,8	25	
5,8	30	

Fuente: elaboración propia.

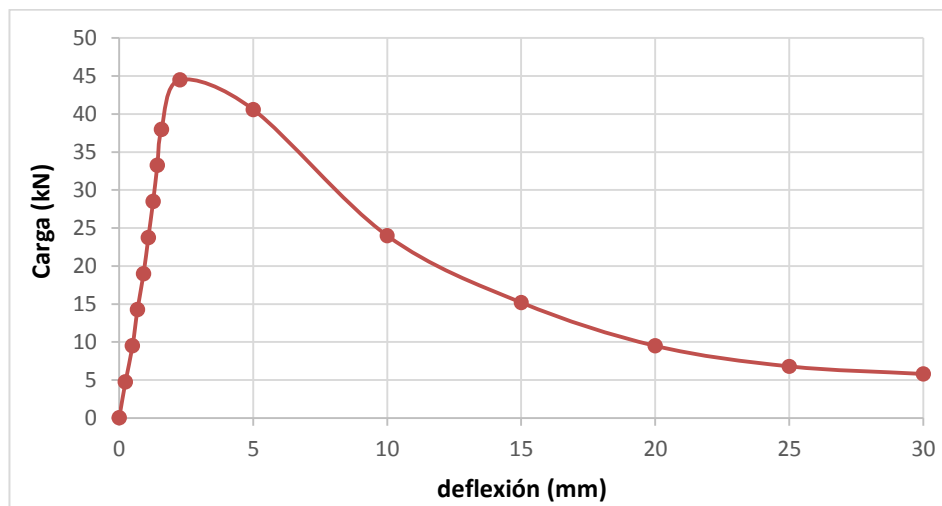
Las gráficas de la figura 53, muestran más dispersión las gráficas de fibra metálica con dosis media. La gráfica de la figura 81 muestra la gráfica promedio.

Figura 81. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 10 cm, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

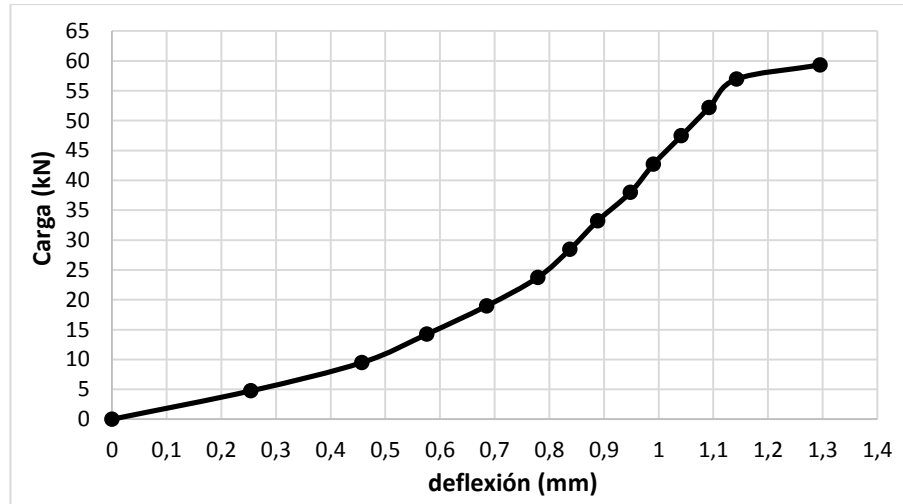
Tabla LXXVIII. **Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis baja de fibra metálica**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0	Compresión
4,75	0,25	
9,49	0,46	
14,24	0,58	
18,98	0,69	
23,73	0,78	Flexo compresión
28,47	0,84	
33,22	0,89	
37,96	0,95	
42,71	0,99	
47,45	1,04	
52,2	1,09	Tensión
56,95	1,14	
59,00	1,30	
54,67	5	
34,33	10	
21,67	15	
14,83	20	
10,33	25	
8,5	30	

Fuente: elaboración propia.

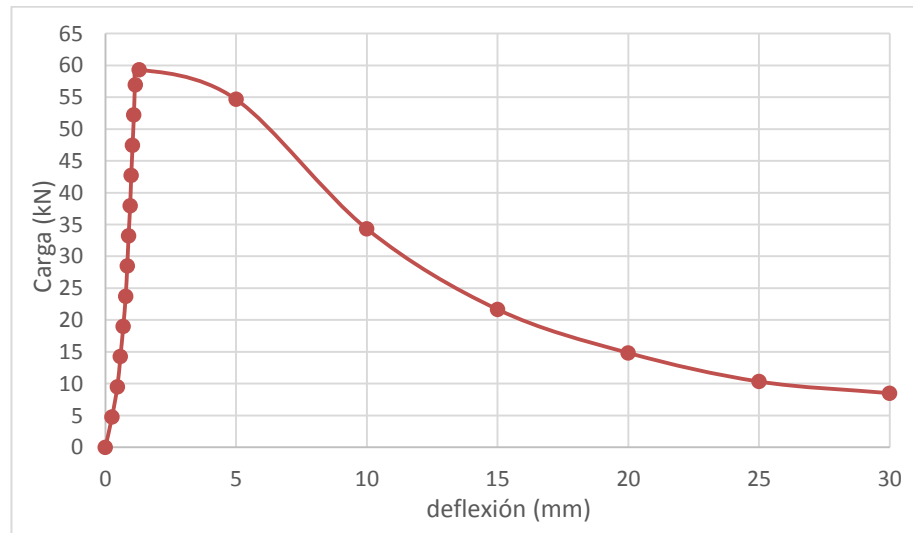
A pesar de la dispersión entre las tres gráficas de la figura 55, se promedian para analizar una sola gráfica (figura 83) y que los resultados del análisis tengan relación a lo trabajado en campo.

Figura 83. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis baja fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis baja fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

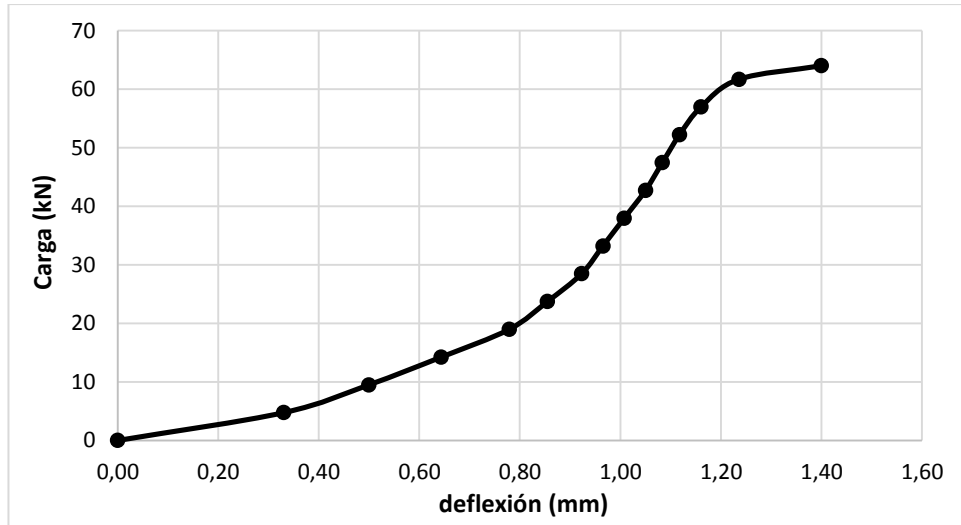
Tabla LXXIX. **Promedio de losas de 12 cm de espesor, dosis alta de fibra metálica**

Carga (kN)	Deflexión (mm)	
0	0,00	Compresión
4,75	0,33	
9,49	0,50	
14,24	0,64	
18,98	0,78	
23,73	0,86	
28,47	0,92	Flexo compresión
33,22	0,97	
37,96	1,01	
42,71	1,05	
47,45	1,08	
52,2	1,12	Tensión
56,95	1,16	
61,69	1,24	
64,00	1,40	
58,67	5	
38	10	
24,33	15,00	
14,67	20,00	
11,33	25,00	
10	30,00	

Fuente: elaboración propia.

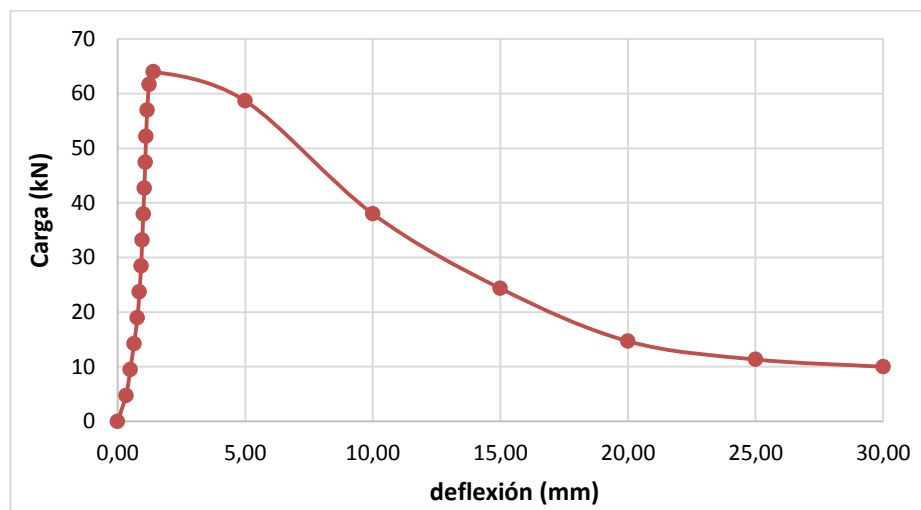
Según las gráficas de la figura 57, con la cantidad de fibra usada en estas losas se tienen una mejor dispersión entre las mismas, las tres gráficas tienen un comportamiento parecido. La figura 85 contiene la gráfica promedio de las tres losas de 12 cm ensayadas.

Figura 85. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm de espesor, dosis alta fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 86. **Gráfica promedio carga-deflexión de losas de 12 cm, dosis alta fibra metálica Norma EN 14488-5**



Fuente: elaboración propia.

Las gráficas promedio se analizaron por medio del método del comportamiento newtoniano en función de la deflexión. Esto según el criterio del asesor de este trabajo de graduación Ing. Mario Corzo, y se obtienen los datos.

Sabiendo que el factor de carga es:

$$F_c = \frac{\text{Carga última}}{\text{Carga diseño}}$$

Tabla LXXX. **Resumen de resultados obtenidos, ensayos del concreto según Norma EN 14488-5**

Losas de concreto (10 cm)	Resiliencia (kN)	Carga de trabajo (kN)	Carga de diseño (kN)	Carga última (kN)	Fc
Sin refuerzo	5	12	27	39,50	1,46
Dosis baja polipropileno	5	19	30	40	1,33
Dosis media polipropileno	5	17	30	36	1,20
Dosis alta polipropileno	5	11	27	38	1,41
Dosis baja metálica	5	15	32	47	1,47
Dosis media metálica	5	14	31	47	1,52
Dosis alta metálica	5	11	31	45	1,42
Losas de concreto (12 cm)					
Sin refuerzo	7	13	40	53,40	1,33
Dosis baja polipropileno	7	16	48	56	1,17
Dosis alta polipropileno	7	15	47	63	1,34
Dosis baja metálica	7	20	53	59	1,11
Dosis alta metálica	7	19	51	64	1,25

Fuente: elaboración propia.

Para todas las probetas ensayadas, la falla se encuentra en el tercio medio de las mismas, se calcula el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

MR = módulo de rotura o resistencia a flexión (kg/cm²)

P = carga máxima aplicada, en kilogramos

L = distancia entre apoyos, en centímetros

b = ancho de la probeta, en centímetros

d = altura de la probeta, en centímetros

Tabla LXXXI. **Resultados ensayo de probetas de concreto simple según Norma ASTM C-78**

Probeta	Resistencia a flexión		
	kgf/cm ²	N/mm ²	Psi
Viga 1	43,33	4,25	616,30
Viga 2	42,84	4,20	609,33
Viga 3	49,16	4,82	699,22
PROMEDIO	45,11	4,42	641,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXII. **Resultados ensayo probetas de concreto con dosis baja fibra polipropileno Norma ASTM C-78**

Probeta	Resistencia a flexión		
	kgf/cm ²	N/mm ²	Psi
Viga 1	47,85	4,69	680,59
Viga 2	44,41	4,35	631,66
Viga 3	51,07	5	726,39
PROMEDIO	47,78	4,68	679,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIII. **Resultados ensayo probetas de concreto con dosis alta fibra polipropileno Norma ASTM C-78**

Probeta	Resistencia a flexión		
	kgf/cm ²	N/mm ²	Psi
Viga 1	41,05	4,03	583,87
Viga 2	41,35	4,06	588,14
Viga 3	37,60	3,69	534,80
PROMEDIO	40,00	3,93	568,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIV. **Resultados ensayo probetas de concreto con dosis baja fibra metálica Norma ASTM C-78**

Probeta	Resistencia a flexión		
	kgf/cm ²	N/mm ²	Psi
Viga 1	51,11	5,01	726,96
Viga 2	52,87	5,18	752,00
Viga 3	49,56	4,86	704,91
PROMEDIO	51,18	5,02	727,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXV. **Resultados ensayo probetas de concreto con dosis alta fibra metálica Norma ASTM C-78**

Probeta	Resistencia a flexión		
	kgf/cm ²	N/mm ²	Psi
Viga 1	51,51	5,05	732,64
Viga 2	38,54	3,78	548,17
Viga 3	38,64	3,79	549,59
PROMEDIO	42,90	4,21	610,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVI. **Resumen de resultados obtenidos por los ensayos del concreto según Norma ASTM C-78**

Concreto	Carga máxima		MR		
	kgf	kN	kgf/cm²	N/mm²	Psi
Sin refuerzo	3 293	32,29	45,11	4,42	641,62
Fibra polipropileno baja	3 800	37,27	47,78	4,68	679,55
Fibra polipropileno alta	3 080	30,20	40,00	3,93	568,94
Fibra metálica baja	3 842	37,68	51,18	5,02	727,96
Fibra metálica alta	3 383	33,18	42,90	4,21	610,13

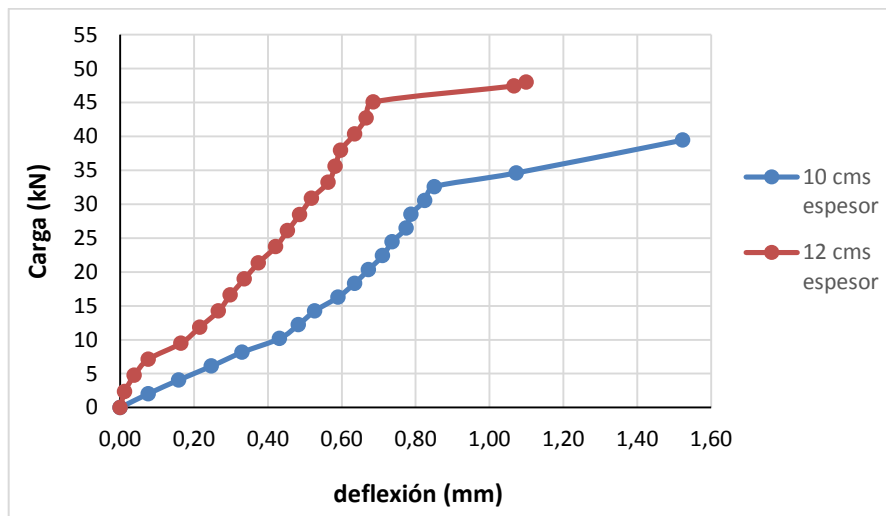
Fuente: elaboración propia.

5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Comparación mecánica

Se comparan los resultados obtenidos en los ensayos de los elementos. Se utilizan gráficas y cálculos para determinar la eficiencia de cada elemento.

Figura 87. Comparación gráfica de concreto sin refuerzo



Fuente: elaboración propia.

La carga que soporta la losa de concreto según su espesor es:

$$\text{Losa de 10 cms} = 39,50/10 = \mathbf{3,95 \text{ kN/cm}}$$

$$\text{Losa de 12 cms} = 53,40/12 = \mathbf{4,45 \text{ kN/cm}}$$

Así se puede saber si mejora la capacidad de carga del concreto variándole el espesor a la losa. Esto al comparar y relacionar los datos para obtener un porcentaje

$$\frac{4,45}{3,95} = 1,13 \rightarrow \text{mejoró } 13 \%$$

Tabla LXXXVII. **Eficiencia de concreto simple**

Espesor de losa	Concreto	Peso	Carga última	Eficiencia $\left(\frac{kN-m^3}{kg}\right)$
10 cm	Sin refuerzo	86,4 kg	39,50 kN	0,46
12 cm		104 kg	53,40 kN	0,51

Fuente: elaboración propia.

Resistencia a la tracción de la fibra metálica es de 1 200 N/mm². Longitud L= 35 mm, diámetro D= 0,55 mm y radio r= 0,28 fuerza que soporta la fibra:

$$A = \pi(0,28)^2$$

$$A = 0,25 \text{ mm}^2$$

$$1\,200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0,25 \text{ mm}^2 = 300 \text{ N}$$

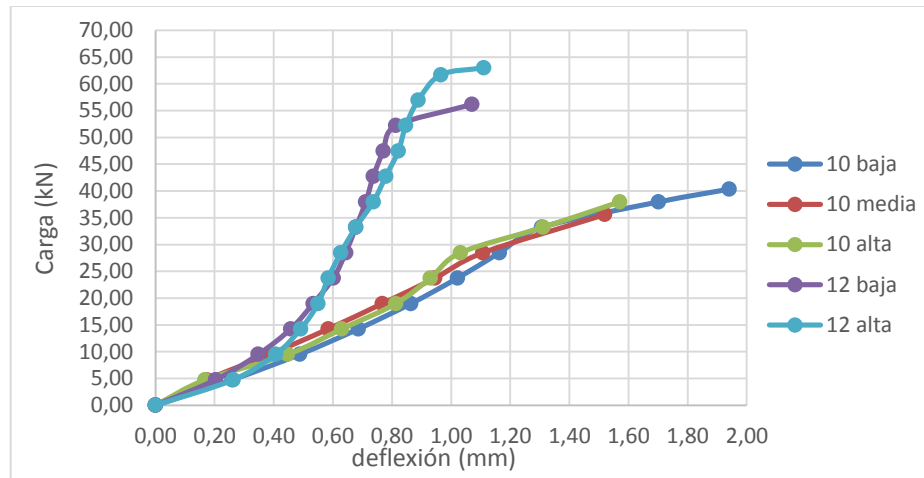
Resistencia a la tracción de la fibra macrosintética es de 360 N/mm². Longitud L= 55 mm, diámetro D= 0,8 mm y radio r= 0,4 fuerza que puede soportar:

$$A = \pi(0,4)^2$$

$$A = 0,50 \text{ mm}^2$$

$$360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0,50 \text{ mm}^2 = 180 \text{ N}$$

Figura 88. Comparación gráfica de concreto con fibra de polipropileno



Fuente: elaboración propia.

$$dosis\ baja = \frac{56}{12} \Big/ \frac{40}{10} = 1,17 \rightarrow mejora\ 17\ %$$

$$dosis\ alta = \frac{63}{12} \Big/ \frac{38}{10} = 1,38 \rightarrow mejora\ 38\ %$$

Tabla LXXXVIII. Eficiencia de concreto con fibras de polipropileno

Espesor de losa	Dosis de fibra	Dosificación	Carga última	Eficiencia $\left(\frac{kN-m^3}{kg}\right)$
10 cm	Baja	2 Kg/m ³	40 kN	20
	Media	5 Kg/m ³	36 kN	7,2
	Alta	8 Kg/m ³	38 kN	4,75
12 cm	Baja	2 Kg/m ³	56 kN	28
	Media*	5 Kg/m ³	60 kN	12
	Alta	8 Kg/m ³	63 kN	7,88

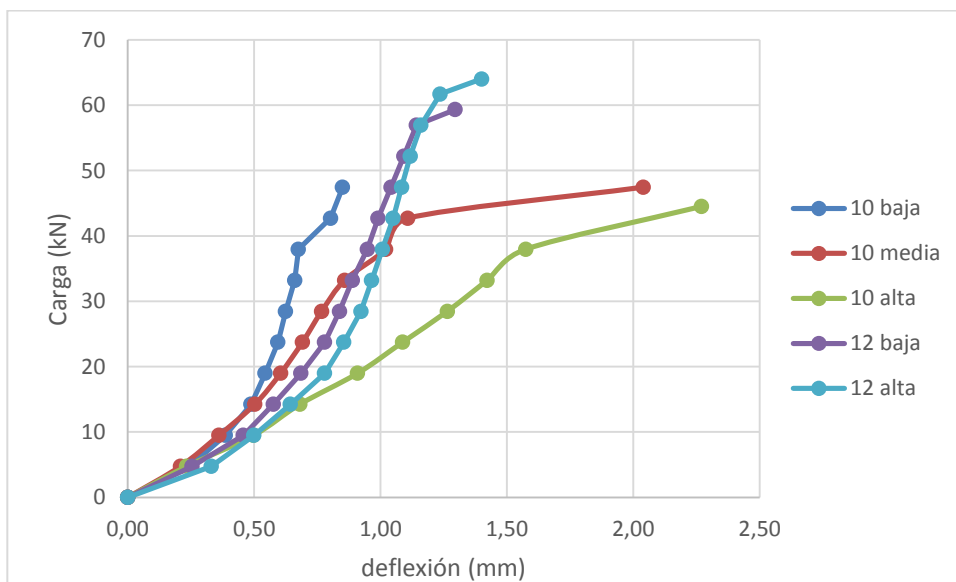
*Dato calculado

Fuente: elaboración propia.

Esta carga última representa la ruptura del concreto. El concreto comparte la resistencia a la tensión junto a la fibra, cuando este ya dio su capacidad a tensión (8 %-12 % de su capacidad a compresión), se quiebra y deja cargando a la fibra.

Las losas de concreto con fibra de polipropileno de 12 cm de espesor se comportan de forma más frágil que las losas de 10 cm de espesor. Estas de menor espesor tienen más flexibilidad.

Figura 89. **Comparación gráfica de concreto con fibra metálica**



Fuente: elaboración propia.

La dosis baja de las losas de 10 cm de espesor es la misma que la dosis alta de las losas de 12 cm. Se comparan las losas con la misma dosificación de fibra.

$$\text{comparación} = \frac{64}{12} / \frac{47}{10} = 1,13 \rightarrow \text{mejora en un } 13 \%$$

$$\text{dosis alta} = \frac{64}{12} / \frac{45}{10} = 1,19 \rightarrow \text{mejora en un } 19 \%$$

Para definir el concreto reforzado con fibra metálica que mejor resistencia tiene, se calcula la eficiencia de cada uno con las diferentes dosificaciones y volúmenes. Se puede obtener la dosificación adecuada.

Tabla LXXXIX. **Eficiencia de concreto con fibras metálicas**

Espesor de losas	Dosis de fibra	Dosificación	Carga última	Eficiencia $\left(\frac{kN-m^3}{kg}\right)$
10 cm	Baja	30 Kg/m ³	47 kN	1,57
	Media	37,5 Kg/m ³	47 kN	1,25
	Alta	45 Kg/m ³	45 kN	1,00
12 cm	Baja	22 Kg/m ³	59 kN	2,68
	Media*	26 Kg/m ³	62 kN	2,38
	Alta	30 Kg/m ³	64 kN	2,13

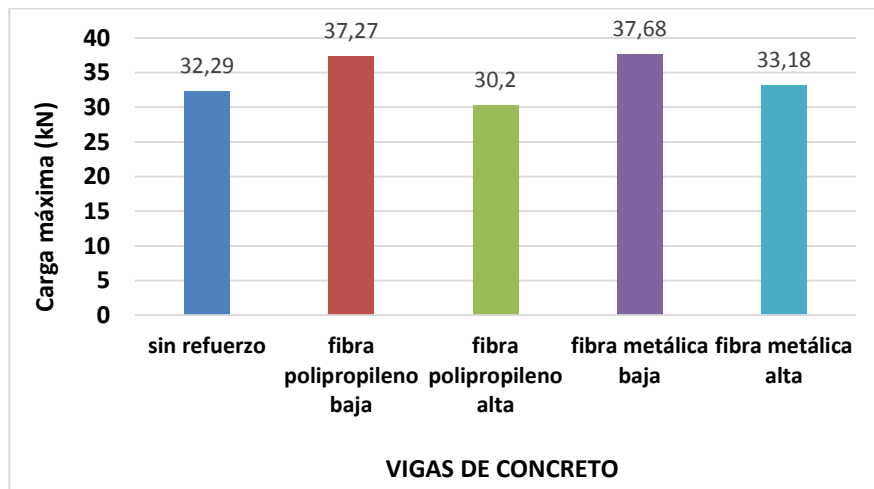
*Dato calculado

Fuente: elaboración propia.

Las losas de 12 cm de espesor tienen un comportamiento frágil pero con mayor tenacidad que las de 10 cm de espesor dosis baja. En las losas de concreto de 10 cm de espesor con dosis alta y media de fibra metálica denotan

un comportamiento flexible a comparación de las demás. Estas tienen ductilidad gracias a la fibra e incrementa la tenacidad del material compuesto.

Figura 90. **Comparación gráfica de concreto por carga máxima**



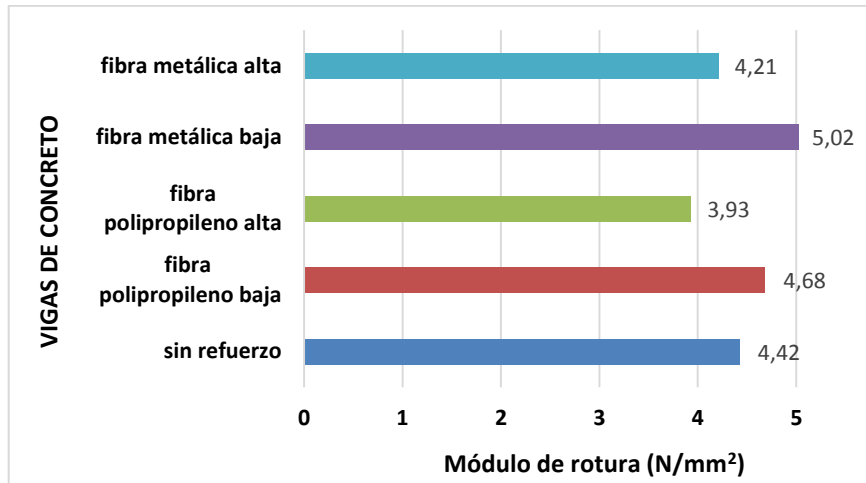
Fuente: elaboración propia.

Tabla XC. **Comparación por carga máxima**

Carga máxima de concreto		Incremento	
Sin refuerzo	Fibra polipropileno	Absoluto	Porcentaje
32,29 kN	37,27 kN	4,98 kN	13,36 %
	Fibra metálica	Absoluto	Porcentaje
	37,68 kN	5,39 kN	14,30 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 91. Comparación gráfica de concreto por módulo de rotura



Fuente: elaboración propia.

Tabla XCI. Comparación por módulo de rotura

Resistencia a la flexión (MR)		Incremento	
Sin refuerzo	Fibra polipropileno	Absoluto	Porcentaje
4,42 N/mm ²	4,68 N/mm ²	0,26 N/mm ²	5,56 %
	Fibra metálica	Absoluto	Porcentaje
	5,02 N/mm ²	0,60 N/mm ²	12,00 %

Fuente: elaboración propia.

5.2. Análisis de resultados

En las losas de concreto simple su resistencia aumenta al tener más volumen, siendo más eficientes las losas de 12 cm de espesor que las de 10 cm de espesor. Aumenta el brazo del par que se genera entre tensión y eje neutro haciendo al concreto más rígido, el peralte hace que tenga más resistencia pero la falla sigue siendo frágil y abrupta. En la sección 4.4 se muestra que la resistencia del concreto en las losas de 12 cm aumenta a 640 kg/cm^2 haciendo que la resistencia a la tensión sea el doble que la de las losas de 10 cm de espesor, esto sucede porque las propiedades plastificantes del aditivo alteran la resistencia del concreto y su deformación unitaria baja a 0,0022.

En las losas de 10 cm de espesor, por ser de concreto sin refuerzo y al no experimentar cambios en su resistencia, se obtiene una falla balanceada de resistencia a tensión y a flexión con una deformación unitaria de 0,003.

Por el uso del aditivo, la resistencia y la trabajabilidad del concreto no se afecta significativamente al adicionarle fibras. En estado endurecido la presencia de la fibra en la superficie de los elementos de concreto fue poca y ya ensayados se pudo observar que la distribución de las fibras en la matriz fue muy buena.

En el concreto con fibras gobierna la compresión y existe una tensión debida a la flexión del elemento. Al inicio de la aplicación de carga el concreto trabaja en su totalidad, luego a partir del punto en las gráficas de los resultados en donde su comportamiento deja de ser constante pasa a un estado de flexocompresión en donde la fibra empieza a intervenir en la resistencia de cargas a flexión y a deformarse junto con el concreto. Cuando el concreto se fisura ya no tiene la capacidad de seguir soportando entonces la fibra se queda

resistiendo y de esta depende que la falla no sea explosiva cuando quiebra la losa, sino balanceada para evitar el colapso inmediato del elemento. Las gráficas de la Norma EN 14488-5 muestran mejor este análisis del comportamiento.

La dispersión entre gráficas representa el lapso de tiempo que pase entre mezclado y vertido del concreto. Este varía con la cantidad y distribución de la fibra en el concreto.

La ductilidad que puede aportar la fibra al material se hace notar más en las losas con menos volumen de concreto. Esto les da más tenacidad, haciendo que durante la flexocompresión las losas aumenten su deflexión lo que le permite al material deformarse más antes que falle la matriz del mismo.

Al analizar la tabla LXXXVI se observan las diferencias que refleja el refuerzo de fibras en lo siguiente:

- Incremento en la carga máxima permisible
- Incremento del módulo de rotura de las vigas con la dosificación baja

Las gráficas de las figuras 87, 88 y 89 demuestran que el uso de las fibras aumenta la deflexión máxima del concreto. Además las fibras permiten un aumento en la deformación de rotura del concreto como se muestra en las gráficas según la Norma EN 14488-5.

Por el comportamiento de tenacidad que tienen las fibras de polipropileno estas se alisan y pierden adherencia, al igual que las fibras metálicas en donde los extremos doblados se alisan. El factor modular de adherencia entre la fibra metálica y la de polipropileno es $\sigma = 0,81$, teniendo menos adherencia la fibra

de polipropileno que la fibra metálica. Al usar una dosificación muy alta de fibra el concreto puede llegar a perder su resistencia y quebrarse.

El efecto de la fibra presente en la falla de los elementos es debido al agregado grueso que se usa para la elaboración del concreto, el cual no se quiebra sino se arranca. A pesar de esto, el concreto presenta una buena resistencia a la compresión y trabajando el conjunto con las fibras se obtiene un buen material compuesto. Debido a la fibra, este material presenta una histéresis a seguir resistiendo carga a pesar que llega a su deformación máxima.

El ACI 318S-08 establece que la cuantía máxima de acero en un elemento sometido a compresión (como las losas con fibras en donde domina la compresión) es de 0,025 y en el capítulo 9, inciso 9.3.2.2. se presenta un factor de reducción de resistencia de 0,65 para secciones controladas por compresión de elementos reforzados. El dato teórico de cuantía máxima de acero para estos elementos es: $0,025 * 0,65 = 0,016$. En la práctica se usa una dosis baja de fibra metálica de 30 kg/cm^2 en una losa de 10 cm de espesor. El peso específico del concreto usado es de aproximadamente $2\ 200 \text{ kg/m}^3$, con esto se puede conocer la cuantía usada en estas losas:

$$\frac{30 \text{ kg/m}^3}{2\ 200 \text{ kg/m}^3} = 0,014$$

Por esta razón es que la dosis baja de fibra metálica en las losas de 12 cm tiene un menor valor que la dosis baja de fibra metálica en las losas de 10 cm. Esto es porque la dosis baja de fibras metálicas representa la cuantía máxima de refuerzo aceptada para elementos sometidos principalmente a compresión.

La longitud útil de las fibras de polipropileno es de 3 cm, los 2,50 cm restantes están divididos en los extremos de la fibra los cuales sirven de anclaje al concreto. La longitud útil de las fibras metálicas es de 2,5 cm, al igual que las otras fibras en los extremos que sirven de anclaje se encuentra el 1 cm restante.

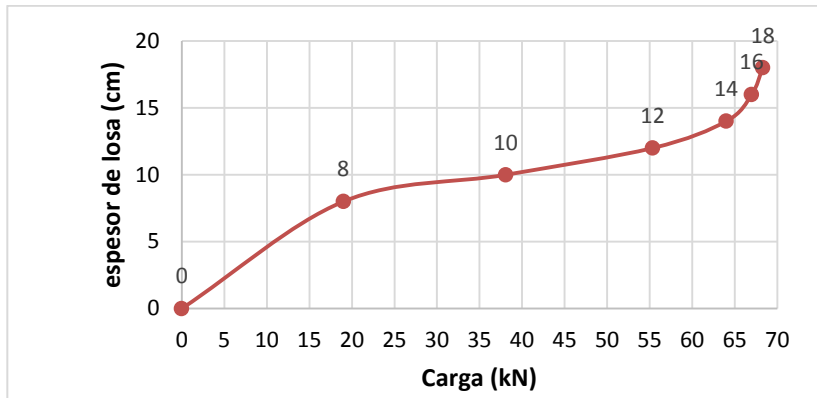
En las gráficas promedio de carga–deflexión de la Norma EN 14488-5, se puede observar que antes de fallar, la fibra está sometida a la última carga de 5 kN donde las deflexiones corresponden a 30 mm (3 cm) en las fibras de polipropileno, y a 25 mm (2,50 cm) en las fibras metálicas. Esto sustenta lo que se pudo ver en la práctica, cuando se analizaban las fibras en la falla de la losa.

Por la forma de bastón que tiene la fibra metálica y debido a que está embebida (adherida) al concreto, esta se encuentra sometida a esfuerzos de tensión. Por la fricción entre fibra y concreto resulta un valor máximo de la fibra de 80 % de la teórica que es 300 N de resistencia a tracción.

En las tablas XC y XCI se presenta un resumen de los incrementos de carga máxima permisible y del módulo de ruptura, para representarlos con números absolutos y porcentajes. Los datos de las tablas son obtenidos de las gráficas comparativas, de las cuales se tomaron los mejores resultados de los ensayos de las vigas. Son las vigas de concreto con dosificación baja de fibra las que presentan más incremento.

De acuerdo a los resultados, al aumentar el espesor de la losa la capacidad de carga del concreto se incrementa, pero este incremento no es tan significativo como el aumento de la resistencia de carga al adicionarle fibras al concreto. Por tanto, la gráfica de la figura 92 muestra la relación existente entre el espesor de un elemento de concreto y su capacidad de resistir carga.

Figura 92. **Espesor de losa-carga**



Fuente: elaboración propia.

La gráfica presenta un comportamiento lineal hasta los 8 o 9 cm aproximadamente, para espesores de 10 a 14 cm el concreto trabaja bien. Sin embargo, va perdiendo la eficiencia, pasados los 14 cm de espesor el concreto ya no mejora su capacidad de carga y se vuelve ineficiente.

5.3. Análisis comparativo de costos

Variando la cantidad de metros cuadrados de fundición para una carpeta de rodadura de parqueo, los costos en mano de obra no cambian significativamente. Entonces lo que diferencia un concreto de otro es la adición de fibra, por eso el costo de los materiales es la variable que se considera.

Tabla XCII. Costo de materiales para 1 m³ de concreto sin refuerzo

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad comercial	Precio unitario (Q)	Total (Q)
Cemento	311	kg	8 sacos	90,00	720,00
Piedra 3/4"	584	kg	0,38 m ³	200,00	76,00
Piedra 3/8"	390	kg	0,27 m ³	200,00	54,00
Arena	864	kg	0,65 m ³	140,00	91,00
Agua	183	kg	183 lts	0,20	37,00
ViscoCrete	1	lt	1 lt	62,00	62,00
				TOTAL	1 040,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XCIII. **Costo de materiales para 1 m³ de concreto con fibras**

Fibra	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (Q)	Precio fibra (Q)	Precio concreto (Q)	Total (Q)
Polipropileno	2	Kg	51	102,00	1 040,00	1 142,00
	5	Kg		255,00		1 295,00
	8	Kg		408,00		1 448,00
Metálica	22	Kg	27	594,00		1 634,00
	30	Kg		810,00	1 850,00	
	37,5	Kg		1 012,50	2 052,50	
	45	Kg		1 215	2 255,00	

Fuente: elaboración propia.

En el análisis comparativo de costos se calculan los materiales para un metro cúbico. Con un metro cúbico de concreto se puede construir un área de de losa de rodadura con espesor de 10 cm, de 10 m². Si se usa la losa de 12 cm de espesor, para un metro cúbico de concreto se puede abarcar un área de 8 m² aproximadamente. Significan 2 m² menos de carpeta de rodadura, y si se considera un parqueo grande, esa diferencia aumenta el costo del proyecto.

El costo de mantenimiento del pavimento rígido es menor al pavimento asfáltico, ya que el concreto tiene una mejor respuesta a los agentes de la intemperie y mayor resistencia de carga. En el capítulo 3, sección 3.4, se expone el mantenimiento de este pavimento rígido. Respecto a los costos de mantenimiento de las losas de rodadura de concreto fibroreforzado, se espera que sea equivalente al del concreto sin refuerzo.

CONCLUSIONES

1. El factor determinante en la calidad del concreto para pavimentos es la resistencia a la flexión y no a compresión, por la relación entre las características mecánicas (capacidad de carga y deflexión) y el costo que representan. Las losas de 10 cm resultan más eficientes para usarlas como carpetas de rodadura en parqueos.
2. La dosificación baja de fibra metálica es la adecuada para resistir las cargas con una óptima eficiencia de trabajo, al estar sometida a esfuerzos de tensión tiene un valor máximo del 80 % de la teórica y debido a su forma de bastón tiene mejor adherencia al concreto que la fibra de polipropileno.
3. La dosificación media y alta de fibra metálica actúan de forma similar a la dosificación baja, no se nota un incremento razonable de capacidad de carga porque sobrepasan la cuantía permitida ($\rho_{\text{General}} < 0,015$).
4. La fibra de polipropileno mejora la calidad del concreto. Esto reduce los agrietamientos por temperatura y disminuye su permeabilidad, ya que durante el vertido y colocado del concreto se nota una disminución de las grietas en la superficie. Sin embargo, es mejor refuerzo la fibra metálica porque aumenta la resistencia de carga y el módulo de rotura.
5. La dosificación de fibra media y alta de fibra de polipropileno según los resultados obtenidos, no representan una mejora en la capacidad de carga. Esto cuando incluso son menos eficientes que la dosis baja, la

cual tiene mejores resultados en resistencia a flexión y capacidad de carga.

6. Las fibras metálicas y de polipropileno no llegaron al punto de ruptura, solo a su elongación máxima, debido a los agregados utilizados en el concreto.
7. En el concreto sin refuerzo se presenta una falla balanceada con una deformación a 0,003. La capacidad de carga de este concreto es muy inferior a la del concreto fibroreforzado.
8. Se evidencia en las gráficas que al haber una concentración de fibra muy alta genera una configuración tipo S por saturación de fibra y esto provoca que el concreto se vuelva quebradizo y se pierda la capacidad del material compuesto.
9. El uso del aditivo es necesario para el concreto con fibras, permitiendo la trabajabilidad y conservando la resistencia adecuada del concreto.
10. La fibra metálica y de polipropileno ayudan a disminuir la dispersión por el tiempo entre elaboración y vertido del concreto dándole mayor capacidad de carga. Las gráficas de las losas con fibra de polipropileno son las que mejor dispersión presentan.
11. En las losas de concreto sin refuerzo de 12 cm de espesor, el excesivo uso del aditivo provocó que la resistencia del hormigón aumentara y disminuyera su deformación unitaria. Haciéndolo más resistente pero muy rígido y con su falla frágil, lo que provoca que el concreto quiebre abruptamente.

RECOMENDACIONES

1. En el proceso de fundición prever que el tiempo entre mezclado y vertido no supere los 15 minutos, pasado este tiempo se afecta la resistencia del concreto, viéndose reflejado en la dispersión entre las gráficas del capítulo 4.
2. Calcular la cuantía general del límite de proporción de fibra metálica antes de proceder a añadir la dosificación de fibra a la mezcla, como en este caso que la dosis media y alta de fibra representaban costo y no eficiencia.
3. No añadir cantidad excesiva de fibra al concreto porque provoca una falla temprana a flexión, haciendo al material quebradizo y la fibra rompe a tensión. Por ello el material pierde eficiencia de trabajo y capacidad de resistir carga.
4. Tomar en cuenta el factor de carga en el diseño de la losa de rodadura de concreto, porque representa un factor de seguridad, Este indica que la fibra y el concreto trabajan adecuadamente en adherencia.
5. Una posible mejora al concreto en su resistencia a flexión y propiedades físicas es añadir una menor dosis a la de 5 kg/m^3 de fibra de polipropileno y a la dosis de 22 kg/m^3 de fibra metálica.

6. Usar agregados de mejor calidad para que la resistencia del material compuesto sea mayor, que el agregado grueso trabaje y no se arranque evitando el efecto dovela en el concreto de las losas de rodadura.
7. Hacer un concreto especial para estas fibras usando más agregado fino y disminuir la cantidad de agregado grueso en la mezcla, para que la fibra tenga mejor adherencia al concreto y sea capaz de ceder más a tensión cuando sea sometida a carga.
8. Si hay mucha diferencia entre la carga de trabajo y la carga de diseño significa que el concreto fibroreforzado tiene poca ductilidad. Se debe evaluar si es adecuado para uso en losa de rodadura.
9. Es indispensable el uso de aditivo reductor de agua, este hace posible que se pueda trabajar con el concreto fibroreforzado.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDERETE, Natalia. *Ensayo a flexión de vigas de hormigón con incorporación de agregados reciclados*. Centro de Investigación Vial de la Facultad Regional La Plata, Universidad de Técnica Nacional. Argentina. 2010. [en línea]. <http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/10/Tesis2010_Natalia-Alderete_Flexion-de-Vigas-de-Hormigon.pdf>. [Consulta: 29 de septiembre de 2015].
2. American Association of State and Highway Transportation Officials. *Capítulo 1, Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos*. AASHTO 1993. Universidad de Piura, Perú. [en línea]. <http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_18_1_62_936.pdf>. [Consulta: 15 de octubre de 2015].
3. American Standard for Testing and Materials. *Método estándar para ensayos de resistencia a flexión del concreto (utilizando viga simplemente apoyada con carga en los tercios)*. Pennsylvania, EE.UU: ASTM C-78, 2003.
4. CALO, Diego H. *Diseño y construcción de pavimentos de hormigón-diseño de pavimentos rígidos*. Instituto de Cemento Portland Argentino. Argentina. 2012. [en línea]. <<http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf>>. [Consulta: 21 de octubre de 2015].

5. Committe 544, ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002). *Report on fiber reinforced concrete*. 2002. 66 p.
6. _____. ACI 544.2R-89 (Reapproved 1999). *Measurement of properties of fiber reinforced concrete*. 1999. 11 p.
7. Comisión Guatemalteca de Normas. Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41017-h2. *Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)*. Guatemala: Coguanor, 2012. 8 p.
8. CORZO ÁVILA, Mario Rodolfo. *Notas de hormigón armado*. Guatemala: Sabandijas sin fronteras, 2008. 225 p. Vol. 1.
9. Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: DGC, 2001.
10. European Committee for Standardization. *Testing sprayed concrete – part 5: Determination of energy absorption capacity of fiber reinforced slab specimens*. Suecia: EN 14488-5, 2006. 8 p.
11. Instituto Americano del Concreto. *Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentarios (ACI 318S-08)*. 2008. 518 p.
12. MONTEIRO, Paulo; MEHTA, Kumar. *Concreto, estructura, propiedades y materiales*. Arq. LUNA, Guillermo (trad.). México: Arq. Esqueda Huidobro, Heraclio. 1998. 381 p.

13. SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. *Módulo 16 – Construcción de pavimentos rígidos y de adoquines*. [en línea]. <http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%2016.pdf>. [Consulta: 12 de octubre de 2015].
14. SIKA Informaciones técnicas. *Concreto reforzado con fibras*. Colombia: SIKA, 2011. 27 p. ISSN-0122-0594.
15. _____. *Sika fiber CHO 65/35*. SIKA mexicana. Hoja técnica Núm.92735. 2011. 2 p.
16. _____. *Sika fiber force PP/PE-700/55*. SIKA mexicana. Hoja técnica Núm.448175. 2013. 3 p.
17. STUPENENGO, Franco. *Guía didáctica de materiales y materias primas – Capítulo 10 Materiales compuestos*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina. 2011. [en línea]. <<http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>>. [Consulta: 5 de octubre de 2015].
18. TANESI, Jussara; PANARESE, William; KOSTMATKA, Steven; KERKHOFF, Beatrix. *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association, 2004. 448 p.
19. ZARAGOZA CARBONELL, José Luis; VINCENT VELA, María Cinta. ÁLVAREZ BLANCO, Silvia. *Ciencia y tecnología de polímeros*. Universidad Politecnica de Valencia. 2006. 127 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Conversión de psi a kN

Presión (psi) x área de gato hidráulico (pulg²) = libras

De libras se convierte a kilogramo fuerza y de kilogramo fuerza a kilonewton.

Para el gato hidráulico de 10 toneladas inglesas, su área es de 2,24 pulg².

$$200 \text{ psi} \times 2,24 \text{ pulg}^2 = 448 \text{ lb} \rightarrow \frac{448 \text{ lb}}{2,2 \text{ lb}} = 204 \text{ kgf}$$

$$204 \text{ kgf} \times 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2\,040 \text{ N} \approx 2,04 \text{ kN}$$

Para el gato hidráulico de 25 toneladas inglesas, su área es de 5,22 pulg².

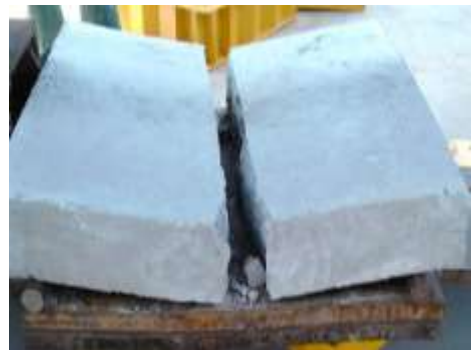
$$200 \text{ psi} \times 5,22 \text{ pulg}^2 = 1\,044 \text{ lb} \rightarrow \frac{1\,044 \text{ lb}}{2,2 \text{ lb}} = 474,55 \text{ kgf}$$

$$474,55 \text{ kgf} \times 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4\,745,50 \text{ N} \approx 4,75 \text{ kN}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Elementos ensayados**

Apéndice 2a. **Fallas en elementos sin fibra**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2b.

Fallas en elementos con fibra metálica dosis baja



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2c. **Fallas en elementos con fibra metálica dosis media**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2d. **Fallas en elementos con fibra metálica dosis alta**



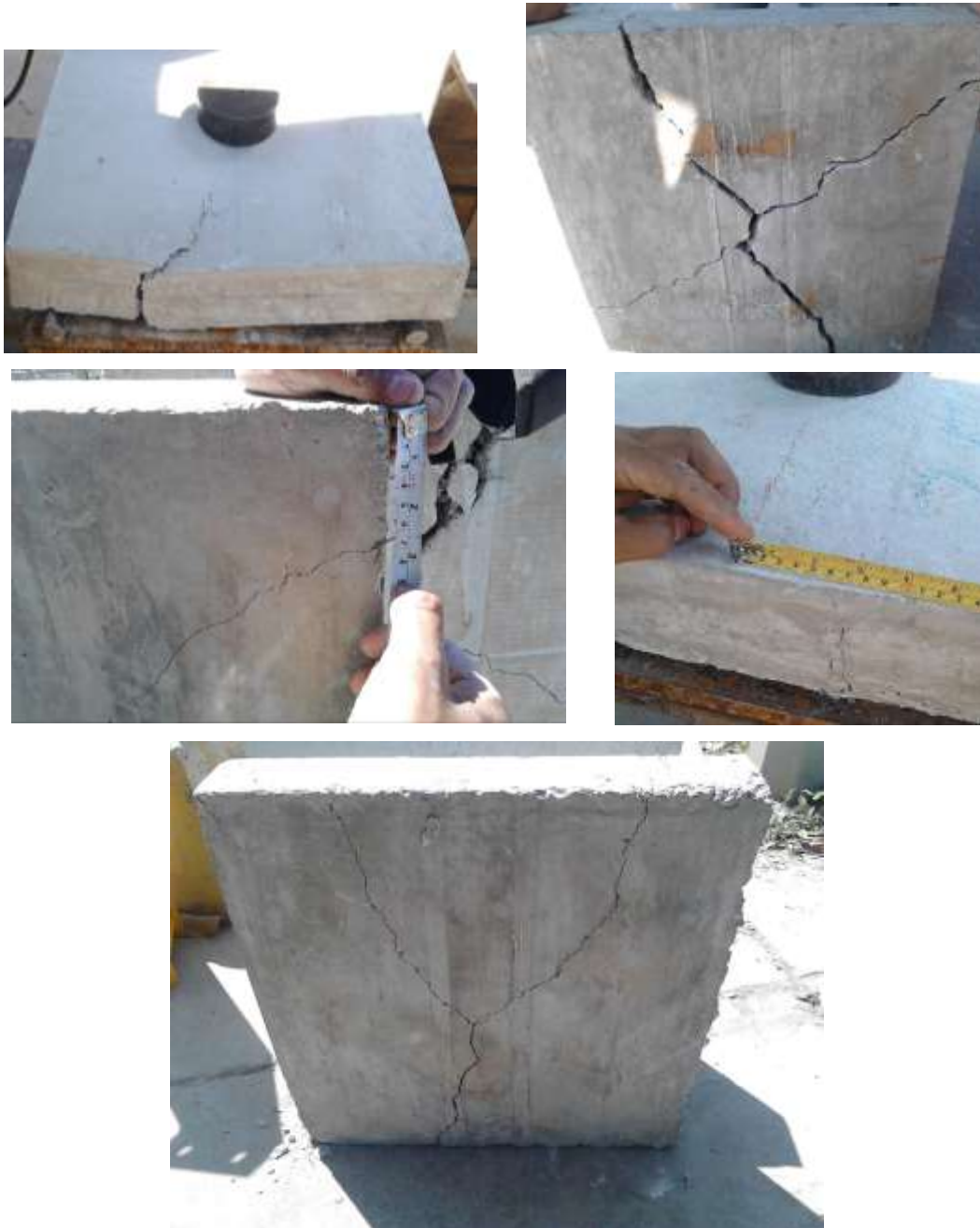
Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2e. **Fallas en elementos con fibra polipropileno dosis baja**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2f. **Fallas en elementos con fibra polipropileno dosis media**



Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 2g. **Fallas en elementos con fibra polipropileno dosis alta**

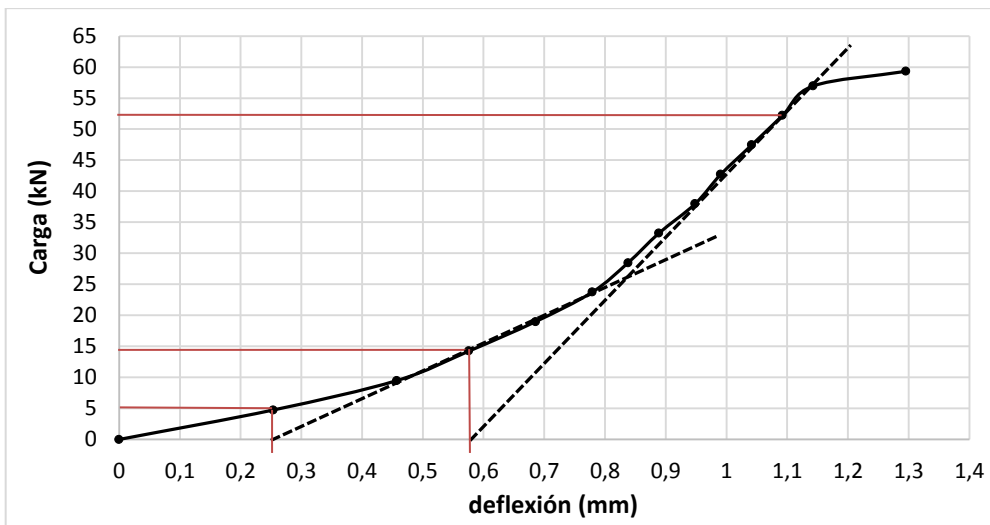


Fuente: Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Apéndice 3. Análisis de las gráficas carga-deformación

Este análisis se hace por medio del método newtoniano de acuerdo al criterio del Ing. Mario Corzo, asesor de este trabajo de graduación. Con esto se obtienen la resiliencia del elemento de concreto, las cargas de trabajo, de diseño y última.

Apéndice 3a. Análisis de gráfica por método newtoniano



Fuente: Ing. Mario Corzo.

En la gráfica se puede observar que el módulo de resiliencia es de 5 kN. Se traza una línea de ese punto de la gráfica hacia abajo, donde toca el eje de la deflexión se saca una tangente a la curva de la gráfica para obtener el valor de la carga de trabajo. En este caso es de 14 kN. Se repite el procedimiento para determinar la carga de diseño, la cual da un valor de 52 kN. La carga última es de 64 kN aproximadamente.

Apéndice 4. **Factor modular de adherencia**

El factor modular de adherencia de las fibras se calcula por medio de la relación entre las fibras metálicas y de polipropileno, como se muestra:

Ø metálica= 0,5 mm

Ø polipropileno= 0,8 mm

L metálica= 5,5 cm

L polipropileno= 2,8 cm sin los dobleces

Relación de diámetros

$$\frac{0,5 \text{ mm}}{0,8 \text{ mm}} = 0,625$$

Relación de longitud

$$\frac{5,5 \text{ cm}}{2,8 \text{ cm}} = 1,96$$

El factor se calcula así

$$0,625 \times 1,96 = 1,23$$

$$(1,23)^{-1} = 0,81$$

Fuente: elaboración propia.

