

NO vale
66609

T
S2175a
2014



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Análisis Comparativo De Distintas Soluciones De Pavimentos Industriales De Hormigón

Por

Laura Virginia Salsilli Iglesias

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Septiembre, 2014

R. 16864

Pavimentos de Hormigón
Fibras
LOSAS

A mis padres, siempre me han entregado las herramientas para ser la persona que soy hoy en día.

A mis hermanos, siempre he contado con el apoyo de ustedes.

A mis amigos, por la alegría que siempre me han dado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me han acompañado y apoyado en este largo proceso de estudio, familia y amigos; pero en forma particular agradecer a mis padres, que son los que han estado a mi lado de manera incondicional.

Quiero agradecer a la Universidad de Valparaíso y a sus docentes, por entregarme las herramientas necesarias, para poder desenvolverme como profesional en un futuro.

Quiero agradecer a mi comisión examinadora, a mi profesor guía; Guillermo Brante Lara a quien tuve el agrado de conocer durante mi proceso académico en la Universidad de Valparaíso.

Índice

1. Introducción.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Alcances de la investigación.....	17
2. Tipos de pavimentos (ACI 360R-10).....	18
2.1 Estructura de pavimento.....	18
2.1.1 Pavimentos de hormigón simple con juntas con/sin dispositivo de traspaso de carga.....	19
2.1.2 Pavimentos de hormigón reforzado.....	20
2.1.2.1 Fibras metálicas.....	20
2.1.2.2 Fibras sintéticas.....	21
2.1.3 Pavimentos de hormigón de retracción compensada.....	21
2.1.4 Pavimentos de hormigón postensado.....	21
3. Cargas (ACI 360R-10).....	25
4. Análisis estructural de losas.....	28
4.1 Tensiones debidas a carga.....	28
4.1.1 Carga de esquina.....	29
4.1.2 Carga de borde.....	29
4.1.2.1 Corrección por diferentes condiciones de borde.....	30
4.1.2.1.1 Radio equivalente de carga aislada.....	31
4.1.2.1.2 Efecto de longitud de losa.....	32
4.1.2.1.3 Distancia de la carga al borde de la losa (Cabrera, 1998).....	32
4.1.2.1.4 Transferencia de carga de losa adyacente (ERES Consultants, 1987).....	33
4.1.3 Carga interior.....	35
4.1.4 Carga distribuida.....	36
4.2 Tensiones debidas al alabeo por temperatura.....	36
4.3 Tensión combinada.....	39
4.4 Características de la fatiga del hormigón.....	39
4.5 Espesor de losa mediante uso de factores de seguridad.....	40
5. Métodos de diseño de pavimentos industriales incorporados en la ACI 360R-10.....	41
5.1 Pavimento de hormigón simple con/sin dispositivos de traspaso de carga.....	41
5.1.1 Juntas de aislación-dilatación.....	41
5.1.2 Juntas de contracción.....	44

5.1.3 Juntas de construcción.....	45
5.1.4 Métodos de diseño	45
5.1.4.1 Caso 1 carga de esquina de losa	46
5.1.4.2 Caso 2 carga interior de losa (carga alejada de los bordes).....	46
5.1.4.3 Caso 3 carga de rueda en el borde de la losa	46
5.1.4.4 Caso 4 carga distribuida en áreas parciales	47
5.1.5 Método de diseño de la Asociación Cemento Portland (PCA)	48
5.1.5.1 Cargas de rueda	48
5.1.5.2 Cargas concentradas.....	48
5.1.5.3 Cargas uniformes	48
5.1.5.4 Cargas de construcción	48
5.1.5.5 Ábacos de diseño utilizados en el método de diseño de la PCA	49
5.1.5.5.1 Ábacos para el diseño de espesor de losa según el método de la PCA para el caso de una carga de eje simple.....	49
5.1.5.5.2 Ábacos de diseño para una carga de estantería.....	51
5.1.5.5.3 Información de diseño adicional de la PCA	53
5.1.6 Método de diseño del Instituto de Refuerzo con Cable (WRI).....	55
5.1.6.1 Cargas concentradas.....	55
5.1.6.2 Cargas uniformemente distribuidas	55
5.1.6.3 Cargas de construcción	56
5.1.6.4 Abaco de diseño de selección de espesor de losa según el método WRI para el caso de una carga de eje simple.....	56
5.1.7 Método de diseño del Cuerpo de Ingenieros (COE).....	58
5.1.7.1 Abaco de diseño utilizado en el método de diseño COE	59
5.1.7.2 Categoría Índice de diseño.....	60
5.2 Pavimento de hormigón reforzado (para el control de ancho de grietas).....	60
5.2.1 Diseño de espesor de losa.....	61
5.2.2 Refuerzo sólo para el control de ancho de grieta	61
5.3 Pavimentos de hormigón de retracción compensada (HRC)	61
5.3.1 Consideraciones de diseño	63
5.3.1.1 Determinación del espesor de losa	63
5.3.1.2 Dimensiones de la losa.....	63
5.3.1.3 Expansiones restringidas del hormigón.....	63
5.3.1.4 Restricciones	63
5.3.1.5 Armadura	64

5.4 Pavimentos de hormigón postensados.....	65
5.4.1 Requisitos de la plataforma de apoyo.....	66
5.4.2 Diseño de pavimento.....	66
5.4.3 Conceptos de diseño elástico	67
5.4.4 Tensado efectivo	67
5.4.5 Tensiones por fricción	68
5.4.6 Pérdida de pretensado.....	68
5.4.7 Pérdida en sistema de anclaje.....	69
5.4.8 Pérdida fricción cable-hormigón.....	69
5.4.9 Relajación y Creep.....	69
5.4.9.1 Creep del hormigón	70
5.4.10 Diseño de cables.....	70
5.5 Pavimentos de hormigón con fibras	71
5.5.1 Principios de diseño	71
5.5.2 Tenacidad a la flexión	71
5.5.3 Resistencia al impacto	72
5.5.4 Resistencia a la fatiga por flexión	72
5.5.5 Resistencia al corte.....	72
5.5.6 Métodos de diseño.....	72
5.5.6.1 Caso 1 carga interior de losa.....	73
5.5.6.2 Caso 2 carga de borde	73
5.5.6.3 Caso 3 carga de esquina.....	73
6. Análisis de un caso de estudio.....	75
6.1 Recopilación de antecedentes.....	75
6.1.1 Propiedades del hormigón	75
6.1.2 Solicitaciones de carga	75
6.1.2.1 Estanterías (racks).....	75
6.1.2.2 Montacargas	77
6.1.3 Mecánica de suelos.....	78
6.1.4 Pavimentos de bodega.....	78
6.2 Diseño de pavimentos	78
6.2.1 Pavimento de hormigón simple con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga	78
6.2.1.1 Diseño para el caso de estanterías	78
6.2.1.2 Diseño para el caso de montacargas.....	80
6.2.2 Pavimento de hormigón reforzado para el control del ancho de grietas	82

6.2.2.1	Diseño para el caso de estanterías	82
6.2.2.2	Diseño para el caso de montacargas	84
6.2.2.3	Cálculo de armadura	86
6.2.3	Pavimento de hormigón de retracción compensada.....	87
6.2.3.1	Diseño para el caso de estanterías	87
6.2.3.2	Diseño para el caso de montacargas	90
6.2.3.3	Cálculo de armadura	93
6.2.4	Pavimento de hormigón con fibras.....	95
6.2.4.1	Diseño para el caso de estanterías	95
6.2.4.2	Diseño para el caso de montacargas	97
6.2.4.3	Cálculo del factor residual para el caso de racks.....	99
6.2.4.4	Cálculo del factor residual para el caso de montacargas.....	101
6.2.5	Pavimento de hormigón postensados.....	103
6.2.5.1	Diseño para el caso de estanterías	103
7.	Evaluación económica de cada tipo de pavimento.....	108
7.1	Pavimento de hormigón simple con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga.....	109
7.2	Pavimento de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas	110
7.3	Pavimento de hormigón de retracción compensada	111
7.4	Pavimento de hormigón con fibras	112
7.5	Pavimento de hormigón postensado	113
7.6	Resumen de precios unitarios de los distintos tipos de pavimentos	114
8.	Comentarios	115
9.	Análisis de resultados y conclusiones.....	116
10.	Referencia bibliográfica	117
11.	Referencia bibliográfica complementaria	118
	ANEXO 1.....	119

Glosario

Ph: Es una medida de acidez o alcalinidad.

Granallado: El granallado es un proceso mediante el cual se logra modificar el estado superficial de un material, principalmente es una técnica de tratamiento por impacto consiguiendo un excelente grado de limpieza y decapado, así como una correcta terminación superficial.

Chorro de arena: Método de limpieza abrasivo de superficies metálicas o de concreto.

Tensiones: Fuerza interna aplicada, que actúa por unidad de superficie o área sobre la que se aplica.

Juntas: Discontinuidad en el pavimento que define el tamaño de la losa, la cual permite los movimientos horizontales de esta.

Alabeo: Es la curvatura hacia arriba o hacia abajo, que se genera a causa de un diferencial de temperatura en las losas de hormigón.

Fatiga: Falla de pavimento, que consiste en el agrietamiento de losas como consecuencia de la acción conjunta de las cargas externas (tránsito, estanterías, etc.) y alabeo.

Deflexión: Se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente la carga es producida por el tránsito vehicular.

Planicidad: Regularidad superficial de un pavimento.

Etapa plástica: La etapa plástica se presenta en el material cuando se aplican tensiones superiores al límite elástico, experimentando deformaciones permanentes, no recuperando su forma original al retirar las cargas.

Piso industrial: Pavimento de hormigón para ser utilizado en bodegas.

Lista de abreviaturas o siglas

ACI= American Concrete Institute de los Estados Unidos.

AASHTO= American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM= American Society for Testing and Materials.

JSCE SF4= Japan Society of Civil Engineers.

EN 14651= Norma Europea 14651

PCA= Portland Cement Association, EEUU.

WRI= Wire Reinforcement Institute, EEUU.

COE= Corp of Engineers, EEUU.

HRC= Hormigón de Retracción Compensada.

A/C= Relación agua cemento.

Ud= Unidad.

PU= Precio unitario.

BTC= Barras de traspaso de carga.

Lista de símbolos

P = Carga aplicada (F).

h = Espesor de losa (L).

a = Radio del área cargada (L).

l = Radio de rigidez relativo (L).

k = Módulo de reacción de la subrasante (FL^{-3}).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (FL^{-2}).

μ = Razón de poisson.

a_{eq} = Radio equivalente del área cargada (L).

S = Espaciamiento de ruedas dobles (L).

t = Espaciamiento de ruedas en el sentido longitudinal (L).

σ_c = Tensión máxima de esquina en la fibra superior de la losa (FL^{-2}).

σ_∞ = Tensión de borde de westergaard (FL^{-2}).

σ_L = Tensión de borde para losas con longitud L (FL^{-2}).

L = Longitud de losa (L).

\bar{D} = Distancia entre el borde externo de la rueda y el borde de la losa (L).

δ_1 = Deflexión vertical de la losa en el lado descargado (L).

δ_2 = Deflexión vertical de la losa en el lado cargado (L).

AGG = Factor de trabazón del árido.

f_t = Tensión de tracción del hormigón, (FL^{-2}).

M_c = Momento en la losa en el centro del pasillo ($(FL)/L$).

$\lambda = \sqrt[4]{K/4EI}$, (L^{-1}).

I = Momento de inercia (L^4).

w = Carga uniforme (FL^{-2}).

e = Base de logaritmo natural.

σ_t = Resistencia a la tracción por flexión (+) (FL^{-2}).

σ_p = Nivel efectivo de postensado (+) (FL^{-2}).

σ_r = Pérdida de tensado por fricción losa subbase (-) (FL^{-2}).

$\sigma_c + \sigma_L$ = Esfuerzo conjunto carga y alabeo (-) (FL^{-2}).

W = Peso de la losa (FL^{-2}).

f = Coeficiente de roce.

W_n = Deformación después de n aplicaciones de carga.

W_1 = Deformación después de la primera aplicación de carga.

a = constante.

n = Número de aplicaciones de carga.

F_j = Fuerza de tensado en el gato (F).

F_x = Fuerza de tensado a una distancia X del gato (F).

K = La curvatura (deformación) en el cable.

x = Distancia del gato (L).

v = Coeficiente de fricción por curvatura.

α = Cambio angular total del perfil del cable de tensado en radianes desde el gato al punto x (α).

σ_p = Nivel de tensado del acero después de t horas (FL^{-2}).

σ_{pi} = Nivel de tensado inicial (FL^{-2}).

t = Tiempo después del tensado inicial (t).

σ_{yi} = Tensión de fluencia del acero (FL^{-2}).

Cu = Coeficiente de Creep.

ecu = Deformación por creep.

eci = Deformación por creep inicial o elástica.

fb = Tensión admisible a tracción por flexión (FL^{-2}).

R_e^3 = Factor de resistencia residual se determina utilizando JSCE SF4.

f_r = Módulo de rotura del hormigón (FL^{-2}).

b = Ancho unitario (L).

Mn = Momento negativo resistente de la losa, tracción en la fibra superior de la losa ($(FL)/L$).

M_p = Momento positivo resistente de la losa, tracción en la fibra inferior de la losa ((FL)/L).

P_o = Resistencia última de la losa (F).

Lista de figuras

Figura 2.1- Elementos de un piso industrial de hormigón.....	18
Figura 3.1- Condiciones de carga que controlan el diseño del espesor de un piso (ACI 360R-10).	27
Figura 4.1- Tensiones para la condición de carga de borde (Cabrera, 1998).	30
Figura 4.2- Esquema concepto de transferencia de carga en juntas.....	33
Figura 4.3- Relación transferencia de carga en juntas con el factor adimensional AGG/kl (Cabrera, 1998).....	35
Figura 4.4- Condición de día, alabeo convexo (Cabrera, 1998).	36
Figura 4.5- Condición nocturna, alabeo cóncavo (Cabrera, 1998).	37
Figura 4.6- Losa finita en ambas direcciones (Cabrera, 1998).	38
Figura 4.7- Resumen del comportamiento a la fatiga de resultados obtenidos en terreno (Cabrera, 1998).....	40
Figura 5.1- Junta de aislación en muro (ACI 360R-10).....	42
Figura 5.2- Juntas de aislación en muros y pilares (ACI 360R-10).....	43
Figura 5.3- Ubicaciones apropiadas para las juntas (ACI 360R-10).....	44
Figura 5.4- Detalle de junta de construcción protegida con cantonera (ACI 360R-10).	45
Figura 5.5- El diseño gráfico de PCA para ejes con ruedas simples.	49
Figura 5.6- Relación entre el área de contacto de carga y área de contacto de carga efectiva.....	50
Figura 5.7- Abaco de diseño de la PCA para ejes con ruedas dobles.....	50
Figura 5.8- Abaco de diseño según PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 100pci.	51
Figura 5.9- Abaco de diseño según la PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 50 pci.	52
Figura 5.10- Abaco de diseño según la PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 200pci.	52
Figura 5.11- Relación entre la rigidez de la losa y subrasante utilizada por el método WRI.....	56
Figura 5.12- Abaco de diseño para carga de rueda utilizada por el método WRI.	57
Figura 5.13- Abaco para la tensión de tracción en la losa usada por el método WRI.	57
Figura 5.14- Ábacos para la tensión de tracción en la losa de diseño para carga uniforme usado por el método de diseño WRI.	58
Figura 5.15- Abaco de diseño del COE para determinar el espesor del piso de hormigón según el índice de diseño.....	59
Figura 5.16- Curvas de diseño del método COE para losas de piso de hormigón con tránsito de grúas horquilla pesadas.	59
Figura 5.17- Características de expansión y retracción de hormigones HRC y Portland (ACI 223-98).....	62
Figura 5.18- Coeficientes de fricción losa – subbase (ACI 360R).	64
Figura 5.19- Expansión de losa versus expansión del prisma para diferentes razones de Volumen/Superficie y porcentajes de armadura.	65
Figura 5.20- Tensión por fricción en la losa.	68
Figura 6.1- Esquema de sistema de Racks. (No a escala).	76
Figura 6.2- Condiciones críticas de carga que producirían los racks.	76
Figura 6.3- Condiciones de apoyo para la condición crítica para los racks.....	77

Lista de tablas

Tabla 2.1- Cuadro comparativo de pisos industriales de hormigón.	23
Tabla 2.2- Clases de pisos de acuerdo a su uso.	24
Tabla 5.1-Cargas distribuidas admisibles para pasillo sin juntas, con carga no uniforme y disposición variable (Packard, 1976).....	53
Tabla 5.2- Cargas distribuidas admisibles, pasillos sin juntas y disposición variables.....	54
Tabla 5.3- Categorías de índice de diseño utilizado con el método COE para la selección del espesor de la losa.....	60
Tabla 6.1- Cargas críticas debidas al sistema de racks.....	75
Tabla 6.2- Condición crítica de los montacargas.	77
Tabla 6.3- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.	79
Tabla 6.4- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.	81
Tabla 6.5- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.	83
Tabla 6.6- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.	85
Tabla 6.7- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks, para caso de carga de borde.....	88
Tabla 6.8- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks, para caso de carga interior.....	89
Tabla 6.9- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas, para caso de carga de borde.....	91
Tabla 6.10- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas, para caso de carga interior.	92
Tabla 6.11- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.	96
Tabla 6.12- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.	98
Tabla 6.13- Factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga de racks.	100
Tabla 6.14- Factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga de montacargas.	102
Tabla 6.15- Análisis de tensiones de racks.....	104
Tabla 6.16- Análisis de tensiones de racks.....	105
Tabla 6.17- Análisis de tensiones de racks.....	106
Tabla 7.1- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón simple con juntas c/s dispositivos de traspaso de carga.....	109
Tabla 7.2- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas.	110
Tabla 7.3- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón de retracción compensada.....	111
Tabla 7.4- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón con fibras.....	112
Tabla 7.5- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón postensado.....	113
Tabla 7.6- Resumen de precios unitarios de los distintos tipos de pavimentos.	114

Resumen

“Análisis comparativo de distintas soluciones de pavimentos industriales de hormigón”

Este trabajo de título presenta y analiza los distintos tipos de pavimentos industriales de hormigón que existen en el mercado y los métodos para su diseño. Con lo anterior, se proporciona al lector los conceptos involucrados en el comportamiento de los pisos industriales de hormigón y de los procedimientos para su diseño.

Los tipos de pisos incorporados en este estudio son los siguientes:

- Pavimento de hormigón simple con juntas, con/sin dispositivos de traspaso de carga
- Pavimento de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas
- Pavimento de hormigón de retracción compensada
- Pavimento de hormigón con fibras
- Pavimento de hormigón postensados

Considerando que el concepto básico para el diseño estructural de un pavimento o piso de hormigón consiste en limitar los estados tensionales en la losa de modo que no sobrepase la capacidad resistente de la misma, se presenta un análisis detallado para la determinación de los estados tensionales. Para ello, se considera como base, las ecuaciones de Westergaard para el cálculo de las tensiones en la losa para distintas condiciones de carga y que son: borde, interior y esquina de losa. A lo anterior, se incorporan factores de corrección para considerar el efecto de una longitud finita de losa, presencia de dispositivos de traspaso de carga, etc.

También, se presentan las metodologías de diseño incorporadas en el ACI para los distintos tipos de pavimentos señalados anteriormente.

Con los procedimientos antes señalados, se efectúa el diseño de un piso industrial para un caso de estudio, para posteriormente efectuar un análisis económico de las soluciones obtenidas. De lo anterior es posible concluir la solución más conveniente a utilizar en una bodega industrial.

De los resultados obtenidos, se concluye que para el caso analizado existen dos alternativas de pisos atractivas a implementar, y que son pavimento de hormigón de retracción compensada y pavimento de hormigón postensado. En el caso de tratarse de un piso convencional, se preferiría la alternativa de pavimento de hormigón de retracción compensada debido a que el pavimento de hormigón postensado presenta una mayor complejidad desde el punto de vista constructivo. Por otro lado, en el caso que se requiera un piso con altos estándares de planicidad, se preferiría un piso de hormigón postensado.

Por último, ante distintas solicitudes y niveles de servicio, existen distintas alternativas de pavimentos a construir, en consecuencia no existe una solución única y la solución definitiva a adoptar dependerá de un análisis caso a caso.

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente existe un desconocimiento generalizado de los distintos tipos de pisos industriales y de sus procedimientos de diseño, no existiendo normativas al respecto. Por lo anterior, uno de los principales problemas a que se encuentra enfrentado un propietario de una futura bodega industrial tiene relación con el tipo de pavimento que deberá considerar para su diseño.

En efecto, las distintas alternativas de pavimentos de hormigón que existen actualmente son las siguientes:

- Pavimentos de hormigón simple con juntas.
- Pavimentos de hormigón reforzados para el control de ancho de grietas.
- Pavimentos de hormigón con fibras.
- Pavimentos de hormigón de retracción compensada.
- Pavimentos de hormigón postensados.

Por lo anterior surge la necesidad de estudiar, analizar y presentar los distintos tipos de pavimentos posibles a utilizar y sus respectivas metodologías de diseño.

Los pisos de hormigón, industriales, comerciales u otros, deben ser diseñados y construidos sin olvidar los aspectos económicos a los que se encuentran ligados. Además, y previo al diseño de pavimento, se debe tener claramente identificadas y definidas las condiciones de uso y/o parámetros de diseño, destacándose entre otras las siguientes cuál será el uso del piso, de qué magnitud y a qué tipo de cargas estará sometido el piso, cuáles son los requerimientos estéticos incluyendo el criterio de aceptación o rechazo de posible agrietamiento aleatorio y las características de regularidad superficial mínimas requeridas para el funcionamiento adecuado del piso que deben estar claramente resueltas previo al diseño definitivo del piso.

Entre las solicitaciones a que son sometidos los pisos industriales destacan las siguientes:

- Cargas móviles (vehículos, montacargas).
- Cargas puntuales a través de los soportes de maquinarias o estructuras de almacenamiento.
- Cargas uniformemente distribuidas y aplicadas directamente sobre la superficie del piso.

Cada uno de los tipos de pavimentos enunciados presenta ventajas y desventajas, las que deben evaluarse cuidadosamente al momento de definir la solución de piso que se desee. Por ejemplo, en las soluciones antes señaladas existen diferencias en características de planicidad, tamaño de los paños, tipos de juntas, espesores de losa, existencia de armadura, etc.; lo que hace que existan diferentes soluciones posibles para una misma condición de carga.

1.2 Objetivos

Objetivo General:

-Estudiar y analizar los distintos tipos de pavimentos industriales de hormigón y los métodos de diseño para cada uno de ellos, con el fin de proporcionar a las personas involucradas en el proyecto de un piso industrial un mayor entendimiento de las técnicas de diseño de los mismos.

Objetivos Específicos:

-Considerando las condiciones de diseño para un caso de estudio, diseñar los distintos tipos de pavimentos industriales, los cuales son: pavimentos de hormigón simple con juntas, pavimentos de hormigón con fibras, pavimentos de hormigón post tensados, pavimentos de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas y pavimentos de hormigón de retracción compensada. (Cálculo de espesor, longitud de losa, entre otros).

-De los resultados obtenidos de los diseños anteriormente citados, efectuar un análisis técnico económico de ellos.

1.3 Alcances de la investigación

En el diseño de cada pavimento, se considerará un nivel de capacidad de soporte.

En el diseño de cada pavimento, se considerarán las siguientes condiciones de carga:

- Cargas de estanterías.
- Cargas de montacargas.

En el análisis técnico económico se considerarán solo los costos directos.

El trabajo de título propuesto contempla el análisis de los pavimentos de hormigón simple con juntas, pavimentos de hormigón con fibras, pavimentos de hormigón post tensados, pavimentos de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas y pavimentos de hormigón de retracción compensada.

2. Tipos de pavimentos (ACI 360R-10)

2.1 Estructura de pavimento

Un piso industrial normalmente se estructura con una subbase granular sobre la cual se construye el pavimento de hormigón. Esta estructura de pavimento (losa de hormigón y subbase) se emplaza sobre una superficie especialmente preparada y que se denomina subrasante y que corresponde al suelo de fundación que soporta la estructura de pavimento. La principal función de la capa de subbase es proporcionar una plataforma uniforme y estable para el proceso constructivo del pavimento de hormigón. Dependiendo de las características propias del proyecto, la superficie del pavimento puede incorporar endurecedores de superficie de cuarzo o metálicos, también líquidos, conocidos normalmente como "toppings" cuya función es suministrar una mayor resistencia al desgaste superficial del piso (endurecedores de superficie) como consecuencia de las cargas que solicitan al piso. Una alternativa a lo anterior es densificar la superficie del piso en la etapa de terminación. También, para casos en que se requiera aislar el piso del suelo de fundación, ya sea por exigencias de humedad sobre el pavimento de hormigón, especialmente en zonas con napas muy superficiales puede requerirse la colocación de una membrana impermeable que sirva de barrera a la humedad, la que normalmente se coloca bajo la subbase o por ejemplo, en frigoríficos requerirse elementos de aislación para evitar posible congelamiento del suelo de fundación. También se utilizan membranas impermeables (láminas de polietileno) en caso que se requiera minimizar la fricción entre la losa y la subbase como por ejemplo en los pavimentos de hormigón postensados. La Figura 2.1 muestra esquemáticamente los elementos de un piso industrial de hormigón.

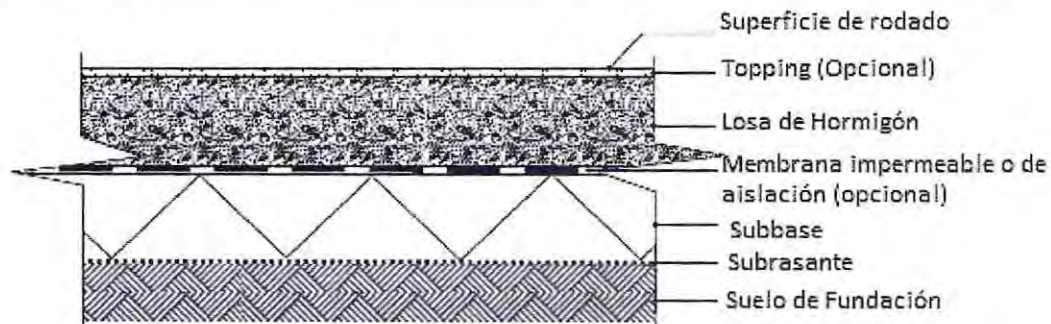


Figura 2.1- Elementos de un piso industrial de hormigón.

Previo al diseño de un piso o selección de un tipo de piso es fundamental conocer el objetivo del mismo (uso para el cual se construirá), nivel de servicio requerido, equipos que operarán sobre el piso, cargas solicitantes, resistencia al desgaste superficial, resistencia química, grado de terminación superficial, etc. Los mecanismos de abrasión o desgaste son un proceso complejo y consecuencia de la acción conjunta de diversas solicitaciones como por ejemplo acciones de las ruedas de los equipos de levante o tránsito, cargas de impacto, etc., Actualmente no existe un criterio normalizado para la evaluación de la resistencia al desgaste de un piso, y no es posible especificar una calidad de hormigón en términos de su capacidad para resistir el desgaste. La resistencia al desgaste está directamente relacionada, entre otros, con el diseño de la mezcla del hormigón, tipo de áridos, terminación y curado.

El ataque químico a los pisos de hormigón resulta del derrame de productos químicos agresivos al hormigón. La intensidad del ataque depende de varios factores, entre otros, de la composición y concentración del agente químico agresivo, del pH, permeabilidad del hormigón, y tiempo de exposición. Ejemplos de sustancia comunes que pueden entrar en contacto con el hormigón son

ácidos, vinos, cervezas, leche, azúcares y aceites minerales y vegetales. En este sentido, cualquier agente que ataque al hormigón eventualmente producirá un daño superficial al piso, dependiendo del tiempo de contacto con los agentes agresivos. En estos casos, puede considerarse la colocación de un protector superficial del piso como por ejemplo productos en base a resinas.

Un aspecto que debe tenerse presente dice relación con la resistencia al deslizamiento de los pisos. Normalmente la terminación superficial de los pisos se obtiene con el uso de helicópteros de distinto peso, obteniéndose un hormigón de mejores características resistentes superficiales con los equipos de mayor peso. Sin embargo, esta técnica resulta con una terminación de piso más lisa y en consecuencia con una menor resistencia al deslizamiento. No obstante lo anterior, como regla general, un piso de hormigón limpio y seco es razonablemente resistente al deslizamiento para la mayoría de calzados y materiales de ruedas. Sin embargo, no siempre los pisos se encuentran limpios y secos. Por lo anterior, ante la necesidad de obtener pisos con mayor resistencia al deslizamiento las opciones dependerán del tipo de piso, características de uso, etc. Entre ellas destacan el granallado, chorro de arena, aplicación de productos granulares ligados con resina, etc.

2.1.1 Pavimentos de hormigón simple con juntas con/sin dispositivo de traspaso de carga

El concepto básico del diseño de pavimentos de hormigón simple con o sin dispositivos de traspaso de carga es proporcionar un espesor de losa adecuado para prevenir el agrietamiento por fatiga (transversal, longitudinal y esquina), espaciamiento entre juntas apropiado para minimizar el agrietamiento transversal por tensiones de alabeo y contracción y abertura de juntas adecuado. En los pavimentos de hormigón, se construyen juntas para el control del agrietamiento longitudinal y transversal que resultan de los fenómenos de retracción y alabeo. Sin este control de agrietamiento, los pavimentos desarrollarían un agrietamiento aleatorio resultando en una falla prematura del pavimento, tanto desde el punto de vista funcional como estructural.

Las losas de pavimento deben estar libres para expandirse o contraerse con los cambios de humedad y temperatura. Una restricción excesiva al movimiento de losa, puede causar la falla de esta, produciéndose un agrietamiento.

La transferencia de carga en las juntas depende principalmente de la trabazón mecánica entre las dos caras de la grieta en la junta. La pérdida de transferencia de carga por aumento en la abertura de juntas, permite una mayor deflexión de la esquina de la losa facilitando su agrietamiento. El aumento paulatino de los deterioros recién mencionados, pueden eventualmente conducir a una pérdida de soporte bajo la losa, lo que aumentaría los estados tensionales de ésta al ser sometida a la acción conjunta de las cargas de tránsito y temperatura, produciéndose agrietamiento por fatiga.

El agrietamiento de esquina se puede producir por la acción conjunta de cargas de tránsito pesadas, transferencia de carga baja, y alabeo. Para minimizar este deterioro se debe mejorar la transferencia de carga y/o aumentar el espesor de losa. De lo anterior se desprende que dichas soluciones apuntan a disminuir la deflexión de esquina producto de la carga de esquina. Un factor adicional que podría aumentar las posibilidades de agrietamiento de esquina, es la existencia de subbases erosionables donde se podrían producir cavidades, resultando en un apoyo de losa irregular aumentando las deflexiones y tensiones de esquina.

El agrietamiento longitudinal, se asocia por lo general a defectos constructivos. Sin embargo, la acción conjunta de las cargas de tránsito con alabeos cóncavos facilitaría el desarrollo de este tipo de deterioro, siendo en este caso producto del consumo de fatiga.

En un pavimento de hormigón bien construido, donde no se ha producido agrietamiento por defectos o deficiencias constructivas, el desarrollo de grietas es causa de falla por fatiga, la que se produce por los estados de tensiones que se producen en la losa por la acción conjunta de las cargas de tránsito y alabeo. De ahí la importancia en limitar los niveles de las tensiones de tracción por flexión que se generan en la losa. Las variables más significativas en la falla por fatiga, corresponden al espesor de losa y la resistencia a flexotracción del hormigón.

2.1.2 Pavimentos de hormigón reforzado

El concepto básico del diseño de un pavimento de hormigón reforzado es el control del ancho de grietas de retracción entre juntas. El refuerzo normalmente consiste en barras de acero, mallas de acero electrosoldadas, fibras metálicas o sintéticas. Las barras y mallas deben colocarse a una profundidad igual a 1/3 del espesor de la losa. Este refuerzo se utiliza para controlar la abertura de las grietas. Para losas con espesor insuficiente para resistir las cargas como en el caso de losas de hormigón simple, el refuerzo requerido debe dimensionarse utilizando las técnicas de hormigón armado, recomendándose para este efecto el método descrito en el ACI 318. El uso de este método con altos niveles de tensiones en la armadura, puede sin embargo resultar en anchos de grietas excesivos.

Existen varios tipos de fibras usados en el hormigón, sin embargo, las más comunes son las fibras metálicas y las de polipropileno. La distribución de las fibras en el hormigón, permite absorber de manera más eficiente los esfuerzos de retracción por secado del hormigón ya endurecido, así como los esfuerzos generados por cambios de temperatura, disminuyendo de esta forma la posibilidad de agrietamientos originados por estos esfuerzos. Así mismo, la incorporación de fibras aumenta la tenacidad del hormigón (área bajo la curva tensión – deformación). Además, este refuerzo permite una mayor separación entre juntas y una mejor transferencia de cargas a través de las juntas de contracción, ya que las mantiene más cerradas y de esta forma conservando en el tiempo la trabazón mecánica entre los áridos a cada lado de la grieta.

Por otro lado, el uso de fibras elimina prácticamente los costos de mano de obra, de supervisión y pérdida de material, asociados con la utilización de sistemas de refuerzo tradicional, donde se requiere varios trabajadores para el armado de las losas y una gran cantidad de tiempo. Es así, que en la construcción de pisos de hormigón reforzados con fibras, el tiempo de ejecución llega a reducirse a más de la mitad en comparación con un piso reforzado con sistemas tradicionales.

Normalmente se recomienda que las fibras se agreguen al hormigón fresco en la planta de hormigón con la finalidad que se integren uniformemente a la mezcla por la acción de mezclado durante el trayecto de los camiones mixer. Es normal esperar que con el uso de fibras en la mezcla de hormigón se vea afectada la docilidad del hormigón, sin embargo, mediante pruebas previas a los trabajos a realizar, se puede estimar de muy buena manera y ser considerado en el diseño de mezcla original.

2.1.2.1 Fibras metálicas

Son fibras de acero de diferentes formas, con longitudes que van de 0,75 a 2,5 pulgadas, las cuales se vacían directamente al camión para mezclarlas con el hormigón, de manera que se obtiene una masa de hormigón homogénea, donde el refuerzo se encuentra distribuido de manera aleatoria en toda la masa de hormigón, brindando así, un refuerzo multidireccional.

Algunas de las características más importantes de las fibras metálicas son la forma que tenga para lograr un buen anclaje en el hormigón y la relación entre la longitud y el diámetro equivalente de la fibra. Esta relación es uno de los principales parámetros que diferencia a las fibras metálicas entre sí, ya que generalmente a un mayor valor de esta relación resulta en un mejor comportamiento, a cambio de una mayor dificultad en el mezclado, vaciado y acabado del hormigón.

Las fibras de acero mejoran las propiedades de ductilidad, dureza, resistencia al impacto y resistencia al desgaste, lo que depende del tipo de fibra y su dosificación. Es decir, dependen de la longitud de las fibras, de su diámetro, densidad, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad.

2.1.2.2 Fibras sintéticas

Este tipo de fibras se agregan directamente en el camión, para ser mezcladas con el hormigón, formando una mezcla homogénea, compuesta por millones de fibras dispersas en el hormigón. Una de las ventajas principales de las fibras sintéticas es que proporcionan un sistema de soporte interno al hormigón, lo cual lleva a una exudación más uniforme y a evitar la segregación de los materiales, además de disminuir la posibilidad de agrietamiento por retracción plástica durante la etapa de rigidización y contracción inicial del hormigón, que es justamente cuando se llega a presentar la formación de microfisuras. En la etapa plástica, las fibras sintéticas mantienen estas microfisuras más cerradas debido a la fricción que existe entre las fibras y los áridos.

2.1.3 Pavimentos de hormigón de retracción compensada

El hormigón de retracción compensada (HRC) es un hormigón expansivo que, cuando está debidamente restringido por la armadura que se coloca a una profundidad igual a 1/3 del espesor de la losa y la fricción entre la losa y la subbase granular, experimenta una expansión inicial igual o ligeramente superior a la retracción de fraguado prevista. De esta forma, debido a la restricción, durante la etapa de expansión el hormigón experimentará una cierta pre compresión, la que luego se irá liberando durante la etapa de retracción. El resultado esperado es que, en su estado final de equilibrio, el hormigón permanezca con tensión nula o con una ligera compresión residual, minimizando el riesgo de fisuración y alabeo. Asimismo, con un correcto diseño del piso los HRC reducen el alabeo de construcción de las losas y permite tamaños de paños de mayores dimensiones. El diseño del espesor de losa de este tipo de pavimentos es el mismo que el utilizado para el diseño de pavimentos de hormigón simple con juntas. La longitud de los paños es de hasta 45 m. Normalmente, las juntas de este tipo de pavimento se diseñan de manera que coincida con las líneas de pilares de la estructura.

2.1.4 Pavimentos de hormigón postensado

El principio del diseño de un pavimento de hormigón postensado, es proporcionar un estado de compresión en el pavimento de hormigón mediante el tensado de cables de acero que se encuentran insertos en la losa de hormigón. Pueden estar dispuestos en una o en las dos direcciones. De esta forma, el hormigón se encuentra en un estado tensional de compresión el que por la acción de las cargas el nivel de compresión en la losa disminuye. De esta manera, es posible diseñar espesores de losa menor que los pavimentos de hormigón simple o reforzado. Además, con esta técnica es posible el diseño de grandes paños sin la existencia de juntas o bien con juntas que se encuentran totalmente inadvertidas por la compresión que se le entrega al hormigón y de esta forma “desaparecen” las juntas.

En la Tabla 2.1 siguiente se muestra un cuadro comparativo de los distintos tipos de pisos de hormigón incluyendo sus principales ventajas y desventajas. Además, en la Tabla 2.2 se presenta un cuadro con las diferentes clases de pisos en base a su uso y técnicas de terminación final recomendada.

Tabla 2.1- Cuadro comparativo de pisos industriales de hormigón.

Tipo de Piso	Ventajas	Desventajas
Hormigón simple sin refuerzo con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de construir Por lo general esta solución de pavimento es la más económica constructivamente 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere la conformación de juntas de contracción a una distancia del orden de los 3 m Esta solución de pavimento está más expuesta a que experimente alabeo y deterioro de juntas Gran cantidad de juntas que mantener La transferencia de carga en las juntas es variable si no posee dispositivos de transferencia de carga La planicidad de la losa puede disminuir en el tiempo
Reforzado con barras o mallas electrosoldadas	<ul style="list-style-type: none"> El refuerzo se utiliza para limitar el ancho de las grietas 	<ul style="list-style-type: none"> Normalmente de mayor costo que un piso de hormigón simple con juntas El agrietamiento que pueda experimentar el piso es en función del tamaño de los paños Esta solución de pavimento está más expuesta a que experimente alabeo La transferencia de carga en las juntas es variable si no posee dispositivos de transferencia de carga
Continuamente reforzado con barras o mallas electrosoldadas	<ul style="list-style-type: none"> No requiere juntas de contracción Restringe el alabeo de la losa Menores cambios en la planicidad del piso con el tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere cuantía de armadura relativamente alta (por lo menos 0,5%) colocada cerca de la parte superior de la losa para eliminar las juntas Por lo general se producen grietas finas espaciadas cada 0,9 a 1,8 m
Hormigón de retracción compensada	<ul style="list-style-type: none"> Permite la construcción de paños con juntas de construcción cada 12 a 46 m No requiere juntas de contracción Reduce el costo por mantenimiento de las juntas debido al mayor tamaño de los paños Aumenta la durabilidad superficial y resistencia a la abrasión Minimiza el alabeo de las losas 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de la colocación de una armadura superficial para desarrollar la compensación por retracción Menor tiempo para la terminación superficial del piso Debe permitirse que el hormigón se expanda antes que comience la contracción por secado Debe considerarse la secuencia constructiva de los paños adyacentes que permita el desarrollo de la expansión inicial del hormigón El contratista debe tener experiencia con este tipo de hormigón
Postensado	<ul style="list-style-type: none"> Juntas de Construcción de hasta 150 m Puede evitar la ocurrencia de grietas de retracción y de flexión Elimina las juntas de contracción y su mantenimiento. Minimiza el alabeo de las losas Tiene un comportamiento elástico cuando es sobrecargado Menores espesores de piso Mejor estándar de planicidad en el largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> Proceso constructivo más complejo El contratista debe tener experiencia con hormigón postensado Mayor supervisión para garantizar la adecuada colocación y tensado de los cables Antieconómico para superficies pequeñas Requiere el detalle para perforaciones en la losa y del perímetro para los movimientos de la losa Evaluación del impacto del corte de tendones por perforaciones del piso después de construido
Hormigón reforzado con fibras de acero	<ul style="list-style-type: none"> Posee una mayor resistencia al impacto y a las cargas de fatiga que un piso de hormigón reforzado con armadura o malla Fácil de construir 	<ul style="list-style-type: none"> Puede requerir ajustes en los procedimientos estándares para la fabricación, colocación y terminación del hormigón Las fibras pueden quedar expuestas en la superficie de la losa No se recomienda el uso de fibras de acero en pisos expuestos al agua debido a que las fibras cercanas a la superficie tienden a oxidarse
Hormigón reforzado con fibras sintéticas	<ul style="list-style-type: none"> Ayuda a reducir el agrietamiento por retracción plástica Fibras macrosintéticas proporcionan una mayor resistencia al impacto y a cargas de fatiga, de forma similar a las fibras de acero Fácil de construir Las fibras sintéticas no se oxidan 	<ul style="list-style-type: none"> El espaciamiento entre juntas (tamaño de paños) de losas reforzadas con fibras macrosintéticas son las mismas que para las losas con fibras de acero Fibras sintéticas están expuestas a las deformaciones por creep

Ref.: (ACI 360R-10)

Tabla 2.2- Clases de pisos de acuerdo a su uso.

1. Una capa	Superficie expuesta - Tránsito Peatonal	Oficinas, iglesias, comerciales, institucionales, residenciales	Acabado uniforme, agregado antideslizante en áreas específicas, curado	Acabado Normal con lana de acero, terminación antideslizante cuando sea necesario
		Decorativo	Agregado mineral de color, agregado expuesto, estampada o patrones de incrustaciones, disposición de junta artística, curado	Según sea necesario
2. Una capa	Superficie cubierta- Tránsito Peatonal	Oficinas, iglesias, comerciales, residenciales, institucionales con revestimientos de pisos	Losas planas y a nivel adecuado para la aplicación de revestimientos, curado. Coordinar las juntas con los revestimientos aplicados	Acabado ligero con lana de acero
3. Dos capas	Superficie expuesta o cubierta - Tránsito peatonal	Recubrimiento adherido o no adherido sobre la losa, edificios comerciales o no industriales	Losa Base - tolerancia superficial uniforme, curado. Recubrimiento no adherido - espesor mínimo 75 mm, reforzado, curado. Recubrimiento adherido - agregados apropiadamente dimensionados, espesor mínimo 19mm, curado	Losa base - Acabado con lana bajo cubierta no adherida; limpia, superficie texturada bajo cubierta adherida. Cubierta - para superficie expuesta, acabado con lana de acero normal. Para superficie cubierta, acabado ligero con lana de acero
4. Una capa	Superficie expuesta o cubierta - Tránsito peatonal o vehicular liviano	Institucional o comercial	Losa plana y nivelada adecuada para la colocación de revestimientos, agregado antideslizante para áreas específicas, curado. Coordinar las juntas con los revestimientos aplicados	Acabado normal con helicóptero
5. Una capa	Superficie expuesta - tránsito vehicular industrial, es decir, ruedas sólidas moderadamente blandas	Plantas industriales para la fabricación, procesamiento y almacenamiento	Subrasante uniforme, distribución de juntas, resistencia a la abrasión, el curado	Acabado con helicóptero pesado
6. Una capa	Superficie expuesta - tránsito vehicular industrial pesado e intenso, es decir, ruedas rígidas y cargas elevadas de ruedas	Pisos industriales sometidos a tránsito pesado; pueden estar sometidos a cargas de impacto	Subrasante uniforme, distribución de juntas, transferencia de carga, resistencia a la abrasión, curado	Endurecedor superficial metálico o mineral, acabado superficial con helicóptero pesado
7. Dos capas	Superficie expuesta - tránsito vehicular industrial pesado e intenso, es decir, ruedas rígidas y cargas elevadas de ruedas	Pisos en dos capas adheridas sometidas a tránsito pesado y cargas de impacto	Losa Base - subrasante uniforme, reforzada, distribución de juntas, nivel superficial, curado. Recubrimiento - agregado mineral o metálico bien graduado, espesor mínimo 19 mm. Aplicación de endurecedor superficial de árido mineral o metálico, curado	Limpio, superficie de losa de base texturizada adecuada para la colocación del recubrimiento adherido. Acabado con helicóptero pesado
8. Dos capas	Al igual que en las clases 4, 5 o 6	Recubrimiento no adherido en pisos nuevos o existentes	Antiadherente en la losa base, espesor mínimo de 100 mm, resistencia a la abrasión, curado	Al igual que en las clases 4, 5 o 6
9. Una capa o recubrimiento	Superficie expuesta - pisos superplanos requerimientos de tolerancia superficial críticos. Vehículos especiales para el transporte de elementos o materiales o tolerancias específicas que requieren los equipos de robótica.	Pasillos estrechos, almacenes de gran altura; estudios de televisión, pistas de patinaje de hielo, o gimnasios	Diversos requerimientos de calidad del hormigón. Procedimientos de aplicación especiales y se recomienda un control exhaustivo a los detalles cuando se utilizan endurecedores. FF 50 a FF 125. Curado	Hormigonado en franjas de 6m de ancho máximo

Ref.: (ACI 302.1R-04)

3. Cargas (ACI 360R-10)

Los pisos industriales se encuentran sometidos a cargas o solicitaciones en la que se distinguen dos tipos; las provenientes de los sistemas de almacenamiento de la mercadería propiamente tal (carga a piso, cargas de pallets, descarga de pilares de estanterías, etc.) y la de los equipos utilizados para el almacenamiento de las cargas (equipos de levante en general, vehículos motorizados, etc.).

En consecuencia los pisos industriales se encuentran sometidos a la acción conjunta de los siguientes tipos de cargas:

- ❖ Cargas de rueda de vehículos.
- ❖ Cargas concentradas.
- ❖ Cargas distribuidas.
- ❖ Cargas lineales.
- ❖ Cargas de construcción.
- ❖ Efectos ambientales.

Por lo anterior, para el diseño de las losas deben analizarse las diferentes condiciones de carga posibles, seleccionándose la más crítica.

Uno de los aspectos más importantes a que se encuentra sometido el profesional al momento de diseñar el pavimento, es que normalmente se desconoce la tipología de carga y configuración (layout) del sistema de almacenamiento de la mercadería, aspecto que hace muy difícil la selección y criterios a adoptar para la selección de las cargas a considerar en el diseño.

Uno de los sistemas más comunes del almacenamiento de mercadería es mediante el uso de estanterías o racks los que normalmente son del tipo espalda con espalda y paralelo a la línea o eje de columnas de la bodega. La alineación de las líneas de columnas con frecuencia coincide con juntas de contracción o construcción.

Las cargas distribuidas son las cargas que convencionalmente actúan sobre un área grande del piso. Las cargas son el resultado del material almacenado directamente en el piso dentro del área de almacenamiento.

Normalmente las cargas distribuidas colocadas directamente sobre la losa de hormigón no son lo suficientemente grandes para provocar asentamientos excesivos en subrasante bien preparadas y compactadas.

Las cargas concentradas son las que normalmente controlan el diseño del piso, pues éstas producen esfuerzos a tracción mayores que las cargas distribuidas. La descarga a piso de estanterías individuales varía de 35 a 100 kN. En los depósitos de gran altura las cargas puntuales pueden acercarse a 200 kN.

El diseño del piso, bajo la condición de cargas distribuidas tiene por objetivo prevenir la formación de grietas en los pasillos o áreas no cargadas debidas al momento negativo que se produce en la superficie de la losa.

En la eventualidad que las cargas distribuidas sean muy elevadas, es posible que se requiera la verificación del comportamiento del subsuelo desde el punto de vista geotécnico, con sentido de verificar que como consecuencia de la carga no se producirán asentamientos especialmente de consolidación en el caso de estar frente a suelos arcillosos.

Para el caso de cargas distribuidas con pasillos intermedios, existe el concepto del ancho crítico del pasillo, para el cual se presenta el esfuerzo máximo en la losa. El ancho crítico del pasillo existe cuando el momento actuante máximo debido a la carga de un lado del pasillo, coincide con el punto máximo momento debido a la carga en el otro lado del pasillo, por lo que duplica el momento negativo (tracción en la parte superior de la losa) en el centro del pasillo. Para cualquier otro ancho de pasillo, diferente al crítico, el momento actuante máximo debido a las cargas de cada lado del pasillo no coincide, haciendo que de hecho la carga de un lado contrarreste el esfuerzo causado por la carga en el otro lado.

La capacidad de los equipos de levante por lo general no es superior a 3 toneladas, pero puede ser mayor en aplicaciones especializadas. Muchos de estos equipos tienen ruedas pequeñas (normalmente poliuretano) y así las cargas puntuales pueden ser altas.

Las superficies del piso en el que operan estos equipos deben estar planas y niveladas. Un problema con el uso de este tipo de vehículos son las juntas de los pavimentos, las que de no presentar una alta transferencia de carga, las losas experimentan movimientos verticales diferenciales al paso de la rueda sobre la junta con el consiguiente deterioro de las juntas y de las ruedas de estos equipos convirtiéndose en un eventual elevado costo de mantenimiento. Por lo anteriormente señalado, en los pisos que se proyecte el uso intensivo de este tipo de equipos se recomienda el diseño de un piso "sin juntas" o con un reducido número de ellas.

En pasillos muy estrechos, los elevadores recorren rutas definidas por lo que es apropiado medir y controlar la planicidad en cada una de las pistas.

La mayoría de estos elevadores tienen tres ruedas, dos en el eje de carga frontal y una rueda motriz en la parte trasera. Algunos tienen dos acoplamientos cerrados y ruedas en la parte trasera que actúan como una rueda. Algunos elevadores tienen cuatro ruedas con una en cada "esquina". Cuando se opera en los pasillos, los elevadores son guiados por carriles en los lados del pasillo o por alambres de guía inductivos en el suelo y no son controlados directamente por el operador. En la losa la inclusión de los cables de guía inductivos puede afectar el espesor de diseño de la losa. Los alambres de guía tienen que mantenerse alejados de las barras de acero de refuerzo. Las fibras de acero en el hormigón no suelen afectar a los sistemas de orientación.

Un aspecto muy importante en el comportamiento y análisis de un piso tiene relación con las variaciones volumétricas que éste experimenta al producirse variaciones de la temperatura y/o humedad a través del espesor de la losa. Estas variaciones tienen asociados cambios volumétricos en el hormigón los que hacen que las losas experimenten deformaciones, normalmente conocidas como deformaciones de alabeo (por temperatura, hídrico o ambos). Aun cuando en este documento se aborde el tema de pisos industriales (en recintos cerrados), donde el pavimento se encuentra protegido de los efectos medioambientales ello no significa que las losas no puedan alabearse. Lo anterior, principalmente debido a que durante el proceso constructivo del pavimento, se produce variaciones de la temperatura y humedad en el espesor de la losa, generándose igualmente deformaciones en el piso. Cuando la temperatura en la superficie de la losa es mayor que en la cara inferior de la losa, la superficie de la losa tiende a expandirse con respecto a la fibra neutra mientras que las fibras inferiores de la losa tienden a contraerse (alabeo convexo). Sin embargo, el peso propio de la losa restringe su expansión y contracción; por lo tanto, se inducen tensiones de compresión en la fibra superior de la losa mientras que en la fibra inferior se producen tensiones de tracción. En caso contrario cuando la superficie de la losa tiene una temperatura menor que la cara inferior de la losa, las fibras superiores tienden a contraerse con respecto a las fibras inferiores (alabeo cóncavo). La variación de humedad en el espesor de la losa produce un efecto similar al de la temperatura. Por lo anterior, los pisos más susceptibles a experimentar alabeo son los pisos de hormigón simple sin armadura. Por el contrario, pisos de hormigón de retracción compensada y de hormigón postensado, minimizan este efecto en forma importante.

En la Figura 3.1 se muestra un cuadro que ilustra las condiciones de carga que normalmente controlan el diseño de un piso industrial.

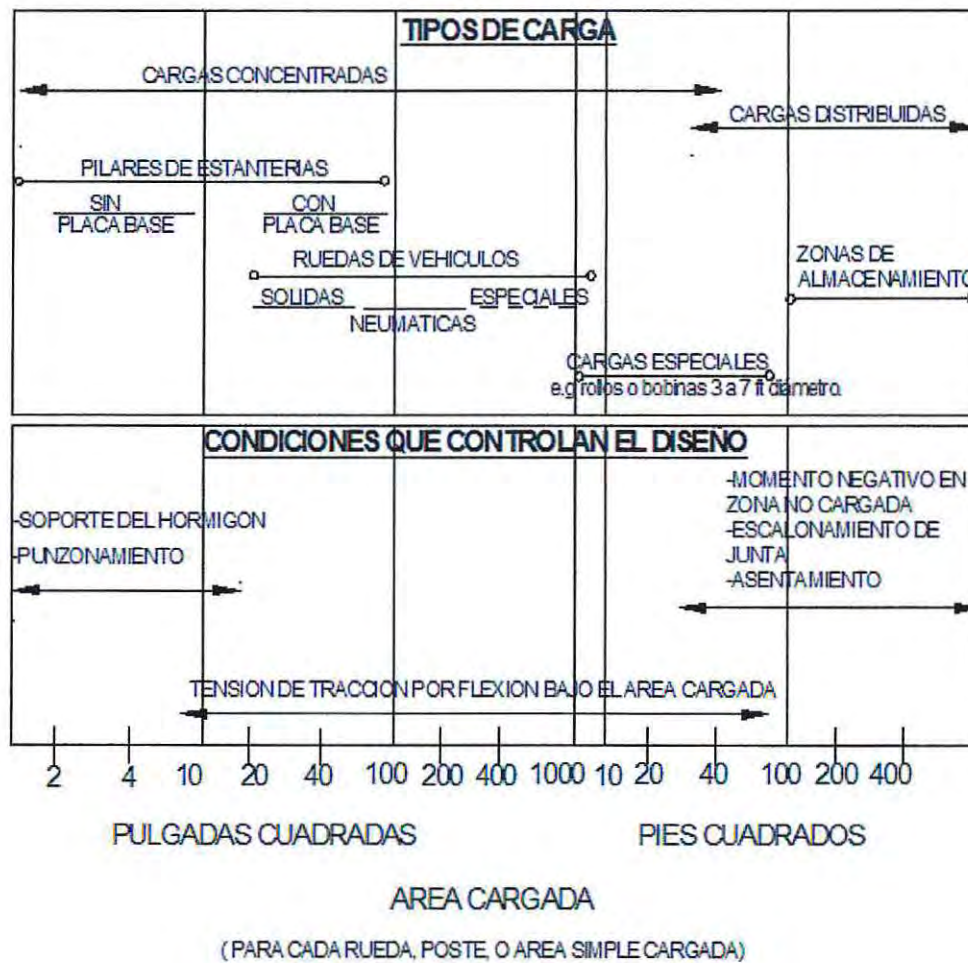


Figura 3.1- Condiciones de carga que controlan el diseño del espesor de un piso (ACI 360R-10).

4. Análisis estructural de losas

Los modelos de agrietamiento de losas desarrollados para pavimentos de hormigón utilizan como concepto básico que las losas se fatigan y por ello su agrietamiento. Para ello, se utiliza la hipótesis de Miner (Miner, 1945) para determinar el consumo acumulado de fatiga, y posteriormente predecir el nivel de agrietamiento promedio del pavimento dadas las distintas condiciones de carga y clima. Para calcular el consumo de fatiga es necesario determinar el nivel de tensiones que se produce en las losas, y a través de una ley de fatiga obtener el número de repeticiones admisibles de las sollicitaciones de carga.

Para la determinación de las tensiones en las losas es necesario utilizar un modelo estructural adecuado que permita considerar las distintas condiciones de carga y clima para diferentes condiciones de borde. Con el desarrollo del método de elementos finitos casi cualquier situación puede analizarse con esta poderosa herramienta. Sin embargo, el método de elementos finitos no puede implementarse fácilmente como parte de un método de diseño debido a su complejidad, requerimientos computacionales, y tiempo de ejecución. Para resolver este problema se utilizan procedimientos analíticos alternativos a partir de resultados de elementos finitos, de forma tal de determinar la respuesta estructural.

Las soluciones clásicas analíticas no son tan generales como la aplicación del método de los elementos finitos. La ecuación de Lagrange es la ecuación diferencial básica para losas elásticas con condiciones de apoyo y borde generales (Timoshenko, 1959). Esta ecuación es la base para las ecuaciones de Westergaard para una losa apoyada sobre una fundación del tipo líquido denso (Winkler) y para una losa sobre una fundación como un sólido elástico.

4.1 Tensiones debidas a carga

Para determinar las tensiones en las losas pueden utilizarse básicamente dos métodos: soluciones analíticas y el método de elementos finitos. Las ecuaciones analíticas desarrolladas originalmente por Westergaard pueden aplicarse a una carga circular, semicircular, elíptica, o semi-elíptica con carga de borde, interior y esquina. El método de los elementos finitos puede aplicarse para analizar varias losas ya sean apoyadas sobre una fundación del tipo líquido denso (winkleriana) o sólido elástico, con transferencia de carga a través de las juntas.

La fundación del tipo winkleriana supone que la subrasante está compuesta por un conjunto de resortes independientes, donde la deflexión en cualquier punto es proporcional a la fuerza aplicada en el punto y es independiente de la fuerza aplicada en otros puntos.

Las ecuaciones de Westergaard son una buena aproximación para el cálculo de las tensiones en las losas debido a las cargas, pero debido a los supuestos que se utilizaron en su desarrollo, ante situaciones más reales como por ejemplo longitud finita de las losas o la presencia de un diferencial de temperatura a través del espesor de la losa son poco prácticas. Para resolver situaciones más complejas es posible utilizar el método de los elementos finitos. La ventaja de las ecuaciones de Westergaard es su fácil implementación en algoritmos con un bajo costo de recursos computacionales.

4.1.1 Carga de esquina

(Westergaard, 1926) obtuvo la siguiente ecuación para la condición de carga de esquina, posteriormente revisada por (Loannides, 1985):

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (\text{ec. 4.1})$$

donde:

σ_c = Tensión máxima de esquina en la fibra superior de la losa (psi).

P = Carga Aplicada (lb).

h = Espesor de losa (in).

a = Radio del área cargada (in).

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}, \text{ radio de rigidez relativo del sistema losa- suelo de fundación (in).}$$

k = Módulo de reacción de la subrasante (psi/in).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (psi).

μ = Razón de Poisson.

(Westergaard, 1926) también determinó que el punto donde se produce el momento máximo se encuentra a una distancia de la esquina dada por la ecuación.

$$X_1 = 2(a\sqrt{2} \cdot l)^{0.5} \quad (\text{ec. 4.2})$$

4.1.2 Carga de borde

(Loannides y colaboradores, 1985) actualizaron la ecuación original de Westergaard para determinar las tensiones de borde y que es la siguiente:

$$\sigma = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{1-\mu}{2} + 1.18(1+2\mu)(a/l) \right] \quad (\text{ec 4.3})$$

donde:

σ = Tensión máxima bajo la carga en la fibra inferior de la losa (psi).

P = Carga total aplicada (lb).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (psi).

h = Espesor de la losa (in).

k = Módulo de reacción de la subrasante (psi/in).

a = Radio del área cargada (in).

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}, \text{ radio de rigidez relativo del sistema losa- suelo de fundación (in).}$$

μ = Razón de Poisson.

En la Figura 4.1 se muestra un esquema de las tensiones en el borde de la losa para una carga de borde circular.

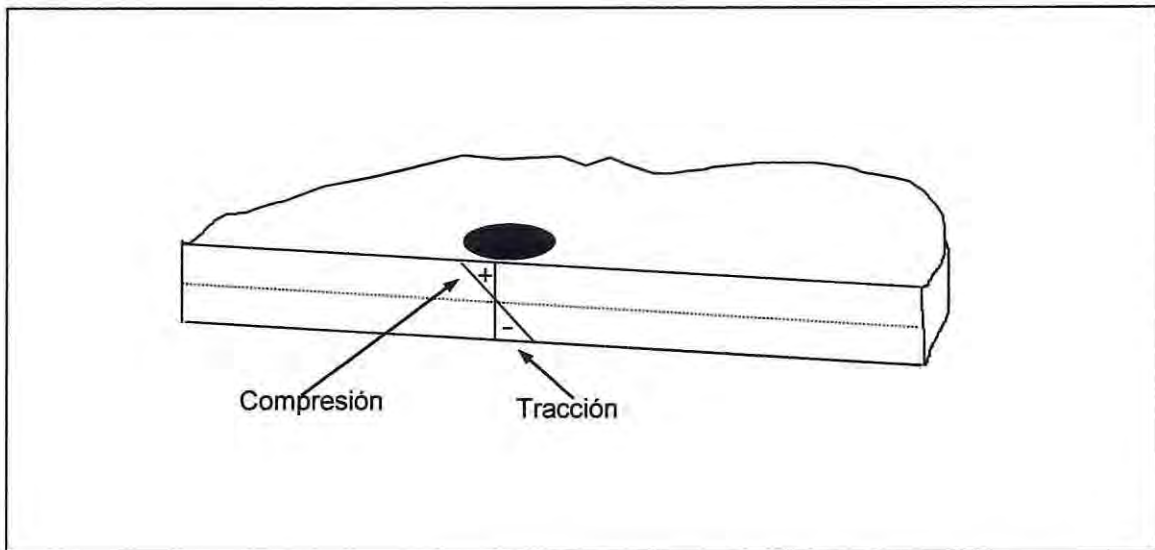


Figura 4.1- Tensiones para la condición de carga de borde (Cabrera, 1998).

4.1.2.1 Corrección por diferentes condiciones de borde

A fin de incorporar el efecto de diferentes condiciones de carga y/o borde, en la tensión de borde en la losa, se introducen factores de corrección de acuerdo a lo siguiente (Cabrera, 1998):

- Para el cálculo de la tensión en la losa para una configuración de carga de rueda doble o tándem se determina el radio equivalente de una carga aislada, según se presenta más adelante.
- Aplicar el factor de corrección por longitud de losa.
- Para el caso en que la carga se encuentra alejada a una cierta distancia del borde de la losa, incorporar el factor de corrección por este efecto.
- Aplicar el factor de corrección por efecto de la transferencia de carga de una losa adyacente.

4.1.2.1.1 Radio equivalente de carga aislada

A continuación se presentan las diferentes expresiones que permiten calcular el radio equivalente de una carga aislada para diferentes configuraciones de rueda de modo de aplicar la ecuación de Westergaard.

a) Ruedas dobles (Cabrerá, 1998)

$$\frac{a_{eq}}{a} = 0.909 + 0.339485 \left(\frac{S}{a}\right) + 0.103946 \left(\frac{a}{l}\right) - 0.01788 \left(\frac{S}{a}\right)^2 - 0.045229 \left(\frac{S}{a}\right)^2 \left(\frac{a}{l}\right) + 0.00436 \left(\frac{S}{a}\right)^2 - 0.301805 \left(\frac{S}{a}\right) \left(\frac{a}{l}\right)^3 + 0.034664 \left(\frac{S}{a}\right)^2 \left(\frac{a}{l}\right)^2 + 0.001 \left(\frac{S}{a}\right)^3 \left(\frac{a}{l}\right) \quad (\text{ec. 4.4})$$

donde:

a_{eq} = Radio equivalente del área cargada (in).

a = Radio del área de contacto de una rueda (in).

S = Espaciamiento de ruedas dobles (in).

l = Radio de rigidez relativo (in).

$$\text{Límites:} \quad \begin{aligned} &0 \leq (S/a) \leq 20 \\ &0.05 \leq (a/l) \leq 0.5 \end{aligned}$$

b) Ruedas Tandem (Cabrerá, 1998)

$$\frac{a_{eq}}{a} = 2.199479 + 0.7476 \left[\ln\left(\frac{t}{a}\right) \ln\left(\frac{a}{l}\right) \right] + 0.54807 \left[\ln^2\left(\frac{t}{a}\right) \right] - 0.48659 \left[\ln^2\left(\frac{t}{a}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{a}{l}\right) \right] - 0.29507 \left[\ln^3\left(\frac{t}{a}\right) \right] - 0.02811 \left[\ln^3\left(\frac{a}{l}\right) \right] \quad (\text{ec. 4.5})$$

donde:

a_{eq} = Radio equivalente del área cargada (in).

a = Radio del área de contacto de una rueda (in).

t = Espaciamiento de ruedas en el sentido longitudinal (in).

l = Radio de rigidez relativo (in).

$$\text{Límites:} \quad \begin{aligned} &4 \leq (t/a) \leq 16 \\ &0.05 \leq (a/l) \leq 0.5 \end{aligned}$$

Con las ecuaciones anteriores, puede obtenerse fácilmente la tensión de tracción por flexión para carga de borde, en el caso de un eje Tandem con ruedas dobles, aplicando el principio de superposición.

4.1.2.1.2 Efecto de longitud de losa

En la siguiente ecuación se presenta el factor de corrección para incorporar el efecto de la longitud finita de la losa (Cabrera, 1998).

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_\infty} = 0.582282 - 0.533078\left(\frac{a}{l}\right) + 0.181706\left(\frac{L}{l}\right) - 0.019824\left(\frac{L}{l}\right)^2 + 0.109051\left(\frac{a}{l}\right)\left(\frac{L}{l}\right) \quad (\text{ec. 4.6})$$

donde:

σ_∞ = Tensión de borde de Westergaard (psi).

σ_L = Tensión de borde para losas con longitud L (psi).

L = Longitud de losa, (in).

Las otras variables son las mismas que las definidas anteriormente.

Límites: $3 \leq (L/a) \leq 5$
 $0.05 \leq (a/l) \leq 0.3$

4.1.2.1.3 Distancia de la carga al borde de la losa (Cabrera, 1998)

$$\frac{\sigma_{\bar{D}}}{\sigma_{\bar{D}=0}} = -0.1574321 + 0.2693503\left(\frac{a}{l}\right) + 0.357644\left(\frac{1}{\bar{D}/l}\right) - 0.0589073\left(\frac{1}{\bar{D}/l}\right)^2 + 0.003486\left(\frac{1}{\bar{D}/l}\right)^3 \quad (\text{ec. 4.7})$$

donde:

\bar{D} = Distancia entre el borde externo de la rueda y el borde de la losa (in).

a, l = Definidos anteriormente (in).

Límites: $0.125 \leq (\bar{D}/l) \leq 3$
 $0.05 \leq (a/l) \leq 0.3$

Para razones (\bar{D}/l) menores que 0.125 se recomienda interpolar linealmente entre el factor de corrección para $(\bar{D}/l)=0.125$ y 0, para el cual el factor multiplicativo es 1.

4.1.2.1.4 Transferencia de carga de losa adyacente (ERES Consultants, 1987)

La transferencia de carga en juntas se define como la razón entre la deflexión vertical de la losa descargada respecto de la losa cargada, es decir:

$$TC = \frac{\delta_1}{\delta_2} * 100 (\%) \quad (\text{ec. 4.8})$$

donde:

δ_1 = Deflexión vertical de la losa en el lado descargado.

δ_2 = Deflexión vertical de la losa en el lado cargado.

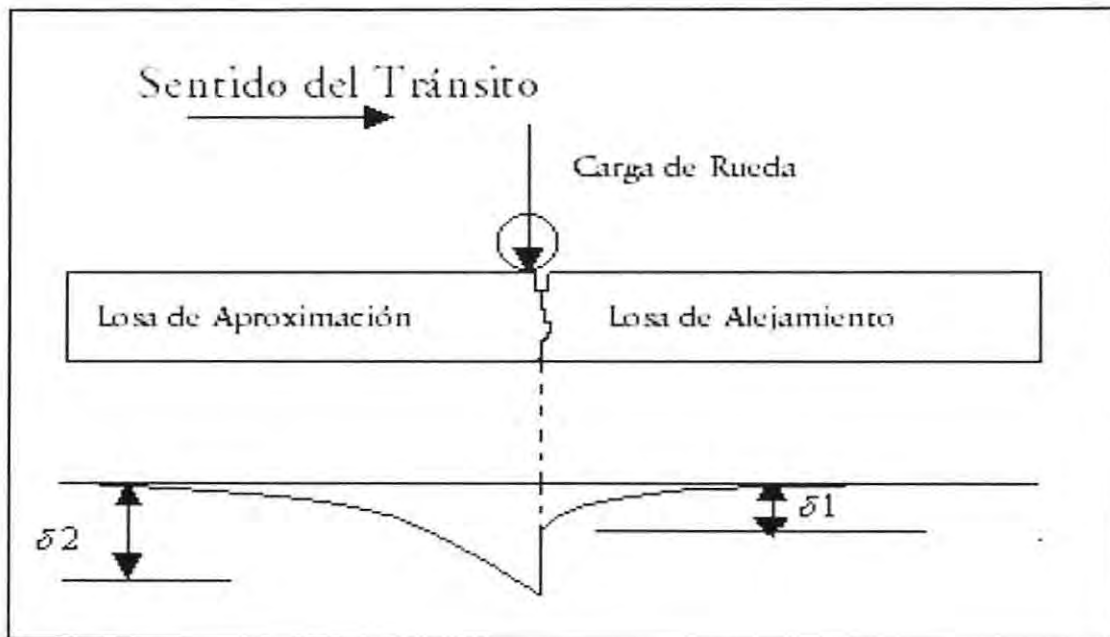


Figura 4.2- Esquema concepto de transferencia de carga en juntas.

Para corregir las tensiones de borde de la losa por este efecto se pueden utilizar las siguientes ecuaciones (Cabrera, 1998):

$$\frac{\sigma_{AGG}}{\sigma_{AGG=0}} = 0.99864 - 0.51237 \left(\frac{a}{l} \right) - 0.0762 \left[\ln \left(\frac{AGG}{kl} \right) \right] + 0.00315 \left[\ln^2 \left(\frac{AGG}{kl} \right) \right] + 0.015936 \left[\left(\frac{a}{l} \right)^2 \ln^2 \left(\frac{AGG}{kl} \right) \right] \quad (\text{ec.4.9})$$

donde:

AGG = Factor de trabazón del árido según la Figura 4.3.

Límites: $5 \leq (AGG/kl) \leq 50000$
 $0.05 \leq (a/l) \leq 0.3$

$$\frac{\sigma_{AGG}}{\sigma_{AGG=0}} = 1 - 0.025169 \left(\frac{AGG}{kl} \right) - 0.086034 \left(\frac{a}{l} \right) \left(\frac{AGG}{kl} \right) \quad (\text{ec.4.10})$$

Límites: $0 \leq (AGG/kl) \leq 5$
 $0.05 \leq (a/l) \leq 0.3$

En las ecuaciones anteriores, σ_{AGG} es la tensión de flexión de borde con trabazón del árido y $\sigma_{AGG=0}$ es la tensión de flexión de la losa con borde libre, esto es, losa aislada.

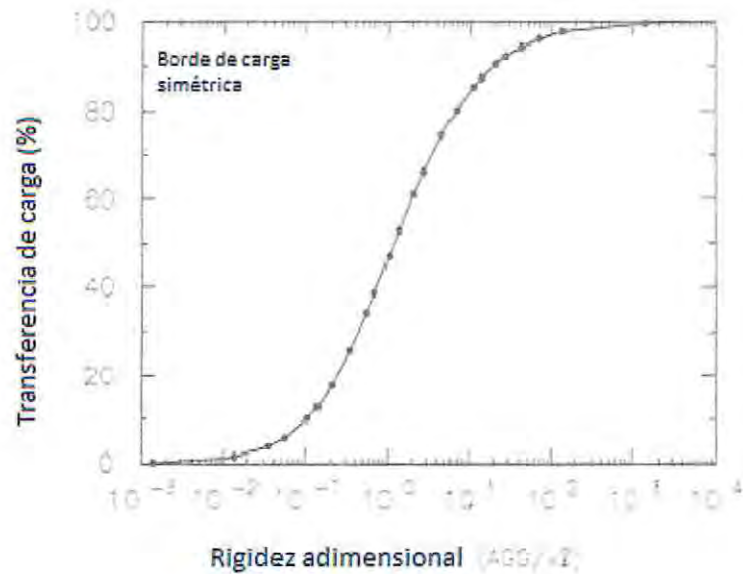


Figura 4.3- Relación transferencia de carga en juntas con el factor adimensional AGG/kl (Cabrera, 1998).

4.1.3 Carga interior

La ecuación de Westergaard para determinar la tensión por carga interior de losa es la siguiente, posteriormente revisada por (Loannides, 1985):

$$\sigma = \frac{3P(1+\mu)}{2\pi h^2} \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) + 0.5 - \gamma \right] + \frac{3P(1+\mu)}{64h^2} \left[(a/l)^2 \right] \quad (\text{ec. 4.11})$$

donde:

P = Carga total aplicada (lb).

h = Espesor de la losa (in).

a = Radio del área de contacto de una rueda (in).

$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}$, radio de rigidez relativo del sistema losa- suelo de fundación (in).

μ = Razón de Poisson.

E = Módulo de elasticidad del hormigón (psi).

k = Módulo de reacción de la subrasante (psi/in).

4.1.4 Carga distribuida

Muchas veces los pisos industriales se encuentran sometidos a cargas distribuidas que se encuentran directamente aplicadas al piso. En este caso, la ubicación de los puntos de tensiones máximas no se encuentran bajo la carga sino que alejada de ella, generando tensiones de tracción en la fibra superior de la losa, resultando eventualmente en agrietamiento.

4.2 Tensiones debidas al alabeo por temperatura

En losas de pavimento expuestas a la radiación solar, durante el día cuando la temperatura en la superficie de la losa es mayor que en la cara inferior de la losa, la superficie de la losa tiende a expandirse con respecto a la fibra neutra mientras que la fibras inferiores de la losa tiende a contraerse (Figura 4.4 , alabeo convexo). Sin embargo, el peso propio de la losa restringe su expansión y contracción; por lo tanto, se inducen tensiones de compresión en la fibra superior de la losa mientras que en la fibra inferior se producen tensiones de tracción. En la noche cuando la superficie de la losa tiene una temperatura menor que la cara inferior de la losa, las fibras superiores tienden a contraerse con respecto a las fibras inferiores (Figura 4.5, alabeo cóncavo); así, se inducen tracciones en la fibra superior de la losa y compresiones en la fibra inferior. Las tensiones debidas al alabeo por temperatura combinadas con las tensiones inducidas por las cargas producen las condiciones de tensiones máximas en las losas (Cabrera, 1998).

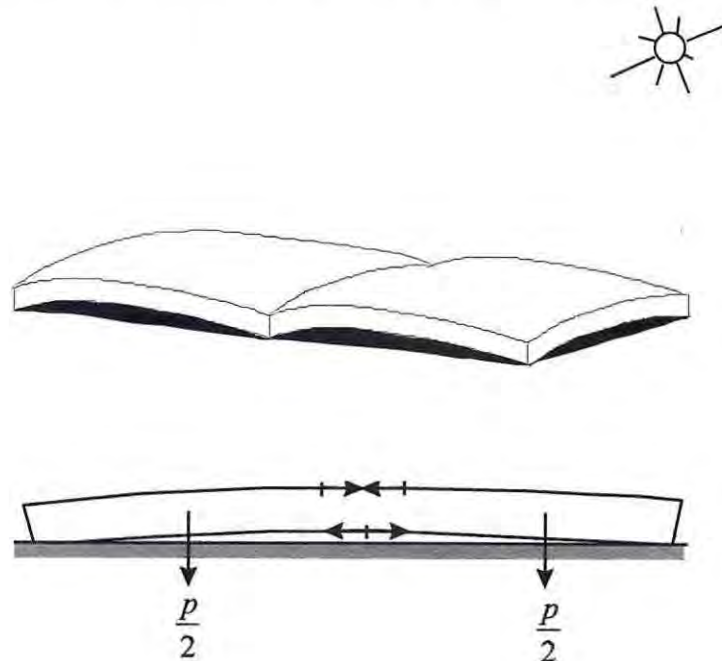


Figura 4.4- Condición de día, alabeo convexo (Cabrera, 1998).

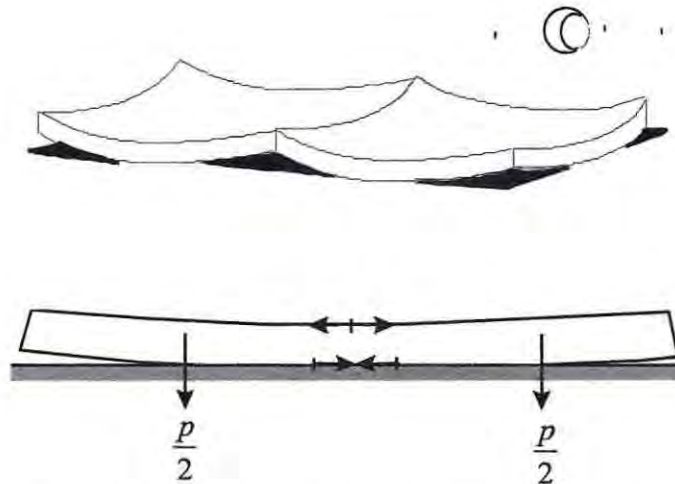


Figura 4.5- Condición nocturna, alabeo cóncavo (Cabrera, 1998).

Westergaard desarrolló expresiones que permiten determinar las tensiones inducidas en la losa como consecuencia de la presencia de un diferencial de temperatura entre la fibra superior e inferior de la losa. Para el caso de una losa finita en ambas direcciones, como en la Figura 4.6, con una longitud L_x en la dirección X y L_y en la dirección Y, la tensión máxima en el centro de la losa en la dirección X puede expresarse como (Cabrera, 1998):

$$\sigma_x = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)}(C_x + \mu C_y) \quad (\text{ec. 4.12})$$

en donde C_x y C_y son factores de corrección para una losa finita. El primer término en la ecuación anterior se debe a la flexión en la dirección X, y el segundo término se debe a la tensión por flexión en la dirección Y. De igual forma, la tensión en la dirección Y es igual (Cabrera, 1998):

$$\sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)}(C_y + \mu C_x) \quad (\text{ec. 4.13})$$

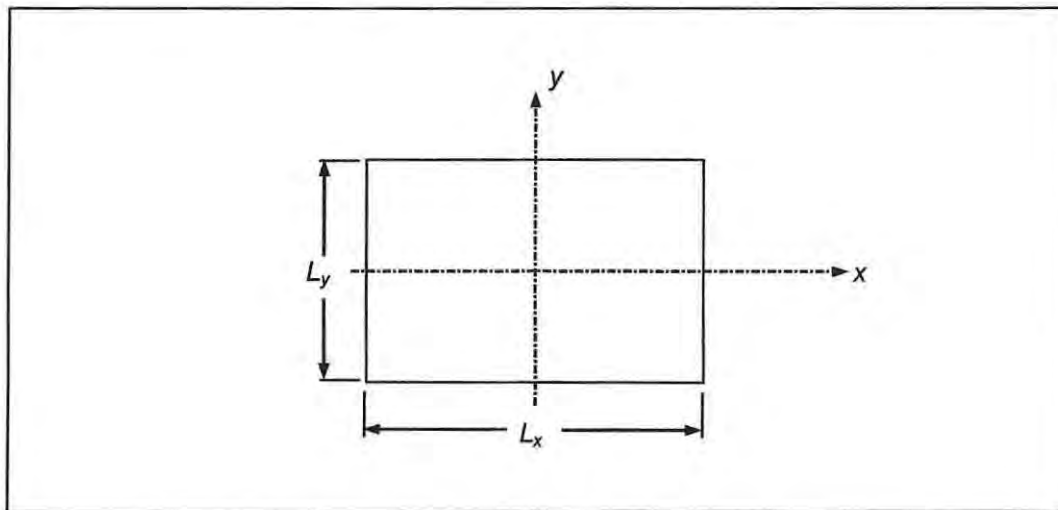


Figura 4.6- Losa finita en ambas direcciones (Cabrera, 1998).

El factor de corrección C_x depende solamente de L_x/l y el factor de corrección C_y depende sólo de L_y/l , donde l es el radio de rigidez relativo. El factor de corrección se logra determinar con la siguiente expresión (Cabrera, 1998):

$$C = 1 - \frac{2 \cos \lambda \cdot \cosh \lambda}{\operatorname{sen}(2\lambda) + \operatorname{senh}(2\lambda)} (\operatorname{tg} \lambda + \operatorname{tgh} \lambda) \quad (\text{ec. 4.14})$$

donde: $\lambda = \frac{B}{l\sqrt{8}}$, B = longitud o ancho de la losa, y l = radio de rigidez relativo.

La tensión de borde en una losa de dimensión finita se calcula con la siguiente ecuación (Cabrera, 1998):

$$\sigma = \frac{CE\alpha\Delta T}{2} \quad (\text{ec. 4.15})$$

en donde σ puede ser σ_x o σ_y y dependiendo la dirección del borde en estudio.

Es necesario tener en cuenta que todo el análisis anterior considera que la distribución de temperaturas es lineal a través del espesor de la losa. Esto es una aproximación a la situación real, porque la distribución de temperatura a través del espesor de la losa es no lineal.

4.3 Tensión combinada

Para estimar la tensión combinada, se analizan por separado las tensiones debido a las cargas y al alabeo por temperatura. Esas dos tensiones se combinan utilizando factores de ajuste. Los análisis estadísticos realizados en un estudio (Cabello, 1995) permitieron desarrollar expresiones matemáticas simples para estimar la tensión de alabeo y carga:

$$\sigma_{combinada} = 1.014\sigma_w + 1.017\sigma_{alabeo} \quad \text{para } \alpha\Delta T \geq 0 \quad (\text{ec.4.16})$$

$$\sigma_{combinada} = 0.986\sigma_w + 0.650\sigma_{alabeo} \quad \text{para } \alpha\Delta T \geq 0 \quad (\text{ec. 4.17})$$

Las tensiones de carga (σ_w) y tensiones de alabeo (σ_{alabeo}), fueron explicadas anteriormente en los puntos 4.1 y 4.2.

válidas para las siguientes condiciones

$$(L/l > 4) \text{ y } (\sigma_w \geq -0.905\sigma_{alabeo})$$

4.4 Características de la fatiga del hormigón

Se han realizado muy pocos estudios para obtener resultados del comportamiento de losas de pavimentos en servicio para incorporarlos en procedimientos de diseño. En la Figura 4.7 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos del Cuerpo de Ingenieros (CORPS) y de la prueba AASHTO en la que se representa la variación del Número de Repeticiones de Carga a la Falla en función del nivel de tensión inducida en la losa (σ) respecto de la resistencia a flexotracción del hormigón (M_r).

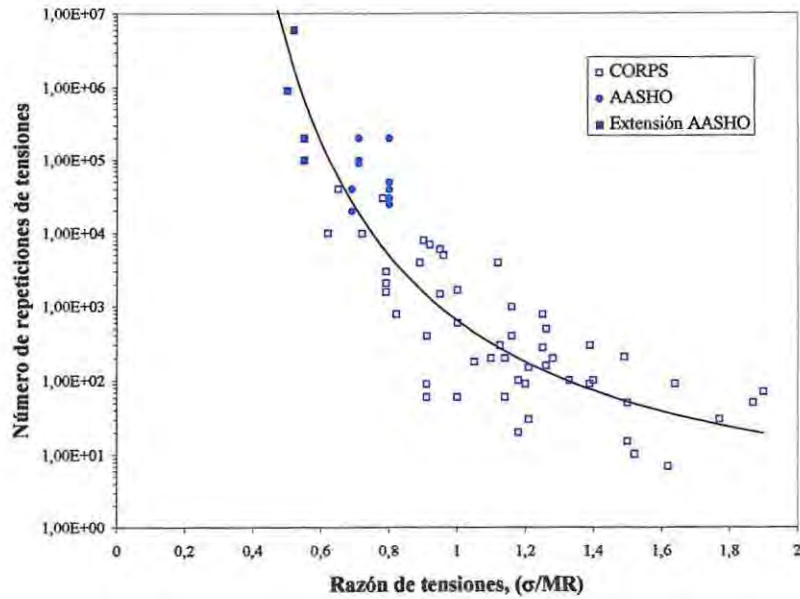


Figura 4.7- Resumen del comportamiento a la fatiga de resultados obtenidos en terreno (Cabrera, 1998).

La ecuación de fatiga obtenida de la información anterior es la siguiente (Cabrera, 1998):

$$\text{Log } N = 2.813 \left(\frac{\sigma}{Mr} \right)^{-1.221} \quad (\text{ec. 4.18})$$

4.5 Espesor de losa mediante uso de factores de seguridad

Una forma para determinar el espesor de losa es limitar el esfuerzo de tracción por flexión inducida en la losa como consecuencia de las cargas externas. De esta forma, la recomendación de la Asociación de Cemento Portland de los EEUU en materia de factores de seguridad es la siguiente:

* Pisos o áreas con un gran número de repeticiones esperadas de montacargas, se recomienda diseñarlos con un factor de seguridad alto de 2.0 o superior.

* En otras áreas en donde se espere menor tráfico de montacargas se puede emplear un factor de seguridad entre 1.7 y 2.0.

* En áreas no críticas, como áreas de almacenamiento sin un constante tráfico de montacargas, el factor de seguridad podrá ser de 1.4 a 1.7.

5. Métodos de diseño de pavimentos industriales incorporados en la ACI 360R-10

5.1 Pavimento de hormigón simple con/sin dispositivos de traspaso de carga

El espesor de losa de un pavimento de hormigón simple se determina utilizando una tensión admisible del hormigón a tracción por flexión. Las losas normalmente se diseñan para permanecer sin grietas debido a las cargas aplicadas, con un factor de seguridad de 1.4 a 2.0 en relación con el módulo de rotura.

Es importante señalar que, tal como se expone en el ACI318, las losas de pavimento no se consideran elementos estructurales, a menos que se utilicen para transmitir cargas verticales u horizontales de otros elementos de la estructura del edificio.

Tan pronto se coloca el hormigón para pavimentar, éste experimenta una reducción de su volumen. Esto continúa hasta que el agua, calor o ambos, son totalmente liberados a su entorno. Debido a que la velocidad de enfriamiento y de secado de la parte superior e inferior de la losa son diferentes, la contracción varía con la profundidad.

Los procedimientos actuales de diseño y construcción de pavimentos están basados en limitar el agrietamiento y alabeo de losas a niveles admisibles, sin su eliminación. El ACI 302.1R señala que considerar un 3% de losas agrietadas corresponde a una estimación realista para este tipo de pavimentos.

Debido a que este tipo de pavimento tiene juntas, los paños pueden ser susceptibles a experimentar movimientos en los bordes de las juntas y generar problemas de mantenimiento en las juntas cuando son expuestas a las cargas de ruedas. Por lo anterior, cuando no existe seguridad de una buena transferencia de carga en las juntas en el largo plazo, se debe considerar el uso de dispositivos de transferencia de carga en todas las juntas expuestas a las cargas de tránsito.

En este tipo de pavimento se pueden presenciar diferentes tipos de juntas las cuales son: juntas de aislación – dilatación, juntas de contracción y/o juntas de construcción, por lo que se definen a continuación.

5.1.1 Juntas de aislación-dilatación

Este tipo de junta se utiliza en todos aquellos sectores donde se quiere independizar totalmente los movimientos de la losa y elementos estructurales vecinos, como por ejemplo, encuentros con muros, pilares, etc. Estas juntas se forman mediante la inserción de un material de relleno compresible entre la losa y el elemento adyacente empotrado, es el caso de muros. El material de la junta debe extenderse en toda la profundidad o llegar ligeramente por debajo de la parte superior de la losa, para asegurar la completa separación y que no sobresalga por encima de ella.

Ver Figura 5.1.

Estas juntas no tienen dispositivos de traspaso de carga y se utilizan en todo tipo de pavimento.

Una alternativa, de uso reciente, a las juntas de aislación ante pilares, como se muestra en la Figura 5.2 es que esta junta se conforma en el pilar mismo mediante la aislación del pilar con un material compresible y se coloca una armadura en la losa en torno al pilar. Con ello la losa se puede hormigonar en una sola etapa. Existe experiencia local en que se ha aplicado esta metodología no produciéndose grietas en la losa y en consecuencia mostrando un buen comportamiento.

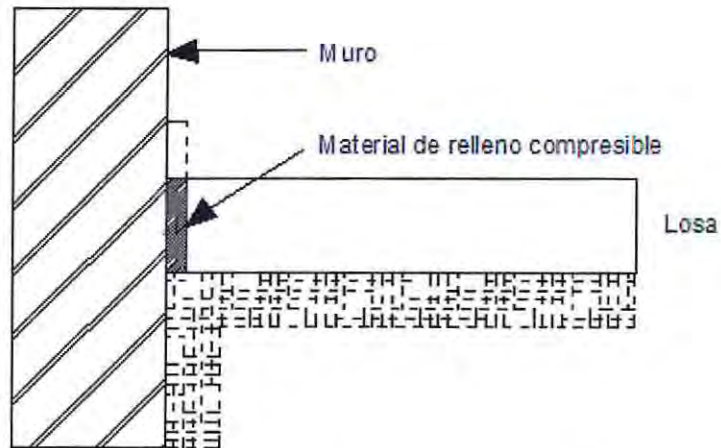


Figura 5.1- Junta de aislación en muro (ACI 360R-10).

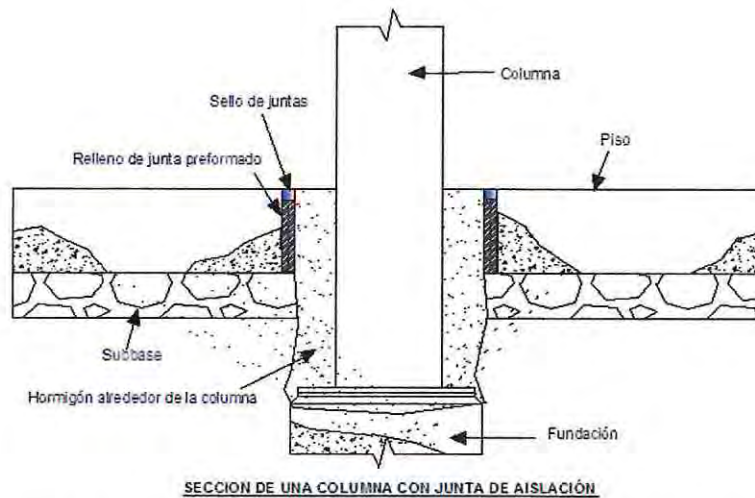
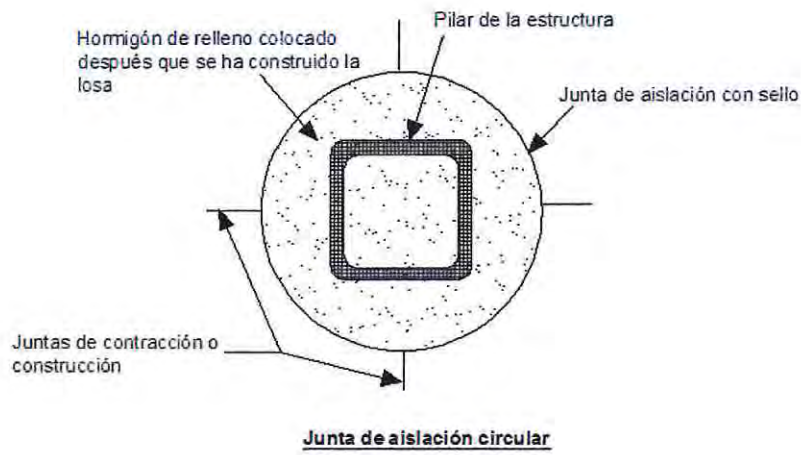
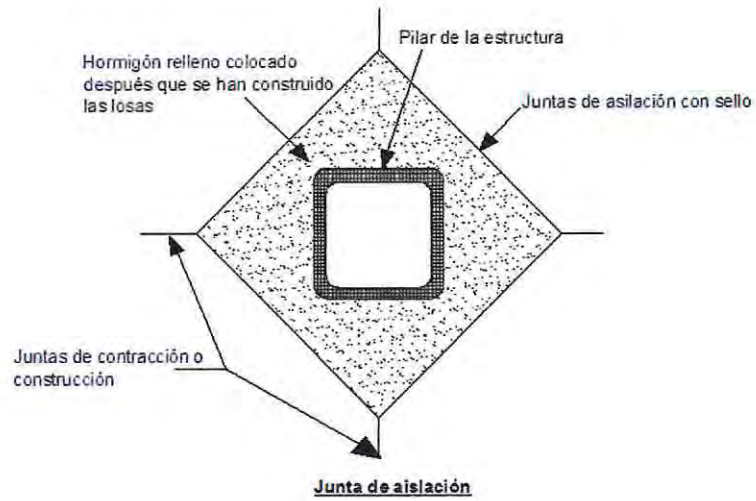


Figura 5.2- Juntas de aislación en muros y pilares (ACI 360R-10).

5.1.2 Juntas de contracción

Son todas aquellas juntas que se forman mediante un corte con sierra en la superficie de la losa, de profundidad igual a $\frac{1}{4}$ del espesor de la losa. No se recomienda el uso de insertos para inducir la grieta bajo la junta. Con ello, lo que se hace es introducir un plano de debilidad en la losa de modo que al generarse las tensiones de tracción en el hormigón por los cambios volumétricos, se forme una grieta bajo cada uno de los cortes que se hicieron en el piso, controlando de esta forma el agrietamiento en el hormigón. Estas juntas pueden o no tener dispositivos de traspaso de carga. De preferencia, estas juntas se forman en las líneas de pilares y formando paños, idealmente, cuadrados, o en su defecto, con razones Longitud/Ancho de losa no superiores a 1.25. Además, se recomienda verificar que la relación longitud/espesor de losa sea inferior a 23 (pisos industriales de bodegas cerradas) (ACI 360R-10).

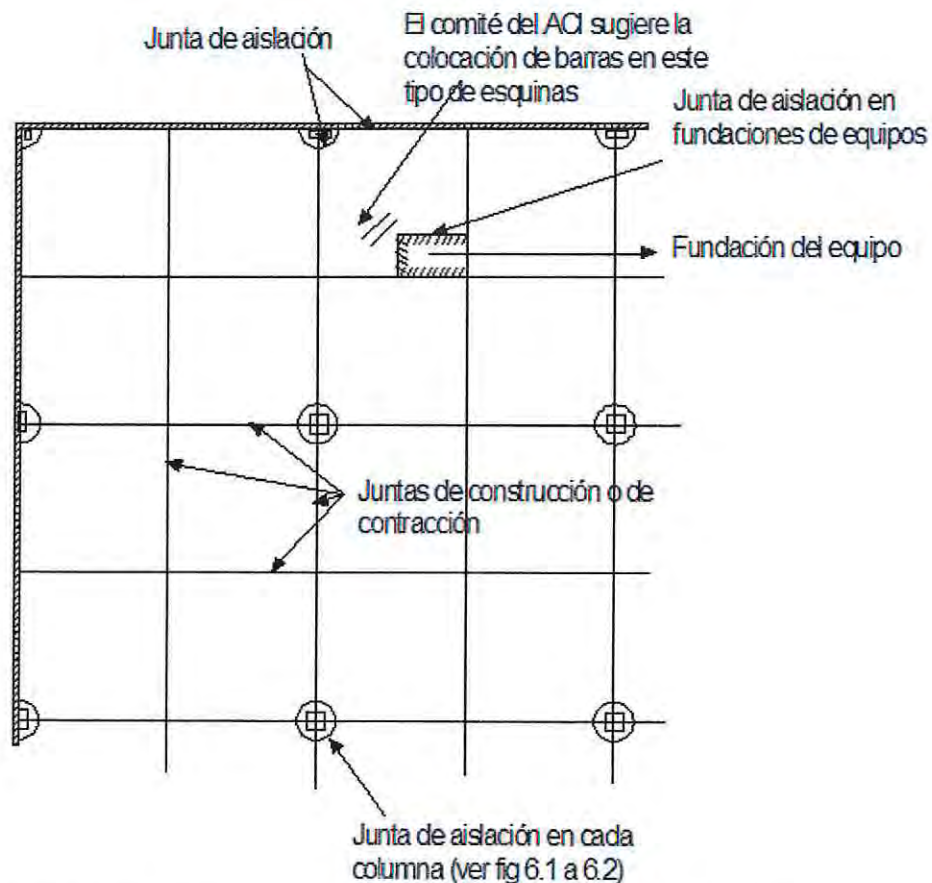


Figura 5.3- Ubicaciones apropiadas para las juntas (ACI 360R-10).

5.1.3 Juntas de construcción

Estas juntas unen losas hormigonadas en diferentes fechas. La práctica común en las juntas de construcción es que contengan algún dispositivo de transferencia de carga especialmente si sobre ellas se contempla el paso de equipos de levante u otro tipo de vehículo. En el caso de juntas de construcción no previstas al inicio del hormigonado, y que por lo tanto no queden alineadas con juntas de contracción, se recomienda que esta junta se conforme con barras de acero estriadas y ancladas a ambos lados de la losa y se realice un tratamiento superficial de forma que en esta junta se consiga una unión monolítica de la losa.

Para el caso de pavimentos de hormigón de retracción compensada, las juntas de construcción normalmente contienen dispositivos de traspaso de carga. Debido al requerimiento de libertad del movimiento en las dos direcciones del plano, es habitual el uso de barras de traspaso de carga de sección cuadrada o bien del tipo placa. Además y a fin de proteger los bordes de la losa, se puede colocar un perfil de acero que actúe de cantonera. De esta forma se protegen los bordes de la losa al paso de las cargas de los vehículos, especialmente ante el paso de ruedas rígidas. Una alternativa al uso de las barras de traspaso de carga son las denominadas zapatas de traspaso de carga.

Además en los bordes de la losa se disponen de cantoneras de acero ancladas a la losa. En la Figura 5.4 se muestra un detalle de lo anterior.

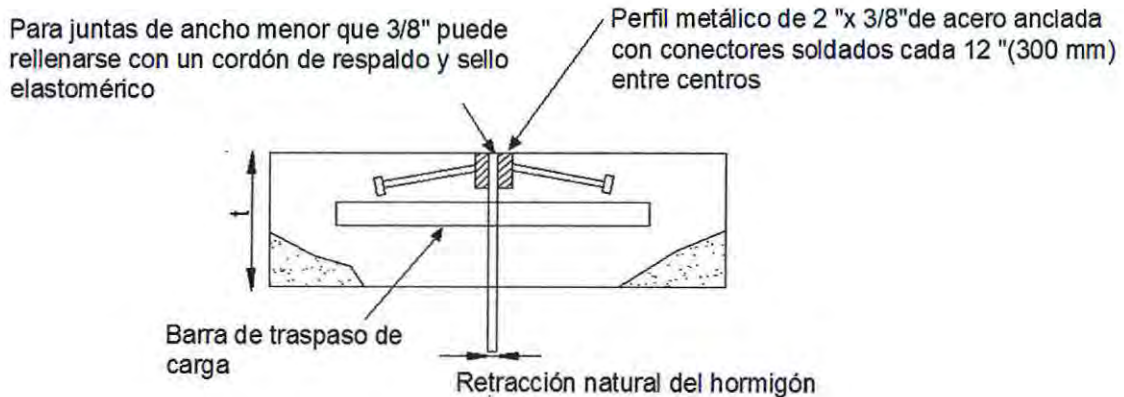


Figura 5.4- Detalle de junta de construcción protegida con cantonera (ACI 360R-10).

5.1.4 Métodos de diseño

Cuando la losa se carga de manera uniforme en toda su superficie y cuenta con un apoyo uniforme de la subrasante, los esfuerzos que se generan se deben sólo a las restricciones volumétricas impuestas a la losa. Sin embargo, la mayoría de las losas están sometidas a carga no uniforme.

El análisis de losas sometidas a cargas concentradas se basa en los trabajos desarrollados por Westergaard. Pueden considerarse tres casos de carga, dependiendo de su ubicación en la losa.

5.1.4.1 Caso 1 carga de esquina de losa

Para esta condición de carga de la losa, la tensión crítica en el hormigón es el esfuerzo de tracción que se produce en la fibra superior de la losa, para lo cual Westergaard desarrolló la siguiente expresión:

$$ft = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (\text{ec. 5.1})$$

ft = Tensión de tracción del hormigón, (Pa).

a = Radio del área cargada, (m).

P = Carga externa, (N).

h = Espesor de la losa, (m).

$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}}$, radio de rigidez relativo de la losa, (m).

E = Módulo de elasticidad del hormigón, (Pa).

ν = Coeficiente de poisson, para el concreto es aproximadamente 0.15.

k = Constante de balasto, (N/m³).

5.1.4.2 Caso 2 carga interior de losa (carga alejada de los bordes)

Cuando la carga se aplica a cierta distancia de los bordes de la losa a aproximadamente 4 veces del radio de rigidez relativa ($4l$), la tensión crítica en el hormigón será en la fibra inferior de la losa y bajo el área cargada y está dada por la siguiente expresión:

$$fb = 0.316 \frac{P}{h^2} [\log(h^3) - 4 \log(\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h) - \log(k) + 6.48] \quad (\text{ec. 5.2})$$

5.1.4.3 Caso 3 carga de rueda en el borde de la losa

Cuando se aplica la carga en el borde de la losa, la tensión de tracción es máxima en la fibra inferior de la losa y directamente debajo de la carga y está dada por la siguiente expresión:

$$fb = 0.572 \frac{P}{h^2} [\log(h^3) - 4 \log(\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h) - \log(k) + 5.77] \quad (\text{ec.5.3})$$

En las ecuaciones de tensión máxima para los casos 2 y 3, las unidades de los distintos parámetros son las siguientes:

P , libras.

h , pulgadas.

k , libras/pulgada cúbica.

fb , en lb/in².

Logaritmos en base 10.

Si la tensión de tracción por flexión entregada por las ecuaciones anteriores excede la resistencia a la tracción por flexión del hormigón significa que debe aumentarse el espesor de la losa, aumentar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón o colocar un refuerzo.

5.1.4.4 Caso 4 carga distribuida en áreas parciales

Además de las cargas concentradas, las cargas uniformemente distribuidas sobre áreas locales o parciales puede producir la condición de carga crítica. Por ejemplo, es frecuente que en bodegas existan pasillos por donde transitan los equipos de levante y a ambos lados del pasillo se encuentren completamente cargados. Bajo esta condición de carga, es posible que se produzca agrietamiento a lo largo del eje central de los pasillos.

En un análisis para esta condición de carga, Rice derivó una expresión para el momento negativo crítico en la losa, el que se produce en el centro del pasillo y que está dada por:

$$M_c = \frac{w}{2\lambda^2} e^{-\lambda a} [\sin(\lambda a)] \quad (\text{ec. 5.4})$$

donde:

M_c = Momento en la losa en el centro del pasillo ((in-lb)/in).

$\lambda = \sqrt[4]{K/4EI}$, (in⁻¹).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (psi).

I = Momento de inercia (in⁴).

a = Ancho del pasillo dividido por dos (mm).

k = Constante de balasto (lb/in³).

w = Carga uniforme (psi).

e = Base de logaritmo natural.

Considerando que no siempre es posible conocer previamente con exactitud el ancho del pasillo, Rice sugiere que se utilice un ancho pasillo crítico, y que corresponde al ancho que maximiza la expresión del momento crítico.

Además del método anterior para el diseño de pisos, el ACI 360 incluye los siguientes métodos para el diseño de pavimentos de hormigón simple.

- ❖ Método de la Asociación de Cemento Portland de EEUU (PCA).
- ❖ Método del Instituto de Refuerzo con Cable (WRI).
- ❖ Método del Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (COE).

En su concepción, estos métodos previenen la formación de grietas en la losa como consecuencia de las cargas que se aplican mediante un espesor de losa adecuado junto con un factor de seguridad para que no se agriete. Los métodos PCA y WRI sólo consideran la condición de carga interior en la losa, mientras que el método COE considera la aplicación de las cargas en los bordes y juntas de losa.

Por otro lado, estos métodos consideran que la losa se encuentra plenamente apoyada en la capa subyacente.

5.1.5 Método de diseño de la Asociación Cemento Portland (PCA)

Este método se basa en los análisis efectuados por Pickett. Las variables de diseño son:

- ❖ Resistencia a tracción por flexión del hormigón.
- ❖ Tensión de trabajo.
- ❖ Área cargada.
- ❖ Espaciamiento.
- ❖ Módulo de reacción de la subrasante o Constante de Balasto.

Esta metodología considera una Razón de Poisson, $\nu = 0.15$, y un Módulo de elasticidad del hormigón, $E_h = 4000000$ psi; (28000 MPa).

5.1.5.1 Cargas de rueda

Las losas de pisos se encuentran sometidas a varios tipos, tamaños y magnitudes de carga de rueda. Las cargas de grúas horquilla es un ejemplo frecuente de este tipo de cargas.

5.1.5.2 Cargas concentradas

Este tipo de carga puede ser más exigente que las cargas de rueda. El procedimiento del diseño de la losa para este tipo de carga es el mismo que el utilizado para la carga de rueda. Considera también la proximidad de los apoyos de las estanterías a las juntas. Las tensiones en las placas de apoyo deben verificarse según la ACI 318.

5.1.5.3 Cargas uniformes

Este tipo de carga produce una sollicitación en términos de tensión en la losa menor que la producida por una carga concentrada. Los principales objetivos de diseño son prevenir las grietas superiores en los pasillos descargados y evitar un asentamiento excesivo por consolidación del suelo de subrasante. Las grietas en la fibra superior de la losa se producen por tracciones que se producen en ella y dependen principalmente del espesor de losa, posición de la carga y deflexiones en la subrasante en el corto y largo plazo. Las soluciones para esta condición de carga se basan en el trabajo de vigas en lecho elástico de Hetenyi, considerando la resistencia a tracción por flexión del hormigón y la constante de balasto como las principales variables de diseño.

5.1.5.4 Cargas de construcción

Este método no incluye este tipo de cargas. Sin embargo, pueden asimilarse a cargas de ruedas equivalente, cargas concentradas o uniformemente repartidas según corresponda.

5.1.5.5 Ábacos de diseño utilizados en el método de diseño de la PCA

Los ábacos de diseño a utilizar en el método de la PCA son publicados por la PCA en el documento "Pisos de Hormigón sobre Terreno" (2001), que se muestran a continuación.

5.1.5.5.1 Ábacos para el diseño de espesor de losa según el método de la PCA para el caso de una carga de eje simple.

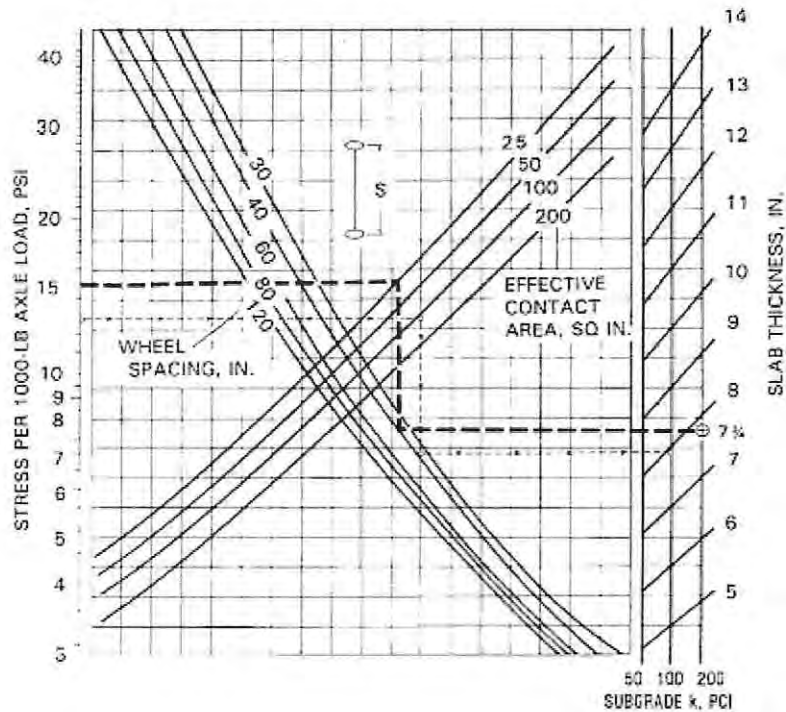


Figura 5.5- El diseño gráfico de PCA para ejes con ruedas simples.

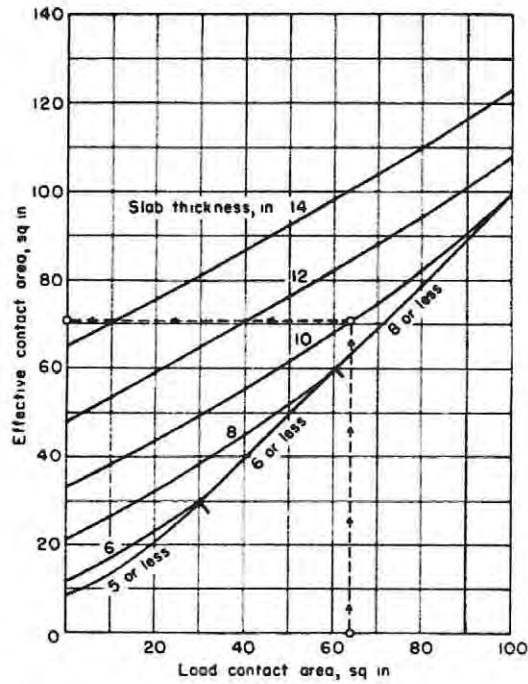


Figura 5.6- Relación entre el área de contacto de carga y área de contacto de carga efectiva.

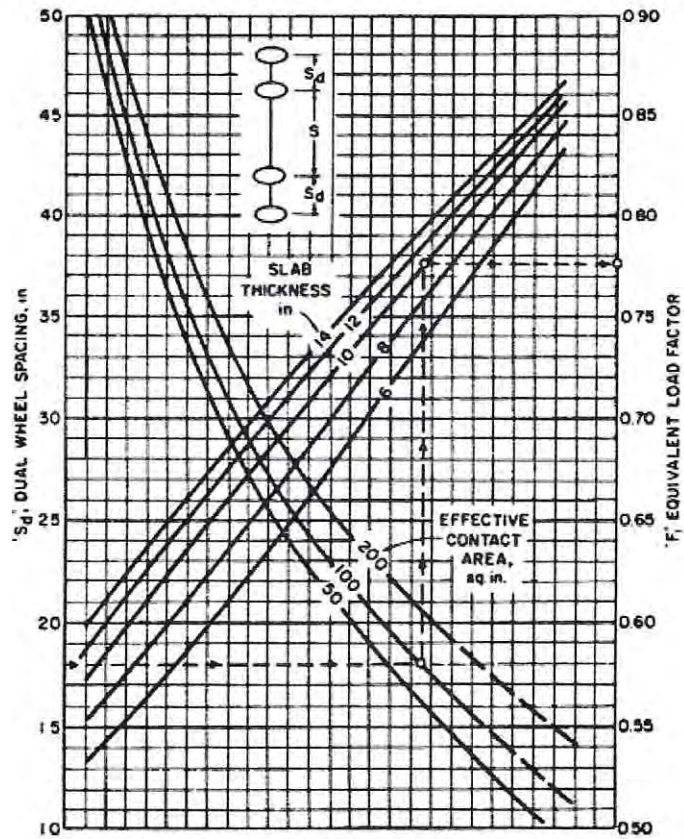


Figura 5.7- Abaco de diseño de la PCA para ejes con ruedas dobles.

5.1.5.2 Ábacos de diseño para una carga de estantería.

La diferencia de cada uno de estos ábacos está en que cada ábaco está asociado a un valor de la constante de balasto.

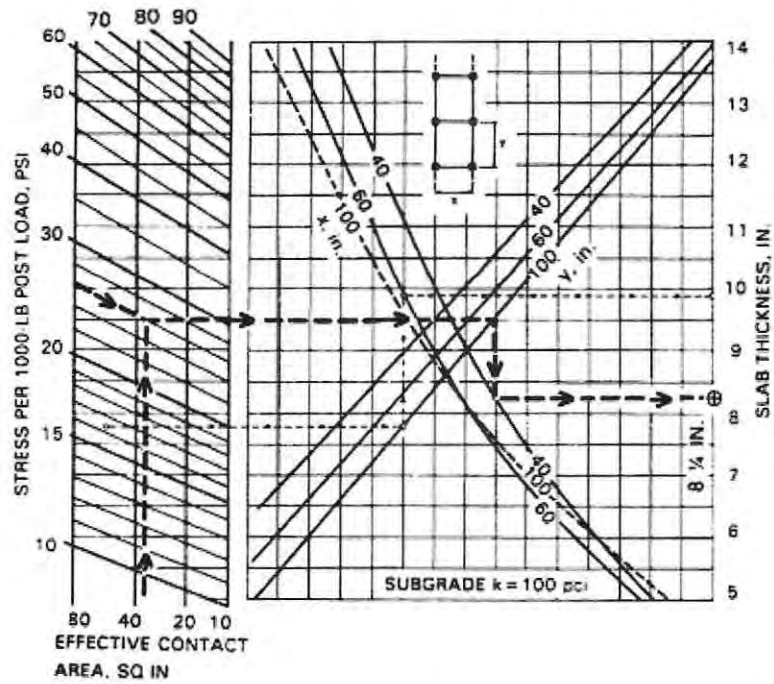


Figura 5.8- Abaco de diseño según PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 100pci.

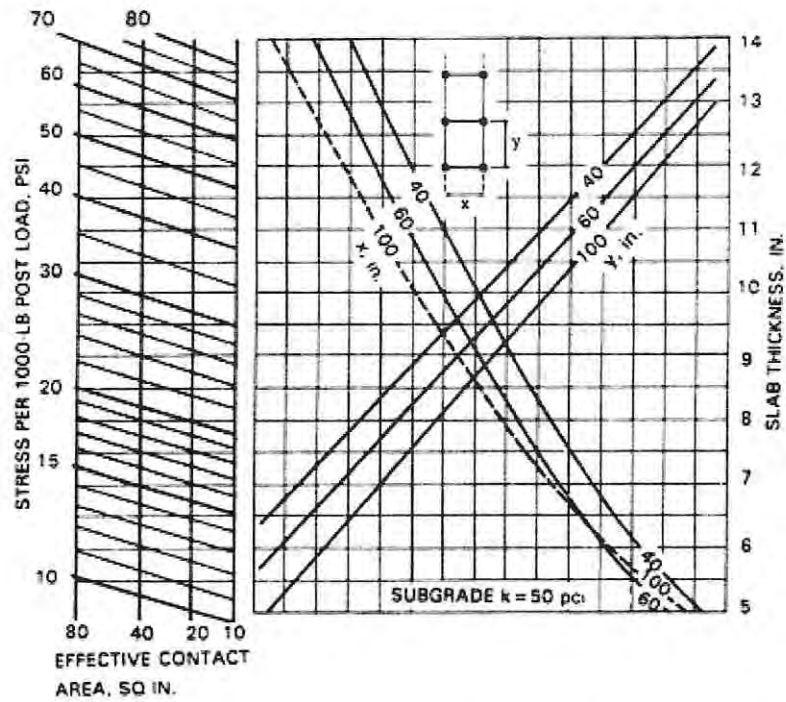


Figura 5.9- Abaco de diseño según la PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 50 pci.

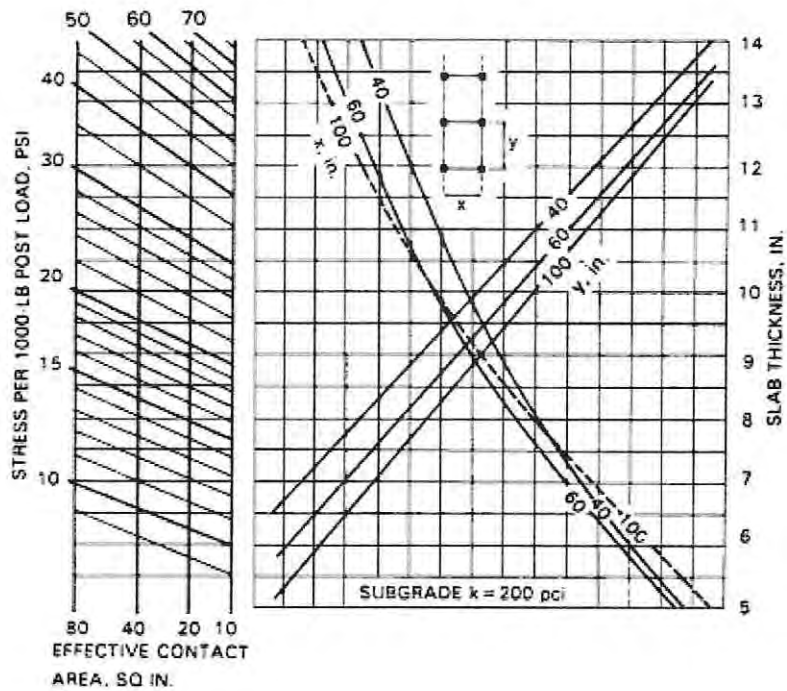


Figura 5.10- Abaco de diseño según la PCA para cargas de apoyo con constante de balasto de 200pci.

5.1.5.5.3 Información de diseño adicional de la PCA

Las Tablas 5.1 y 5.2 también se incluyen para aplicaciones de carga uniforme. Para su uso, refiérase a los ejemplos en PCA (2001) y (Ringo, 1985).

Tabla 5.1-Cargas distribuidas admisibles para pasillo sin juntas, con carga no uniforme y disposición variable (Packard, 1976).

Espesor de losa, in.	Subrasante k, * lb/in. ³	Carga admisible, lb/ft ² †			
		Resistencia a la flexión del hormigón, psi			
		550	600	650	700
5	50	535	585	635	685
	100	760	830	900	965
	200	1075	1175	1270	1370
6	50	585	640	695	750
	100	830	905	980	1055
	200	1175	1280	1390	1495
8	50	680	740	800	865
	100	960	1045	1135	1220
	200	1355	1480	1603	1725
10	50	760	830	895	965
	100	1070	1170	1265	1365
	200	1515	1655	1790	1930
12	50	830	905	980	1055
	100	1175	1280	1390	1495
	200	1660	1810	1965	2115
14	50	895	980	1060	1140
	100	1270	1385	1500	1615
	200	1795	1960	2120	2285

Ref.: PCA, Ringo.

*k de la subrasante; no se considera un aumento de k debido a la subbase.

† Para tensiones admisibles igual a la mitad de la resistencia a la flexotracción.

Nota: Basado en pasillo y anchos de carga que produce la tensión máxima.

Tabla 5.2- Cargas distribuidas admisibles, pasillos sin juntas y disposición variables.

Espesor de losa, in.	Tensión de trabajo, psi.	Ancho de pasillo crítico*, in.	Carga admisible, lb/ft ²					
			Ancho de pasillo crítico	Otros anchos de pasillos				
				6 ft pasillo	8 ft pasillo	10 ft pasillo	12 ft pasillo	14 ft pasillo
Subrasante k= 50 lb/in. ³								
5	300	5.6	610	615	670	815	1050	1215
	350	5.6	710	715	785	950	1225	1420
	400	5.6	815	820	895	1085	1400	1620
6	300	6.4	670	675	695	780	945	1175
	350	6.4	785	785	810	910	1100	1370
	400	6.4	895	895	925	1040	1260	1570
8	300	8	770	800	770	800	880	1010
	350	8	900	935	900	935	1025	1180
	400	8	1025	1070	1025	1065	1175	1350
10	300	9.4	845	930	855	850	885	960
	350	9.4	985	1085	1000	990	1035	1120
	400	9.4	1130	1240	1145	1135	1185	1285
12	300	10.8	915	1065	955	915	925	965
	350	10.8	1065	1240	1115	1070	1080	1125
	400	10.8	1220	1420	1270	1220	1230	1290
14	300	12.1	980	1225	1070	1000	980	995
	350	12.1	1145	1430	1245	1170	1145	1160
	400	12.1	1310	1630	1425	1335	1310	1330

Subrasante k= 100 lb/in.³

5	300	4.7	865	900	1090	1470	1745	1810
	350	4.7	1010	1050	1270	1715	2035	2115
	400	4.7	1155	1200	1455	1955	2325	2415
6	300	5.4	950	955	1065	1320	1700	1925
	350	5.4	1105	1115	1245	1540	1985	2245
	400	5.4	1265	1275	1420	1760	2270	2565
8	300	6.7	1095	1105	1120	1240	1465	1815
	350	6.7	1280	1285	1305	1445	1705	2120
	400	6.7	1460	1470	1495	1650	1950	2420
10	300	7.9	1215	1265	1215	1270	1395	1610
	350	7.9	1420	1475	1420	1480	1630	1880
	400	7.9	1625	1645	1625	1690	1860	2150
12	300	9.1	1320	1425	1325	1330	1400	1535
	350	9.1	1540	1665	1545	1550	1635	1795
	400	9.1	1755	1900	1770	1770	1865	2050
14	300	10.2	1405	1590	1445	1405	1435	1525
	350	10.2	1640	1855	1685	1640	1675	1775
	400	10.2	1875	2120	1925	1875	1915	2030

Subrasante k= 200 lb/in.³

5	300	4.0	1225	1400	1930	2450	2565	2520
	350	4.0	1425	1630	2255	2860	2990	2940
	400	4.0	1630	1865	2575	3270	3420	3360
6	300	4.5	1340	1415	1755	2395	2740	2810
	350	4.5	1565	1650	2050	2800	3200	3275
	400	4.5	1785	1890	2345	3190	3655	3745
8	300	5.6	1550	1550	1695	2045	2635	3070
	350	5.6	1810	1810	1980	2385	3075	3580
	400	5.6	2065	2070	2615	2730	3515	4095
10	300	6.6	1730	1745	1775	1965	2330	2895
	350	6.6	2020	2035	2070	2290	2715	3300
	400	6.6	2310	2325	2365	2620	3105	3860
12	300	7.6	1890	1945	1895	1995	2230	2610
	350	7.6	2205	2270	2210	2330	2600	3045
	400	7.6	2520	2595	2525	2660	2972	3480
14	300	8.6	2025	2150	2030	2065	2210	2480
	350	8.6	2360	2510	2365	2405	2580	2890
	400	8.6	2700	2870	2705	2750	2950	3305

Ref.: PCA, Ringo.

* Ancho de pasillo crítico es igual a 2.209 veces el radio de rigidez relativa.

† k de la subrasante; No se considera el aumento de k debido a la subbase.

Notas: ancho de carga asumida = 300 in; carga admisible varía ligeramente para otros anchos de carga. El esfuerzo admisible = mitad de la resistencia a la flexo tracción.

5.1.6 Método de diseño del Instituto de Refuerzo con Cable (WRI)

Los ábacos de diseño de losas con este método están desarrollados sólo para la condición de carga interior de losa y está basado en un modelo de elementos discretos. Las variables de diseño son el módulo elasticidad del hormigón, constante de balasto, espesor tentativo de losa, diámetro o área de carga equivalente, distancia entre ruedas, resistencia a la tracción por flexión del hormigón y tensión de trabajo.

5.1.6.1 Cargas concentradas

Este método no considera directamente este tipo de carga, por lo que para analizarlas con este método se deben convertir a cargas equivalentes de rueda.

5.1.6.2 Cargas uniformemente distribuidas

Para este tipo de cargas, es decir, cargas uniformemente distribuidas a ambos costados de un pasillo, además de las variables señaladas anteriormente en este método, se requiere conocer el ancho del pasillo y la carga distribuida.

5.1.6.3 Cargas de construcción

Cargas de construcción, como por ejemplo, equipos, grúas, camiones de hormigón, etc., pueden afectar el espesor de la losa de diseño. Así como en el método de la PCA, este tipo de cargas no están incluidas en la metodología de diseño. Pueden sin embargo asimilarse a cargas de rueda equivalente.

5.1.6.4 Abaco de diseño de selección de espesor de losa según el método WRI para el caso de una carga de eje simple

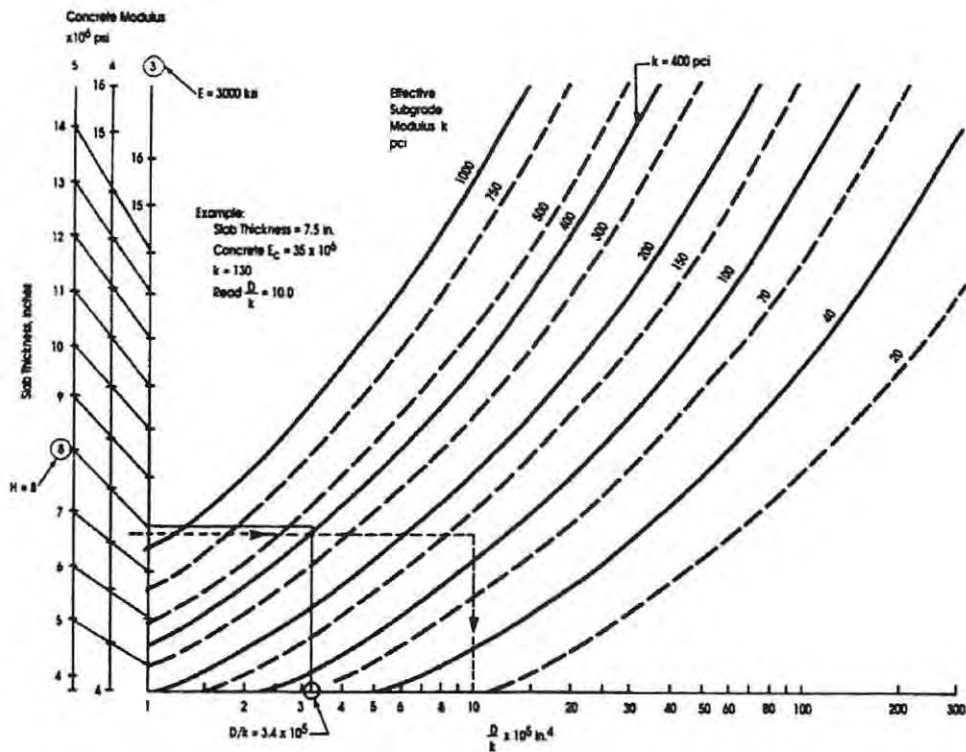


Figura 5.11- Relación entre la rigidez de la losa y subrasante utilizada por el método WRI.

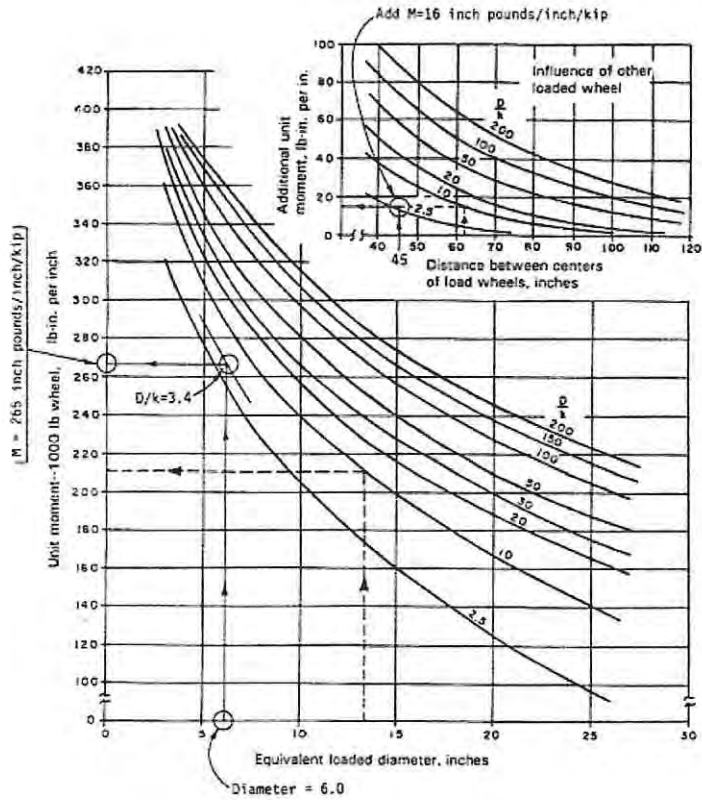


Figura 5.12- Abaco de diseño para carga de rueda utilizada por el método WRI.

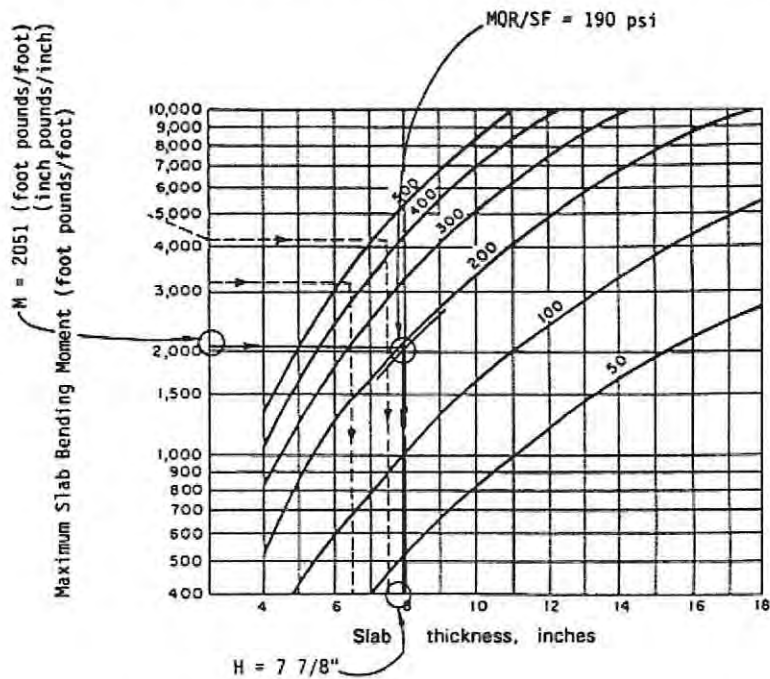


Figura 5.13- Abaco para la tensión de tracción en la losa usada por el método WRI.

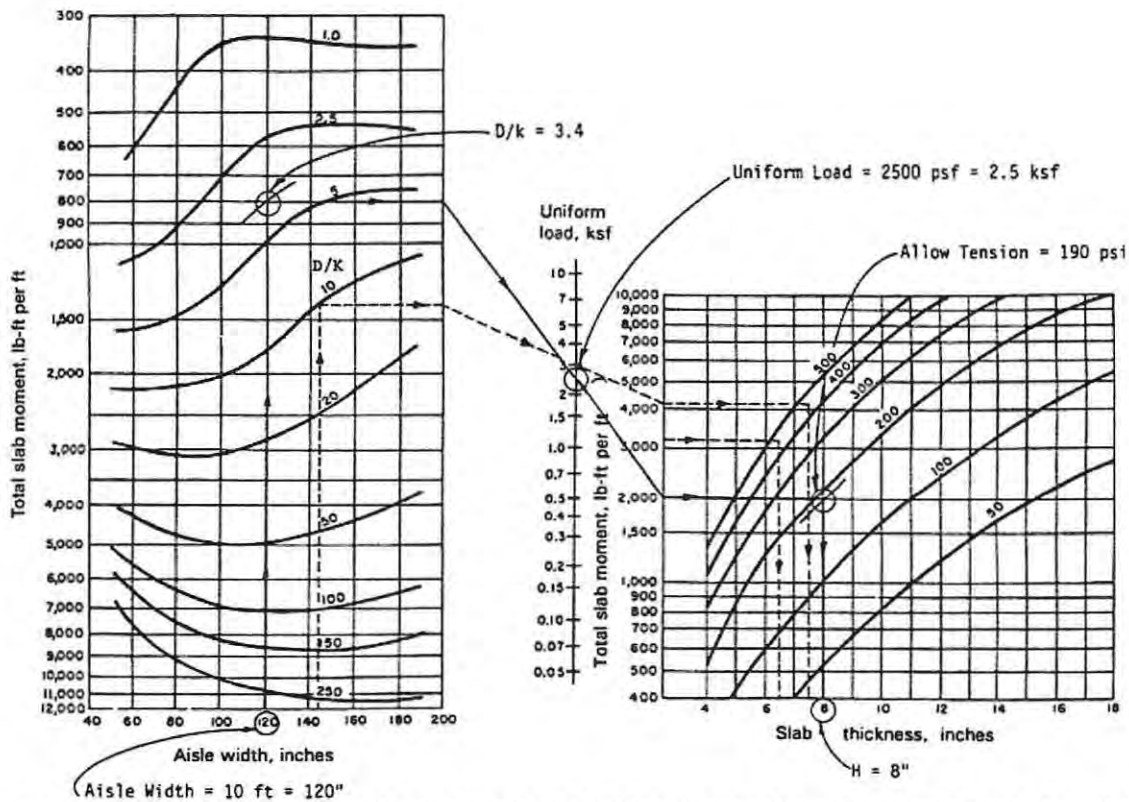


Figura 5.14- Ábacos para la tensión de tracción en la losa de diseño para carga uniforme usado por el método de diseño WRI.

5.1.7 Método de diseño del Cuerpo de Ingenieros (COE)

Este método se aplica sólo para el caso de cargas de ruedas o eje aplicadas en un borde de la losa o junta. Las variables asociadas al tipo de eje están incorporadas en la "categoría índice de diseño" (Tabla 5.3). No considera el caso de cargas concentradas, uniforme y de construcción. Este método se basa en la ecuación de Westergaard para el caso de carga de borde. A esta condición de borde se aplica un coeficiente de transferencia de carga de 0.75 por el efecto de transferencia de carga en la junta. Las variables de diseño son la resistencia a tracción por flexión del hormigón, constante de balasto y la categoría índice de diseño. El índice de diseño se utiliza para simplificar y estandarizar el diseño de grúas horquilla, normalmente con cargas de eje inferiores a los 110 kN. Los volúmenes de tránsito y operaciones diarias de diversos tamaños de grúas horquilla para cada índice de diseño son considerados representativos de la actividad normal de una bodega y se encuentran incorporados en el método de diseño. Se considera un factor de impacto igual al 25%, módulo de elasticidad del hormigón igual a 4000000 psi (28000 MPa), razón de Poisson de 0.2, área de contacto y espaciamento de ruedas. Estos últimos dos parámetros están predeterminados para cada categoría índice.

5.1.7.1 Abaco de diseño utilizado en el método de diseño COE

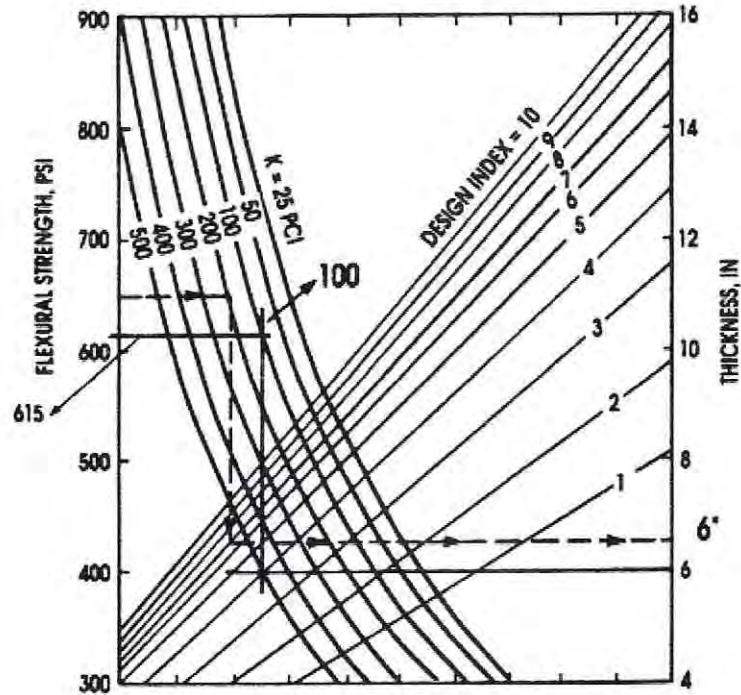


Figura 5.15- Abaco de diseño del COE para determinar el espesor del piso de hormigón según el índice de diseño.

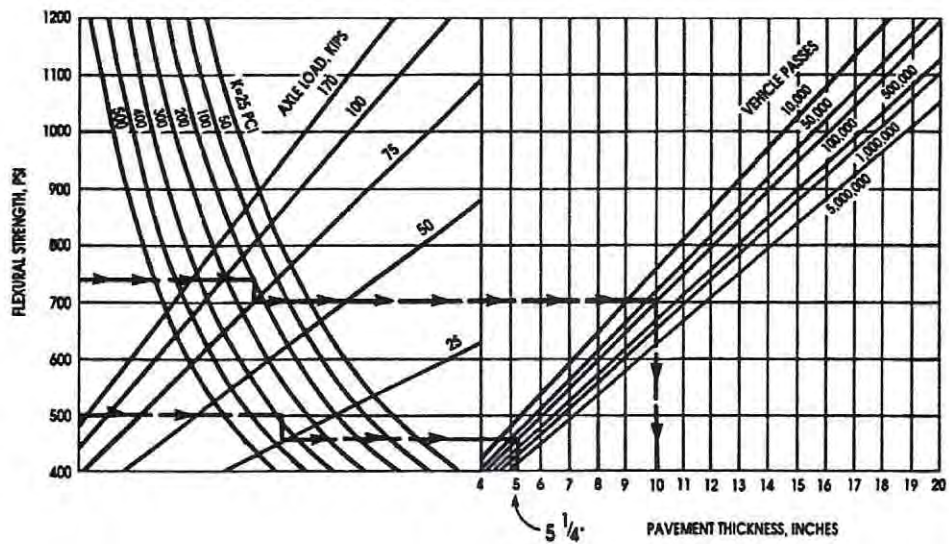


Figura 5.16- Curvas de diseño del método COE para losas de piso de hormigón con tránsito de grúas horquilla pesadas.

5.1.7.2 Categoría índice de diseño

Tabla 5.3- Categorías de índice de diseño utilizado con el método COE para la selección del espesor de la losa.

Categoría	I	II	III	IV	V	VI
Capacidad, lb	4000	6000	10000	16000	20000	52000
Carga por eje de diseño, lb	10000	15000	25000	36000	43000	120000
No. De neumáticos	4	4	6	6	6	6
Tipo de neumático	Solido	Solido	Neumático	Neumático	Neumático	Neumático
Area de contacto del neumático, in. ²	27	36.1	62.5	100	119	316
Efecto de presión de contacto, psi	125	208	100	90	90	95
Anchura del neumático, in.	6	7	8	9	9	16
Espacio entre ruedas, in.	31	33	11.52.11	13.58.13	13.58.13	20.79.20
Ancho del pasillo, in.	90	90	132	144	144	192
Espaciamiento entre los neumáticos de doble rueda, in.	—	—	3	4	4	4

Ref.: ACI 360R-10

5.2 Pavimento de hormigón reforzado (para el control de ancho de grietas)

El espesor de losas apoyadas sobre el terreno debe seleccionarse de manera de evitar el desarrollo de grietas debido a la acción de cargas externas. Los cálculos del espesor de losa deben realizarse en base a una losa no reforzada y no agrietada. El refuerzo en losas puede utilizarse para mejorar su comportamiento bajo ciertas condiciones. Entre los beneficios del refuerzo se distingue:

- 1- Limitar el ancho de grietas por retracción.

- 2- Mayor longitud de losas que losas sin refuerzo.
- 3- Proporcionar resistencia a la tracción por flexión y estabilidad en secciones agrietadas.

El refuerzo no prevendrá el agrietamiento, pero aumentará la frecuencia del agrietamiento disminuyendo el ancho de las grietas. En la medida que el refuerzo se encuentre adecuadamente proporcionado y posicionado, el refuerzo limita el ancho de las grietas de manera tal que el agrietamiento no afectará la serviciabilidad de los pisos. La ocurrencia de grietas para este tipo de pisos, debe sin embargo discutirse con el propietario del piso industrial para que esté en antecedentes que este tipo de fisuramiento estará presente.

En este tipo de pavimento se pueden presentar juntas de aislación – dilatación, juntas de contracción y/o juntas de construcción, estas fueron definidas anteriormente en pavimentos de hormigón simple c/s dispositivos de traspaso de carga.

5.2.1 Diseño de espesor de losa

La incorporación de armadura en la losa, aun en cantidades importantes, tiene un efecto muy pequeño en la resistencia de la losa no agrietada. Para el diseño del espesor de este tipo de pisos se puede utilizar cualquiera de los procedimientos disponibles para el diseño de losas sin refuerzo.

5.2.2 Refuerzo sólo para el control de ancho de grieta

El refuerzo requerido para el control del ancho de grietas es una función del tamaño de los paños y del espesor de la losa. Para eliminar las juntas de contracción, se recomienda colocar una cuantía mínima de acero correspondiente al 0.5% de la sección transversal en la dirección en que se elimina la junta de contracción.

La armadura debe colocarse lo más cerca posible de la parte superior de la losa, recomendándose que se coloque a una profundidad de 1/3 del espesor de la losa, y debe tener un recubrimiento mínimo de entre 35 y 50 mm. Esta armadura no debe atravesar las juntas.

5.3 Pavimentos de hormigón de retracción compensada (HRC)

El hormigón convencional posee dos características, intrínsecas, que son: la retracción que experimenta al fraguar y su baja resistencia a la tracción. Estas dos condiciones, si no se tratan cuidadosamente, son las responsables del agrietamiento por retracción y agrietamiento transversal y/o longitudinal por retracción y alabeo. La solución tradicional para prevenir el agrietamiento de losas (transversal y/o longitudinal) es efectuar cortes en las losas en ubicaciones predefinidas a fin que en dichos lugares se materialice la grieta, evitando de esta manera tener pavimentos con agrietamiento aleatorio. Existen también otras alternativas de solución, como por ejemplo, reforzar el hormigón mediante armaduras de acero, con distinto tipo de fibras y uso de hormigones postensados.

La Figura 5.5 muestra esquemáticamente el comportamiento de un hormigón normal y un HRC. Durante los primeros días de curado húmedo el hormigón normal puede experimentar una leve expansión, que rápidamente se revierte en una fuerte contracción apenas se lo expone al medio

ambiente. El HRC, en cambio, desarrolla una importante expansión durante la fase de curado húmedo que permite compensar la posterior retracción que se produce en el período de secamiento, que es posterior al periodo de endurecimiento.

Las características de retracción por secado de un hormigón de retracción compensada y los factores que la afectan son similares a la de un pavimento de hormigón convencional. Ello incluye la razón A/C, tipo de árido, granulometría y contenido de cemento. El contenido de agua afecta la expansión durante el proceso de curado y acortamientos posteriores por la retracción por secado.

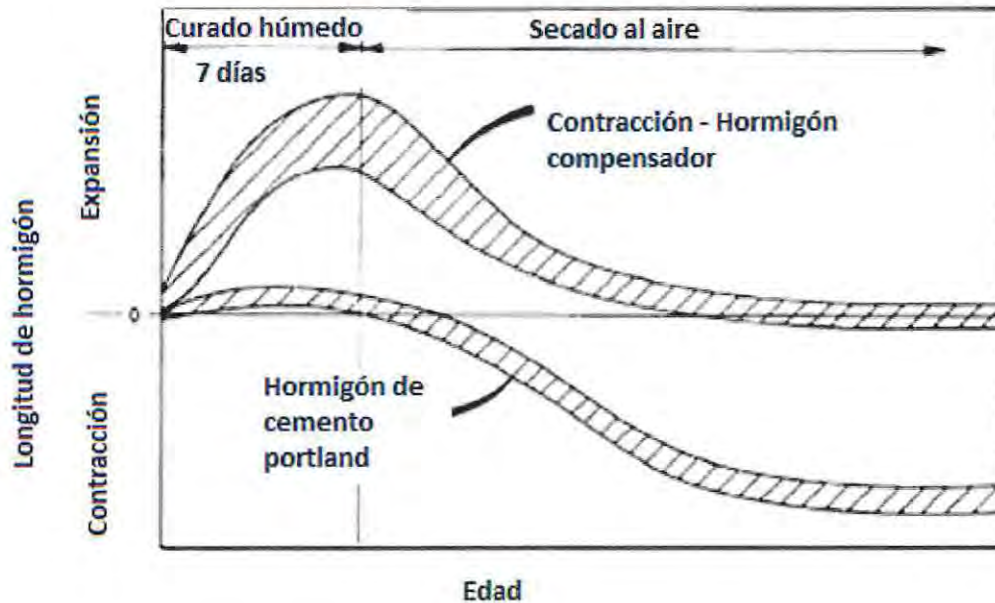


Figura 5.17- Características de expansión y retracción de hormigones HRC y Portland (ACI 223-98).

En un hormigón de retracción compensada, la expansión del hormigón es restringida por la armadura, la que es traccionada. Como resultado de esta deformación por expansión causa una tracción en la armadura de refuerzo generándose una compresión en el hormigón que se opone a la tracción de la armadura. Esta tensión se libera en el tiempo por la retracción por secado y por efectos de creep. El objetivo es que la restricción a la expansión sea mayor que la retracción resultante en el largo plazo. La expansión mínima recomendada para este tipo de hormigones, medida según ASTM C878/C878M es 0.03%.

Para que el sistema funcione adecuadamente, la expansión inicial debe ser controlada. En caso de que ella fuera insuficiente o se generara cuando el hormigón está aún fresco, no se alcanzaría el objetivo buscado y el hormigón se fisuraría. Por otro lado, si ella fuera excesiva en magnitud o en duración, el hormigón podría experimentar daños por expansión. Para lograr esa expansión controlada existen hoy dos alternativas: usar cementos expansivos o usar aditivos expansores. En ambos casos lo que se hace es incorporar en el hormigón una cantidad controlada de compuestos expansivos, principalmente Sulfoaluminato de Calcio ($4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$) y/u Oxido de Calcio (CaO). El primero, al hidratarse conjuntamente con el cemento portland, produce ettringita, en tanto que el segundo produce hidróxido de calcio, generando expansiones que, como suceden en las primeras edades del hormigón, no provocan los problemas destructivos asociados con estas reacciones a larga edad.

El uso de cementos expansivos (típicamente el Cemento Tipo K) se ha dado principalmente en EEUU (ASTM C845), donde están sus únicos productores. El uso de aditivos expansores se desarrolló en Japón (S. Nagataki y H. Gomi, 1998) donde se fabrican los dos productos más conocidos en el mercado: uno en base a sulfoaluminato de calcio y un segundo en base a una combinación de óxido de calcio y sulfoaluminato de calcio.

En este tipo de pavimento se pueden presentar juntas de aislación – dilatación y/o juntas de construcción, estas ya fueron definidas anteriormente en pavimentos de hormigón simple con juntas c/s dispositivo de traspaso de carga.

5.3.1 Consideraciones de diseño

5.3.1.1 Determinación del espesor de losa

La determinación del espesor para losas conformadas con hormigón de retracción compensada es similar a los utilizados en losas apoyadas en un medio elástico. Los métodos de la PCA, COE, WRI u otro similar son apropiados.

5.3.1.2 Dimensiones de la losa

Normalmente y en la medida de lo posible, se trata de ubicar las juntas en la misma dirección de las columnas de la estructura y debajo de la línea de ubicación de los racks de estanterías. De esta forma se minimiza la condición de carga de borde y/o esquina. Los paños deben ser de preferencia cuadrados con razones L/W (largo/ancho) < 3. Esta técnica permite construir paños de hasta 1800 m².

5.3.1.3 Expansiones restringidas del hormigón

De acuerdo con lo indicado por el ACI, la retracción por secado del hormigón normalmente varía entre 0.03 % a 0.06 %.

5.3.1.4 Restricciones

Además de las restricciones que impone la armadura al hormigón, como por ejemplo, elementos estructurales adyacentes, fricción de losa con la subbase inducen compresiones en el hormigón. Los coeficientes de fricción con la subbase varían entre 0.5 y 2.0 según se ilustra en la Figura 5.6 (ACI 360R).

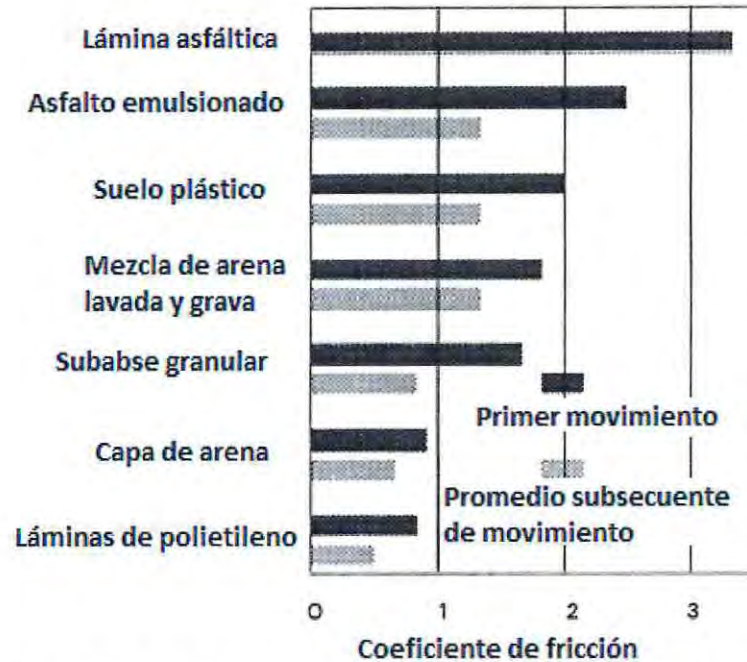


Figura 5.18- Coeficientes de fricción losa – subbase (ACI 360R).

5.3.1.5 Armadura

Las características de la armadura surgen del cálculo estructural y del porcentaje de refuerzo recomendado para brindar una adecuada restricción al hormigón. La armadura se debe colocar a una profundidad de un tercio del espesor de la losa. Normalmente los elementos diseñados usando las técnicas del hormigón armado contienen una cantidad de armadura suficiente para proporcionar la restricción requerida en el hormigón. Sin embargo, es deseable que la losa contenga una cuantía mínima de armadura del 0.15% de la sección. Además, la armadura no debe exceder una cuantía del 0,6% ya que con dicha cuantía de armadura las deformaciones de expansión y retracción se igualan. En la Figura 5.7 se muestra la expansión de losa versus expansión del prisma para diferentes razones de Volumen/Superficie y porcentajes de armadura.

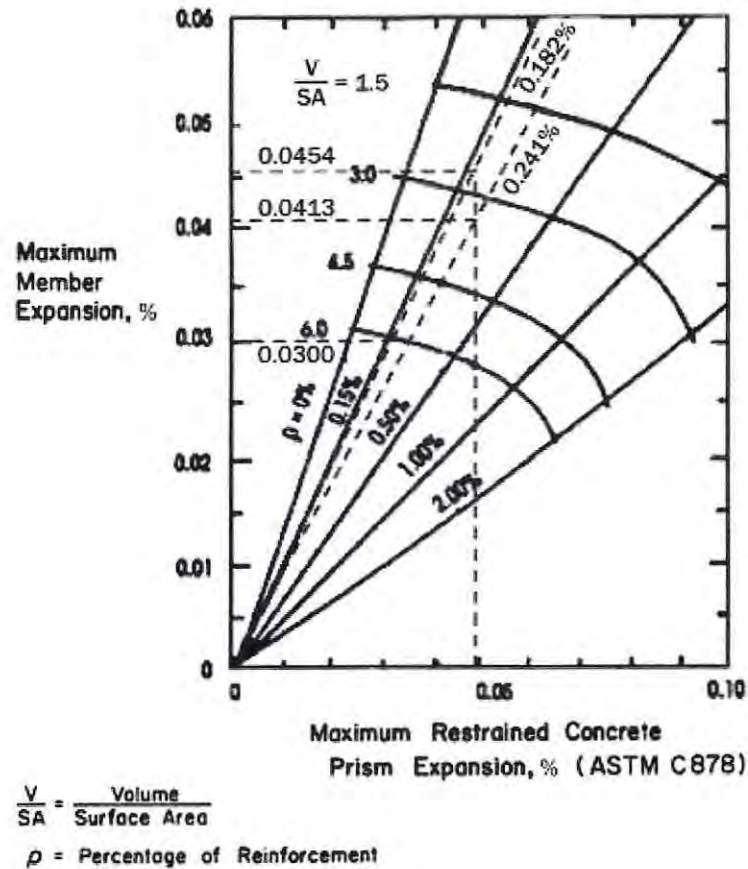


Figura 5.19- Expansión de losa versus expansión del prisma para diferentes razones de Volumen/Superficie y porcentajes de armadura.

5.4 Pavimentos de hormigón postensados

Una losa de hormigón postensada es una losa a la que se le ha aplicado una compresión por medio de una tracción a una armadura (generalmente cables de acero). Es decir, al aplicar tracción a los cables o armadura se induce una compresión a la losa. De esta forma al estar la losa bajo régimen de compresión, es posible aumentar la longitud de la losa y disminuir su espesor. Normalmente, los cables son traccionados a medida que aumenta la resistencia del hormigón hasta aplicar la fuerza de tracción de diseño y de esta forma generar la pre compresión del hormigón. El tensado de los cables puede ser unidireccional o bidireccional. En el caso de pavimentos industriales el tensado debe ser bidireccional. En estos casos, se recomienda que el nivel de tensado sea similar para las dos direcciones.

Los cables normalmente son postensados y anclados después de que el hormigón obtiene una resistencia suficiente para soportar la fuerza en el anclaje. El postensado puede ser adherido o no adherido.

Con esta técnica es posible construir longitudes de losa de 120 a 180 m eliminando de esta manera las juntas de contracción, por ende se utilizan las juntas de aislación – dilatación y/o juntas

de construcción, las que ya fueron definidas anteriormente en pavimentos de hormigón simple c/s dispositivos de traspaso de carga. Además se obtienen espesores de losas menores que en los otros tipos de pavimentos de hormigón. Por último, es posible conseguir pisos muy planos.

No obstante lo anterior, el diseño de este tipo de pavimentos tiene asociadas algunas dificultades las que dicen relación con la difícil reparación en el caso de alguna falla. Además, el tema del diseño de las juntas entre zonas en que se efectúa el pos tensado no es trivial.

5.4.1 Requisitos de la plataforma de apoyo

Los requisitos de la plataforma de apoyo o superficie de subrasante son similares a los pavimentos de hormigón convencional. Sin embargo, al tratarse de pavimentos más delgados, el sistema es más flexible y resultan mayores esfuerzos verticales a nivel de la subrasante. Por lo anterior, la calidad y resistencia de la fundación es más importante en este tipo de pavimentos que en convencionales. A raíz de lo anterior, normalmente se especifica un módulo de reacción de la subrasante o constante de balasto no inferior a los 54 MPa/m (200 psi/in).

5.4.2 Diseño de pavimento

Para el diseño de pavimentos de hormigón postensado se requiere determinar las siguientes variables:

-Espesor de losa (mínimo 150 mm).

-Nivel de tensado por dirección, normalmente con tensiones de trabajo de entre 400 y 500 psi.

Dependiendo del nivel de tensado de los cables se distinguen los siguientes tipos de tensado:

- ❖ Tensado total: No hay tracciones en la losa durante la operación del pavimento.
- ❖ Tensado parcial: Nivel de tensión de tracción inducida en la losa es inferior a la resistencia a la tracción por flexión del hormigón.
- ❖ Sub tensado: Nivel de tensión de tracción es mayor que la resistencia a la tracción por flexión del hormigón y se anticipa abundante agrietamiento.

El diseño de pavimentos para los niveles de tensado total y parcial se efectúan mediante la aplicación de teoría elástica. Para el caso del diseño de pavimentos con nivel sub tensados se basa en conceptos de diseño plástico. En este caso, las grietas se representan por rótulas y el modelo que se use debe ser capaz de analizar la losa con dos niveles de rigidez, la normal para la zona no agrietada y la reducida para la zona agrietada. Para el caso de este trabajo de título, es de interés el análisis de los casos de tensado total y parcial.

La longitud de la losa es controlada por la reducción que la fricción losa subbase induce en el tensado. Para reducir la fricción entre la losa y la subbase granular se colocan láminas de polietileno sobre una capa de arena de 6 a 13 mm. Esta capa de arena se utiliza para eliminar las pequeñas irregularidades que pudieran existir en la superficie de la subbase. Puede también considerarse otros sistemas reductores de fricción.

5.4.3 Conceptos de diseño elástico

Los criterios involucrados en el diseño elástico de pavimentos considera lo siguiente:

- El esfuerzo combinado debido a la acción conjunta de la carga externa, diferencial de temperatura (alabeo) y humedad debe ser inferior al tensado del hormigón más la resistencia a la tracción por flexión del hormigón. Para losas con pretensado total, se asume que la resistencia a la tracción por flexión es igual a cero.
- Las cargas de fatiga (cíclicas) debido a temperatura y carga deben ser lo suficientemente bajas para no causar falla por fatiga del hormigón.
- El esfuerzo máximo a nivel de la subrasante no debe exceder la capacidad resistente del suelo y las cargas no deben generar deformación permanente a nivel de subrasante. El primer criterio se cumple si:

$$\sigma_t + \sigma_p + \sigma_f \geq -(\sigma_c + \sigma_L) \quad (\text{ec. 5.5})$$

σ_t = Resistencia a la tracción por flexión (+).

σ_p = Nivel efectivo de postensado (+).

σ_f = Pérdida de tensado por fricción losa subbase (-).

$\sigma_c + \sigma_L$ = Esfuerzo conjunto carga y alabeo (-).

Para el segundo criterio, la razón que controla la fatiga del hormigón debe ser una medida entre la carga cíclica neta dividida por la tensión neta que produce agrietamiento:

$$SR = (-) \left[\frac{\sigma_c + \sigma_L + \sigma_p + \sigma_f}{\sigma_t + \sigma_p + \sigma_f} \right] \quad (\text{ec. 5.6})$$

- Para losas postensadas en ambas direcciones la ubicación de la tensión crítica de la losa es en un punto interior de la losa.
- Para losas postensadas en sólo una dirección, la posición de la tensión crítica de la losa generalmente es el borde.

5.4.4 Tensado efectivo

Para determinar el tensado efectivo debe considerarse todas las pérdidas por creep y fricción.

Si la armadura del postensado no se encuentra en la fibra neutra de la losa, debe considerarse la excentricidad del refuerzo en la determinación del pretensado efectivo mediante el uso de la siguiente expresión:

$$\sigma_p = \frac{P}{h} \left(1 + \frac{6e}{h} \right) \quad (\text{ec. 5.7})$$

5.4.5 Tensiones por fricción

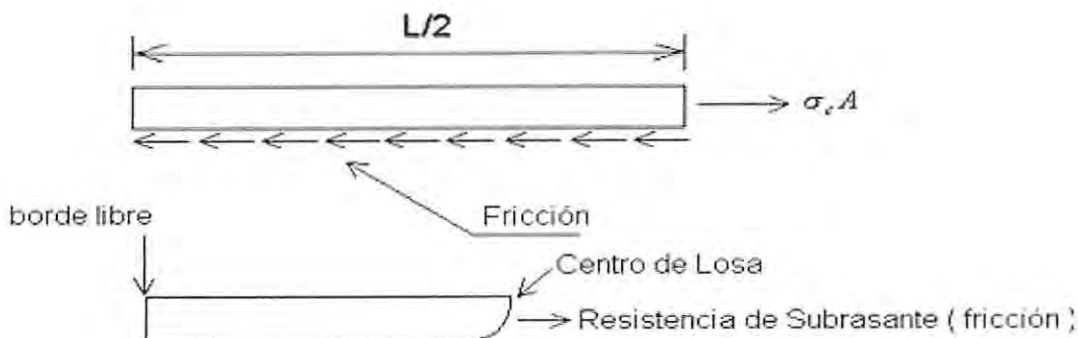


Figura 5.20- Tensión por fricción en la losa.

En general:

$$\sigma_c = \frac{W L f}{24 h} \quad (\text{ec. 5.8})$$

σ_c = Tensión unitaria en el hormigón, psi.

W = Peso de la losa (psf).

L = Longitud de la losa (ft).

f = Coeficiente de roce, 1.5.

h = Espesor de la losa, pulgadas.

El tercer criterio para el diseño de losas de hormigón postensadas usando conceptos elásticos es que la tensión máxima transmitida a la subrasante no debe exceder la capacidad del suelo o producir deformación permanente. Para ello,

$$W_n = W_1 + a \log(n). \quad (\text{ec. 5.9})$$

W_n = Deformación después de n aplicaciones de carga.

W_1 = Deformación después de la primera aplicación de carga.

a = Constante.

n = Número de aplicaciones de carga.

De la experiencia obtenida del comportamiento de pavimentos de hormigón se ha concluido que si la tensión máxima a nivel de la subrasante es menor que 0,5 de la resistencia a la Compresión No Confinada (CNC) del suelo, el ahuellamiento del suelo no es un problema.

5.4.6 Pérdida de pretensado

La pérdida de tensado del sistema de postensado se debe a los siguientes efectos:

- Relajación del acero.
- Creep del hormigón (Deformación por carga sostenida).
- Pérdidas en anclaje - acomodo.
- Pérdidas por fricción cable - hormigón.

5.4.7 Pérdida en sistema de anclaje

Entre las causas que producen una pérdida en el sistema de anclaje se distinguen las siguientes:

- La máxima fuerza aplicada se produce en la etapa final del tensado.
- Siempre se produce una pérdida de fuerza cuando se transfiere la carga del gato al sistema de anclaje.
- Pérdida de tensado al tratar de transferir el tensado de la losa a la losa de relleno (junta).
- Procedimiento de tensado utilizado.

5.4.8 Pérdida fricción cable-hormigón

Esta pérdida se produce por la curvatura del cable y fricción con el hormigón, la que se representa mediante la siguiente expresión:

$$F_j = F_x \exp(Kx + \mu\alpha) \quad (\text{ec.5.10})$$

donde:

F_j = Fuerza de tensado en el gato.

F_x = Fuerza de tensado a una distancia X del gato.

K = La curvatura (deformación) en el cable.

x = Distancia del gato.

μ = Coeficiente de fricción por curvatura.

α = Cambio angular total del perfil del cable de tensado en radianes desde el gato al punto x .

Con el uso de ductos rígidos puede adoptarse un valor de $K=0$. Para el caso de conductos semi rígidos la pérdida por este concepto puede despreciarse. Para otras condiciones, debe determinarse la pérdida en forma experimental para cada obra. Esto puede realizarse gateando en un extremo del cable y midiendo la fuerza de tensado en el otro extremo. Las pérdidas disminuyen con la longitud de la losa. De esta forma, la pérdida por este concepto puede reducirse significativamente si se tensa en forma simultánea desde los dos extremos.

5.4.9 Relajación y Creep

La pérdida de tensado en el largo plazo se atribuye principalmente a la relajación del acero y la deformación por creep del hormigón (deformación por carga sostenida). La relajación del acero se define como la pérdida de tensión en el acero como consecuencia de mantenerlo a un nivel de deformación constante. Si el cable está a una tensión inferior al 60% de la tensión de fluencia éste experimenta bajos niveles de relajación. La siguiente expresión entrega una estimación razonable de la relajación del acero en el tiempo cuando es sometido a un nivel de deformación constante:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{10} \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{yi}} - 0.55 \right) \quad (\text{ec. 5.11})$$

donde:

σ_p = Nivel de tensado del acero después de t horas.

σ_{pt} = Nivel de tensado inicial.

t = Tiempo después el tensado inicial, horas.

σ_{yt} = Tensión de fluencia del acero.

5.4.9.1 Creep del hormigón

Una causa más significativa en la pérdida de tensado es la deformación por creep del hormigón. Para la mayoría de los hormigones el nivel de deformación constante se alcanza en forma asintótica después de varios meses. La deformación por creep del hormigón depende de la composición del hormigón, humedad, temperatura y edad del hormigón al aplicársele la carga. La deformación por creep es prácticamente proporcional con la deformación del hormigón al momento de aplicar la carga inicial. De esta forma, se define el coeficiente de creep como:

$$C_u = \epsilon_{cu} / \epsilon_{ci} \quad (\text{ec. 5.12})$$

C_u = Coeficiente de Creep.

ϵ_{cu} = Deformación por creep.

ϵ_{ci} = Deformación por creep inicial o elástica.

Usando la definición anterior la deformación por creep correspondiente a cualquier fecha t expresada en días puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} C_u \quad (\text{ec. 5.13})$$

En los casos que no se disponga de valores del coeficiente de creep (C_u) se recomienda utilizar un valor igual a 2.35.

Para losas sin cargas estáticas permanentes, el creep se deberá solamente a la tensión de pretensado. Por otro lado, una forma de reducir la pérdida de tensado por creep es aplicar el tensado en incrementos o etapas. De esta forma se elimina el creep en cada una de las etapas o incrementos.

5.4.10 Diseño de cables

El diámetro y espaciamiento de los cables de postensado requerido son función del nivel de tensado requerido y de las diferentes pérdidas que se producen en los tendones durante y post construcción.

Normalmente se recomienda que el espaciamiento entre los cables longitudinales sea de entre 2 y 4 veces el espesor de la losa y de entre 3 y 6 veces el espesor de la losa para los cables transversales.

5.5 Pavimentos de hormigón con fibras

El uso de fibras de acero y sintéticas se han utilizado en pisos de hormigón por más de 30 años para mejorar las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Para mejorar el hormigón plástico y las propiedades en estado endurecido se utilizan fibras sintéticas y de acero. Las fibras pueden ayudar a reducir la segregación de la mezcla de hormigón y la formación de grietas por contracción mientras el hormigón esté en el estado plástico y durante las primeras horas de curado.

Las fibras sintéticas se han utilizado para controlar el agrietamiento por retracción plástica del hormigón. Las más utilizadas son las de polipropileno, polietileno y nylon. A su vez tiene poco impacto en el comportamiento del hormigón una vez endurecido. Por su parte, las fibras de acero y algunas macrosintéticas se han utilizado para el control de agrietamiento aleatorio del hormigón una vez endurecido. Por lo anterior, el uso de estos elementos resulta en beneficios tanto en el hormigón fresco como endurecido. El grado de control del ancho de grieta está directamente relacionado con el tipo de fibra y cantidad empleada.

Las fibras mejoran el enlace a la matriz endurecida. Para minimizar el agrietamiento visible, se aumenta la resistencia al corte, fatiga a la flexión, resistencia al impacto y después de formada una grieta en su tenacidad (área bajo la curva tensión - deformación).

Las fibras actúan como refuerzo en el hormigón contra los esfuerzos de retracción plástica y por secado. Además proporcionan un refuerzo estructural a la losa. La longitud de fibras utilizadas en pisos de hormigón fluctúan entre 13 a 64 mm (0.5 a 2.5 pulgadas). Entre las fibras sintéticas se diferencian como micro fibras las de largo menor a 25 mm y macro fibras a las de largo mayor a 25 mm. A su vez las macro fibras pueden ser estructurales y no estructurales (alta performance y baja performance).

5.5.1 Principios de diseño

Los principios de diseño para pavimentos de hormigón con fibras son los mismos que los utilizados para el hormigón no reforzado.

Para el detalle de juntas se aplica lo mismo que para hormigón no reforzado.

Las fibras se usan para reforzar losas de hormigón, estas proporcionan mayor resistencia al impacto, flexión, dureza, fatiga, control de ancho de fisura y a la tracción. El comportamiento de un pavimento de hormigón con fibras depende de la razón de aspecto de la fibra, espaciamiento, resistencia a la tracción, características de anclaje y volumen de fibra. Así como en el caso de refuerzo convencional (armadura) las fibras no previenen el agrietamiento pero sirven para mantener las grietas firmemente unidas de modo que la losa se comporte de acuerdo a lo esperado. El grado del control de agrietamiento y del ancho de grietas está directamente relacionado con el tipo de fibra y su dosis.

5.5.2 Tenacidad a la flexión

La tenacidad es una medida de la capacidad resistente del hormigón reforzado con fibras post agrietamiento y está definida como el área bajo la curva carga – deflexión del ensayo de una vigueta.

Se debe usar los factores de resistencia residual R_{e3} y resistencia residual promedio ARS determinada según ASTM C1609-10, JSCE SF4 o EN 14651 según corresponda. Estos factores representan un valor medio de la capacidad de carga obtenida en el ensayo de la vigueta sobre un intervalo de deflexión. La guía del ACI360 utiliza el factor de resistencia residual R_{e3} para representar las características de un pavimento de hormigón con fibras post agrietado. R_{e3} corresponde a la carga promedio aplicada a la vigueta hasta una deflexión de 3mm, expresada como la razón de la carga a la primera grieta.

El grado de tenacidad a la flexión está directamente relacionado con la proporción y todos los componentes de la mezcla, incluyendo el tipo y la cantidad de fibra.

5.5.3 Resistencia al impacto

La resistencia al impacto del hormigón reforzado con fibras es de entre 3 a 10 veces mayor que el hormigón simple cuando se somete a cargas de impacto o repentinas. El grado de resistencia al impacto está directamente relacionado con la proporción y todos los componentes de la mezcla, incluyendo el tipo y cantidad de fibra.

5.5.4 Resistencia a la fatiga por flexión

El hormigón reforzado con fibras ha experimentado resistencias a la fatiga de entre un 30 y un 80% superiores que un hormigón simple. El grado de resistencia a la fatiga por flexión está directamente relacionado con la proporción y todos los componentes de la mezcla, incluyendo el tipo y cantidad de fibra.

5.5.5 Resistencia al corte

El hormigón reforzado con fibras puede proveer una mayor resistencia al punzonamiento (falla por corte) que un pavimento de hormigón simple. El grado de resistencia al corte está directamente relacionado con la proporción y todos los componentes de la mezcla, incluyendo el tipo y cantidad de fibra.

5.5.6 Métodos de diseño

Normalmente se utilizan los métodos de diseño elásticos y elasto plásticos.

Entre los primeros se distinguen los métodos de la PCA, WRI, COE o sistemas de ecuaciones de Westergaard presentados anteriormente en este trabajo de título. Una variante de este método es considerar que la tensión admisible del hormigón reforzado con fibras es igual a la resistencia a la flexión equivalente del material compuesto dado por la siguiente expresión:

$$fb = \frac{R_{e3}}{100} * fr \quad (\text{ec. 5.14})$$

fb = Tensión admisible a tracción por flexión.

R_{e3} = Factor de resistencia residual se determina utilizando JSCE SF4.

f_r = Módulo de rotura del hormigón.

El método elasto plástico denominado también método de fluencia considera la redistribución de momentos y formación de rótulas plásticas en la losa. Estas regiones de rótulas plásticas se desarrollan en los puntos de momento máximo y producen un desplazamiento en el diagrama de momento elástico.

Debido a que la formación de las rótulas plásticas depende de la tenacidad, la resistencia residual mínima R_{e3} debe ser mayor que 50%.

El trabajo de (Meyerhof, 1962) presenta tres casos de carga y que son los siguientes:

5.5.6.1 Caso 1 carga interior de losa

$$P_o = 6 * \left[1 + \frac{2a}{L}\right] * M_o \quad (\text{ec.5.15})$$

Para este caso, el valor de M_o queda dado por:

$$M_o = M_n + M_p = \left[1 + \frac{R_{e3}}{100}\right] * \frac{f_r * b * h^2}{6} \quad (\text{ec. 5.16})$$

5.5.6.2 Caso 2 carga de borde

$$P_o = 3.5 * \left[1 + \frac{3a}{L}\right] * M_o \quad (\text{ec. 5.17})$$

Para este caso, el valor de M_o queda dado por la siguiente expresión

$$M_o = M_n + M_p = \left[1 + \frac{R_{e3}}{100}\right] * \frac{f_r * b * h^2}{6} \quad (\text{ec. 5.18})$$

5.5.6.3 Caso 3 carga de esquina

$$P_o = 2 * \left[1 + \frac{4a}{L}\right] * M_o \quad (\text{ec. 5.19})$$

Para este caso, el valor de M_o queda dado por la siguiente expresión

$$M_o = Mn = \frac{fr \cdot b \cdot h^2}{6} \quad (\text{ec. 5.20})$$

donde:

a = Radio del área cargada.

b = Ancho unitario.

fr = Módulo de rotura del hormigón.

h = Espesor de la losa.

L = Radio de rigidez relativa.

Mn = Momento negativo resistente de la losa, tracción en la fibra superior de la losa.

Mp = Momento positivo resistente de la losa, tracción en la fibra inferior de la losa.

P_o = Resistencia última de la losa.

R_e^3 = Factor de resistencia residual se determina utilizando JSCE SF4, %.

El término $\left[1 + \frac{R_{e3}}{100}\right] * fr$, es un factor de mejoramiento que considera la tenacidad del hormigón reforzado con fibras.

6. Análisis de un caso de estudio

6.1 Recopilación de antecedentes

6.1.1 Propiedades del hormigón

- Módulo de elasticidad (E): 300000 Kgf/cm²
- Coeficiente de poisson (ν): 0.15
- Resistencia a la flexotracción (Rf 28 esp): 46 Kgf/cm²

6.1.2 Solicitaciones de carga

6.1.2.1 Estanterías (racks)

En las bodegas se utilizan sistemas de estanterías para el almacenaje de productos. Las estanterías constan de 5 niveles, de las cuales 4 de estos descargarían su peso en los pilares (la carga en el primer nivel se apoya directamente en el pavimento), en cada nivel se colocarían 2 pallets con una carga promedio de 1000 kg cada uno, los pilares se anclan al piso mediante un perno de expansión colocando una pletina de acero de 30x30 cm (Figura 6.1).

Por lo tanto existen dos condiciones de cargas críticas debidas al sistema de estanterías. La primera condición consta en que 2 estanterías estén una al lado de la otra y que los pilares centrales que son los que están más cercanos descarguen 8000 kgf, debido a la que la junta estaría a un lado lateral de los pilares, por ende se utilizarían 2 pletinas de acero de 30x30 cm. La segunda condición consta en que 2 estanterías estén una al lado de la otra y que los pilares centrales que son los que están más cercanos descarguen 4000 kgf, debido a que la junta estaría al medio de los pilares, por ende se utilizaría una pletina de acero de 30x30cm (Figura 6.2 y 6.3).

Para la condición de pavimentos de hormigón postensados no se requiere una placa de apoyo de 30x30 cm para la descarga de estanterías, por lo que se utiliza una placa de apoyo de 14.2x14.2 cm.

Tabla 6.1- Cargas críticas debidas al sistema de racks.

Condición	Carga Promedio de Diseño (kg)	Area (cm ²)
1	8000	30x30x2 = 1800
2	4000	30x30 = 900

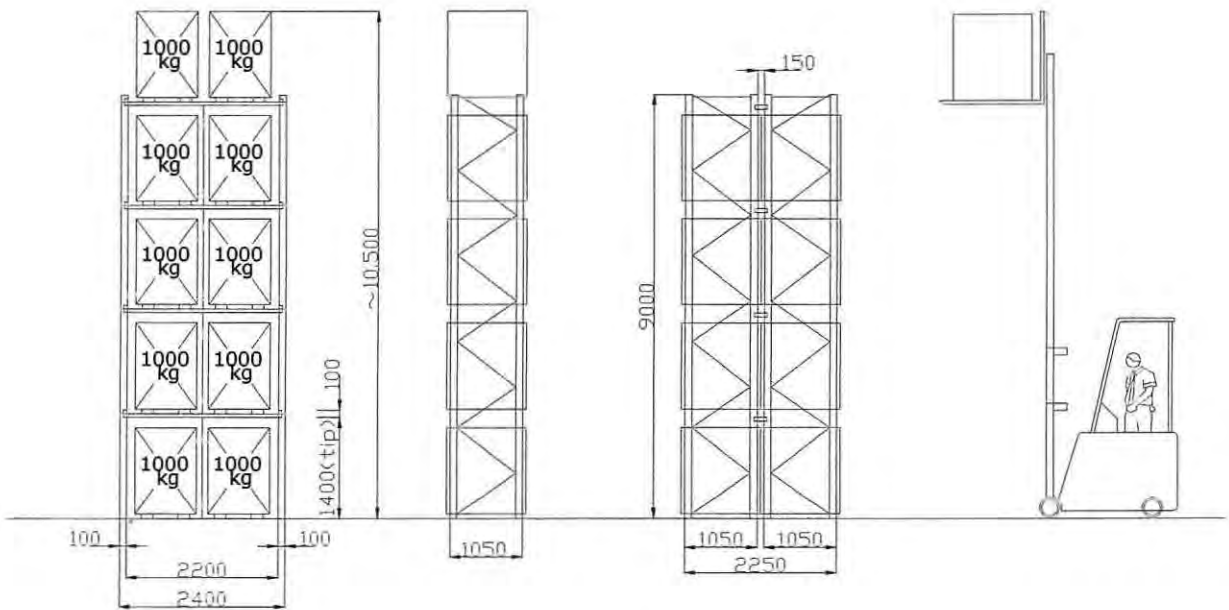


Figura 6.1- Esquema de sistema de Racks. (No a escala).

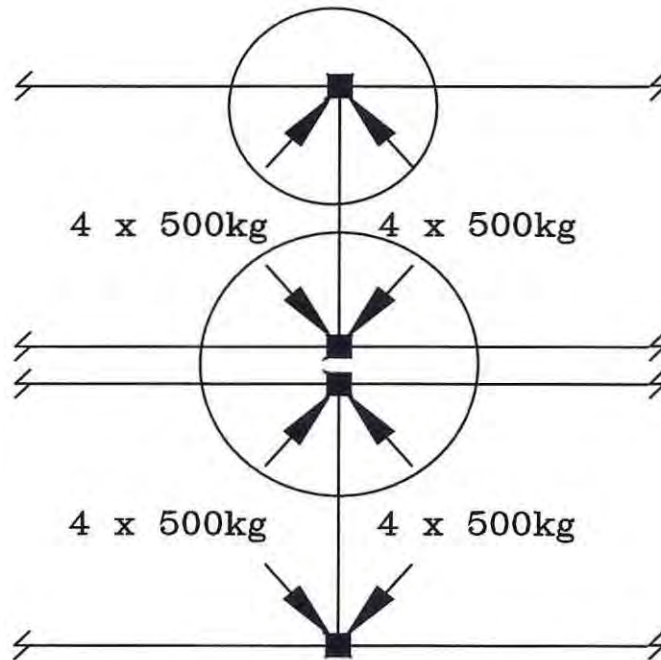


Figura 6.2- Condiciones críticas de carga que producirían los racks.

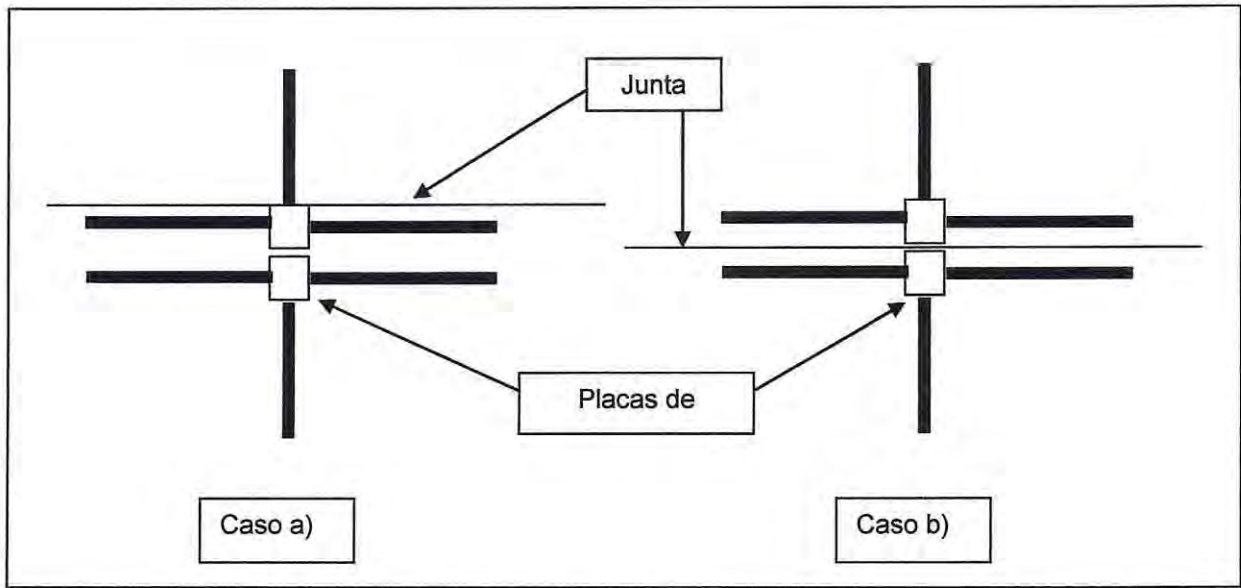


Figura 6.3- Condiciones de apoyo para la condición crítica para los racks.

6.1.2.2 Montacargas

Para el diseño, se considera un montacargas eléctrico que en general induce una mayor carga de diseño que los de gas.

Para este tipo de montacargas se considera una capacidad de carga de 1500 kg aproximadamente; estos montacargas utilizan ruedas rígidas, de material polimérico, con diámetros inferiores a los 20 cm. A su vez estos disponen de un brazo retráctil, el cual hace variar la distribución del peso en las ruedas.

Basándose en antecedentes reales las cargas críticas para el análisis se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2- Condición crítica de los montacargas.

Condición	Carga máxima (kg)	Área (cm ²)	Descripción
1	696	13.40	Rueda estabilizadora, brazo retraído
2	1976	18.3	Rueda de carga doble, brazo extendido

6.1.3 Mecánica de suelos

Sobre el terreno natural se encuentra construido un relleno estructural de 2.5 m de altura de material pumacita. Se considera que el peso unitario natural del relleno es de 2.1 t/m^3 con un módulo de elasticidad de 3000 t/m^2 .

Además para el diseño se adoptara un valor de constante de balasto módulo de reacción de la subrasante igual a 7.6 kgf/cm^3 . Para mayor información ver Anexo 1.

6.1.4 Pavimentos de bodega

Para el diseño de pavimentos se utilizan las ecuaciones de Westergaard para determinar el nivel máximo de tensiones inducidas en la losa, para posteriormente seleccionar el espesor crítico requerido al interior de la bodega. En el diseño de pavimentos se adopta un criterio de falla del 80%.

Para considerar el alabeo térmico de las losas (presencia de un diferencial de temperatura entre la fibra superior e inferior de la losa), se estima un diferencial térmico positivo a través del espesor de la losa no superior a los 5°C .

Para considerar el efecto de la transferencia de carga en las juntas proporcionadas por la trabazón mecánica de los áridos en la junta en el análisis tensional se asumió un valor de transferencia de carga igual a 60%. Para el caso de pasillos se ha considerado en las juntas transversales la colocación de barras de traspaso de carga suponiéndose para dicha condición una transferencia de carga del 90%.

6.2 Diseño de pavimentos

6.2.1 Pavimento de hormigón simple con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga

6.2.1.1 Diseño para el caso de estanterías

En el diseño se considera una longitud de losa de 370 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, por lo que se realiza un análisis sin barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 2 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 50% de transferencia de carga (ver figura 4.3), también a su vez se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.

h	l	P	Área placa	presión	a	a/l	oh ² /P	F _{forma}	FL	σ _w	L/l	α	λ	C	σ _a	σ _T	R/28 esp	σ _T /R/28	Número de Repeticiones
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm2]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]		
Análisis sin Barras de Traspaso de Carga																			
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																			
18	66.56	8,000	1800	4.4	23.9	0.360	1.59	0.888	1.000	34.9	5.56	1.10E-05	1.965	0.8373	6.9	42	46	0.84	3.10E+03
19	69.31	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	1.64	0.890	1.000	32.4	5.34	1.10E-05	1.887	0.7918	6.5	39	46	0.78	6.48E+03
20	72.03	8,000	1800	4.4	23.9	0.332	1.69	0.892	1.000	30.1	5.14	1.10E-05	1.816	0.7465	6.2	37	46	0.73	1.41E+04
21	74.72	8,000	1800	4.4	23.9	0.320	1.73	0.895	0.998	28.0	4.95	1.10E-05	1.751	0.7017	5.8	34	46	0.68	3.29E+04
22	77.37	8,000	1800	4.4	23.9	0.309	1.77	0.896	0.994	26.1	4.78	1.10E-05	1.691	0.6582	5.4	32	46	0.63	8.26E+04
23	79.99	8,000	1800	4.4	23.9	0.299	1.82	0.898	0.990	24.4	4.63	1.10E-05	1.635	0.6161	5.1	30	46	0.59	2.20E+05
24	82.59	8,000	1800	4.4	23.9	0.290	1.85	0.900	0.986	22.8	4.48	1.10E-05	1.584	0.5759	4.8	28	46	0.55	6.23E+05
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																			
14	55.12	4,000	900	4.4	16.9	0.307	1.78	0.897	1.000	32.6	6.71	1.10E-05	2.373	1.0022	8.3	42	46	0.82	3.82E+03
15	58.05	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.85	0.899	1.000	29.5	6.37	1.10E-05	2.253	0.9655	8.0	38	46	0.75	9.62E+03
16	60.93	4,000	900	4.4	16.9	0.278	1.91	0.902	1.000	26.9	6.07	1.10E-05	2.147	0.9250	7.6	35	46	0.69	2.56E+04
17	63.77	4,000	900	4.4	16.9	0.265	1.96	0.904	1.000	24.6	5.80	1.10E-05	2.051	0.8820	7.3	32	46	0.64	7.28E+04
18	66.56	4,000	900	4.4	16.9	0.254	2.02	0.906	1.000	22.6	5.56	1.10E-05	1.965	0.8373	6.9	30	46	0.59	2.21E+05
19	69.31	4,000	900	4.4	16.9	0.244	2.07	0.908	1.000	20.8	5.34	1.10E-05	1.887	0.7918	6.5	28	46	0.55	7.22E+05

Análisis con Barras de Traspaso de Carga

Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima

14	55.12	8,000	1800	4.4	23.9	0.434	1.37	0.607	1.000	33.9	6.71	1.10E-05	2.373	1.0022	8.3	43	46	0.85	2.82E+03
15	58.05	8,000	1800	4.4	23.9	0.412	1.43	0.616	1.000	31.3	6.37	1.10E-05	2.253	0.9655	8.0	40	46	0.79	5.85E+03
16	60.93	8,000	1800	4.4	23.9	0.393	1.49	0.624	1.000	29.0	6.07	1.10E-05	2.147	0.9250	7.6	37	46	0.73	1.27E+04
17	63.77	8,000	1800	4.4	23.9	0.375	1.54	0.631	1.000	26.9	5.80	1.10E-05	2.051	0.8820	7.3	35	46	0.69	2.90E+04
18	66.56	8,000	1800	4.4	23.9	0.360	1.59	0.638	1.000	25.1	5.56	1.10E-05	1.965	0.8373	6.9	32	46	0.64	6.96E+04
19	69.31	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	1.64	0.644	1.000	23.4	5.34	1.10E-05	1.887	0.7918	6.5	30	46	0.60	1.77E+05
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																			
11	46.00	4,000	900	4.4	16.9	0.368	1.56	0.634	1.000	32.8	8.04	1.10E-05	2.844	1.0769	8.9	42	46	0.84	3.18E+03
12	49.11	4,000	900	4.4	16.9	0.345	1.64	0.644	1.000	29.4	7.53	1.10E-05	2.664	1.0392	8.7	39	46	0.76	8.04E+03
13	52.14	4,000	900	4.4	16.9	0.325	1.72	0.652	1.000	26.5	7.10	1.10E-05	2.509	1.0339	8.5	36	46	0.70	2.14E+04
14	55.12	4,000	900	4.4	16.9	0.307	1.78	0.660	1.000	24.0	6.71	1.10E-05	2.373	1.0022	8.3	33	46	0.65	6.05E+04
15	58.05	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.85	0.667	1.000	21.9	6.37	1.10E-05	2.253	0.9655	8.0	30	46	0.60	1.82E+05
16	60.93	4,000	900	4.4	16.9	0.278	1.91	0.673	1.000	20.0	6.07	1.10E-05	2.147	0.9250	7.6	28	46	0.56	5.90E+05

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R/28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 370 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.1.2 Diseño para el caso de montacargas

En el diseño se considera una longitud de losa de 370 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, por lo que se realiza un análisis sin barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 2 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 50% de transferencia de carga (ver figura 4.3), también a su vez se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	ch ³ /P	K _{sum}	EL	σ _w	L/l	α	λ	C	σ _a	σ _T	R/28 esp	σ _T / R/28	Número de	
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm2]	[cm]					[kgf/cm ²]					[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]		Repeticiones	
Análisis sin barras de Traspaso de Carga																				
Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																				
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.941	1.000	33.3	9.35	1.10E-05	3.305	1.0842	8.94	43	46	0.85	2.79E+03	
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.941	1.000	27.7	8.64	1.10E-05	3.054	1.0856	8.96	37	46	0.73	1.25E+04	
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.942	1.000	23.4	8.04	1.10E-05	2.844	1.0769	8.88	33	46	0.65	5.98E+04	
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.942	1.000	20.1	7.53	1.10E-05	2.664	1.0592	8.74	29	46	0.58	3.07E+05	
13	52.14	696	13.4	51.9	2.1	0.040	4.50	0.943	1.000	17.5	7.10	1.10E-05	2.509	1.0339	8.53	26	46	0.52	1.70E+06	
14	55.12	696	13.4	51.9	2.1	0.037	4.57	0.943	1.000	15.3	6.71	1.10E-05	2.373	1.0022	8.27	24	46	0.47	1.04E+07	
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																				
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.943	1.000	32.7	6.07	1.10E-05	2.147	0.9250	7.63	41	46	0.81	4.40E+03	
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.943	1.000	29.4	5.80	1.10E-05	2.051	0.8820	7.28	37	46	0.74	1.24E+04	
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.943	1.000	26.6	5.56	1.10E-05	1.965	0.8373	6.91	34	46	0.67	3.77E+04	
19	69.31	1,976	18.3	107.9	2.4	0.035	4.67	0.944	1.000	24.1	5.34	1.10E-05	1.887	0.7918	6.53	31	46	0.62	1.24E+05	
20	72.03	1,976	18.3	107.9	2.4	0.034	4.73	0.944	1.000	22.0	5.14	1.10E-05	1.816	0.7465	6.16	29	46	0.57	4.40E+05	
21	74.72	1,976	18.3	107.9	2.4	0.032	4.78	0.944	0.996	20.1	4.95	1.10E-05	1.751	0.7017	5.79	26	46	0.52	1.80E+06	

Análisis con Barras de Traspaso de Carga

Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																				
8	36.23	696	13.4	51.9	2.1	0.057	4.00	0.776	1.000	33.7	10.21	1.10E-05	3.611	1.0726	8.85	43	46	0.85	2.58E+03	
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.778	1.000	27.5	9.35	1.10E-05	3.305	1.0842	8.94	37	46	0.73	1.31E+04	
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.780	1.000	23.0	8.64	1.10E-05	3.054	1.0856	8.96	32	46	0.64	7.09E+04	
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.782	1.000	19.5	8.04	1.10E-05	2.844	1.0769	8.88	29	46	0.57	4.05E+05	
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.783	1.000	16.7	7.53	1.10E-05	2.664	1.0592	8.74	26	46	0.51	2.47E+06	
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																				
14	55.12	1,976	18.3	107.9	2.4	0.044	4.36	0.783	1.000	34.4	6.71	1.10E-05	2.373	1.0022	8.27	43	46	0.86	2.54E+03	
15	58.05	1,976	18.3	107.9	2.4	0.042	4.43	0.784	1.000	30.5	6.37	1.10E-05	2.253	0.9655	7.97	39	46	0.77	7.32E+03	
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.785	1.000	27.2	6.07	1.10E-05	2.147	0.9250	7.63	35	46	0.70	2.27E+04	
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.785	1.000	24.5	5.80	1.10E-05	2.051	0.8820	7.28	32	46	0.64	7.59E+04	
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.786	1.000	22.1	5.56	1.10E-05	1.965	0.8373	6.91	29	46	0.58	2.76E+05	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente de la carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R/28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 370 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

La condición de carga crítica queda dada por los racks, dos placas en el borde de la junta (condición 1) con carga máxima y con un análisis sin barras de traspaso de carga, resultando para este diseño de pavimento un espesor de losa de 18 cm.

6.2.2 Pavimento de hormigón reforzado para el control del ancho de grietas

6.2.2.1 Diseño para el caso de estanterías

En el diseño se considera una longitud de losa de 1500 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, por lo que se realiza un análisis sin barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 2 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 50% de transferencia de carga (ver figura 4.3), también a su vez se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.

h	l	P	Área placa	presión	a	a/l	σ_1^2/P	f_{norm}	F _L	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_n	σ_T	R/28 esp	$\sigma_T/R/28$	Número de Repeticiones	
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm ²]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]			
Análisis sin Barras de Traspaso de Carga																				
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																				
19	69.31	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	1.64	0.890	1.000	32.4	21.64	1.10E-05	7.651	0.9989	8.2	41	46	0.81	4.13E+03	
20	72.03	8,000	1800	4.4	23.9	0.332	1.69	0.892	1.000	30.1	20.82	1.10E-05	7.362	0.9983	8.2	39	46	0.77	7.54E+03	
21	74.72	8,000	1800	4.4	23.9	0.320	1.73	0.895	1.000	28.1	20.08	1.10E-05	7.098	0.9977	8.2	37	46	0.73	1.38E+04	
22	77.37	8,000	1800	4.4	23.9	0.309	1.77	0.896	1.000	26.3	19.39	1.10E-05	6.855	0.9971	8.2	35	46	0.69	2.56E+04	
23	79.99	8,000	1800	4.4	23.9	0.299	1.82	0.898	1.000	24.7	18.75	1.10E-05	6.630	0.9966	8.2	33	46	0.66	4.76E+04	
24	82.59	8,000	1800	4.4	23.9	0.290	1.85	0.900	1.000	23.2	18.16	1.10E-05	6.421	0.9963	8.2	32	46	0.63	8.87E+04	
25	85.15	8,000	1800	4.4	23.9	0.281	1.89	0.901	1.000	21.8	17.62	1.10E-05	6.228	0.9963	8.2	31	46	0.60	1.66E+05	
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																				
14	55.12	4,000	900	4.4	16.9	0.307	1.78	0.897	1.000	32.6	27.21	1.10E-05	9.621	1.0002	8.3	41	46	0.82	3.84E+03	
15	58.05	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.85	0.899	1.000	29.5	25.84	1.10E-05	9.135	1.0001	8.3	38	46	0.76	8.84E+03	
16	60.93	4,000	900	4.4	16.9	0.278	1.91	0.902	1.000	26.9	24.62	1.10E-05	8.704	1.0000	8.3	36	46	0.70	2.06E+04	
17	63.77	4,000	900	4.4	16.9	0.265	1.96	0.904	1.000	24.6	23.52	1.10E-05	8.317	0.9998	8.2	33	46	0.66	4.86E+04	
18	66.56	4,000	900	4.4	16.9	0.254	2.02	0.906	1.000	22.6	22.54	1.10E-05	7.968	0.9994	8.2	31	46	0.62	1.15E+05	
19	69.31	4,000	900	4.4	16.9	0.244	2.07	0.908	1.000	20.8	21.64	1.10E-05	7.651	0.9989	8.2	29	46	0.58	2.75E+05	
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																				
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																				
14	55.12	8,000	1800	4.4	23.9	0.434	1.37	0.607	1.000	33.9	27.21	1.10E-05	9.621	1.0002	8.3	43	46	0.85	2.83E+03	
15	58.05	8,000	1800	4.4	23.9	0.412	1.43	0.616	1.000	31.3	25.84	1.10E-05	9.135	1.0001	8.3	40	46	0.79	5.42E+03	
16	60.93	8,000	1800	4.4	23.9	0.393	1.49	0.624	1.000	29.0	24.62	1.10E-05	8.704	1.0000	8.3	38	46	0.75	1.05E+04	
17	63.77	8,000	1800	4.4	23.9	0.375	1.54	0.631	1.000	26.9	23.52	1.10E-05	8.317	0.9998	8.2	36	46	0.70	2.05E+04	
18	66.56	8,000	1800	4.4	23.9	0.360	1.59	0.638	1.000	25.1	22.54	1.10E-05	7.968	0.9994	8.2	34	46	0.67	4.03E+04	
19	69.31	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	1.64	0.644	1.000	23.4	21.64	1.10E-05	7.651	0.9989	8.2	32	46	0.63	7.99E+04	
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																				
11	46.00	4,000	900	4.4	16.9	0.368	1.56	0.634	1.000	32.8	32.61	1.10E-05	11.528	1.0000	8.3	42	46	0.82	3.71E+03	
12	49.11	4,000	900	4.4	16.9	0.345	1.64	0.644	1.000	29.4	30.55	1.10E-05	10.800	1.0000	8.3	38	46	0.75	9.28E+03	
13	52.14	4,000	900	4.4	16.9	0.325	1.72	0.652	1.000	26.5	28.77	1.10E-05	10.170	1.0001	8.3	35	46	0.70	2.36E+04	
14	55.12	4,000	900	4.4	16.9	0.307	1.78	0.660	1.000	24.0	27.21	1.10E-05	9.621	1.0002	8.3	33	46	0.65	6.09E+04	
15	58.05	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.85	0.667	1.000	21.9	25.84	1.10E-05	9.135	1.0001	8.3	31	46	0.60	1.58E+05	
16	60.93	4,000	900	4.4	16.9	0.278	1.91	0.673	1.000	20.0	24.62	1.10E-05	8.704	1.0000	8.3	29	46	0.57	4.14E+05	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_n = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R/28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 1500 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.2.2 Diseño para el caso de montacargas

En el diseño se considera una longitud de losa de 1500 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, por lo que se realiza un análisis sin barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 2 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 50% de transferencia de carga (ver figura 4.3), también a su vez se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f berma se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	σ_{II}^2/P	f_{term}	R _L	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_a	σ_r	R28 esp	$\sigma_r/R28$	Número de Repeticiones	
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm ²]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]			
Análisis sin barras de Traspaso de Carga																				
Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																				
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.941	1.000	33.3	37.90	1.10E-05	13.400	1.0000	8.25	42	46	0.83	3.28E+03	
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.941	1.000	27.7	35.02	1.10E-05	12.382	1.0000	8.25	36	46	0.72	1.57E+04	
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.942	1.000	23.4	32.61	1.10E-05	11.528	1.0000	8.25	32	46	0.64	7.84E+04	
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.942	1.000	20.1	30.55	1.10E-05	10.800	1.0000	8.25	29	46	0.57	4.01E+05	
13	52.14	696	13.4	51.9	2.1	0.040	4.50	0.943	1.000	17.5	28.77	1.10E-05	10.170	1.0001	8.25	26	46	0.52	2.06E+06	
14	55.12	696	13.4	51.9	2.1	0.037	4.57	0.943	1.000	15.3	27.21	1.10E-05	9.621	1.0002	8.25	24	46	0.47	1.05E+07	
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																				
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.943	1.000	32.7	24.62	1.10E-05	8.704	1.0000	8.25	42	46	0.82	3.77E+03	
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.943	1.000	29.4	23.52	1.10E-05	8.317	0.9998	8.25	38	46	0.75	9.23E+03	
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.943	1.000	26.6	22.54	1.10E-05	7.968	0.9994	8.24	35	46	0.70	2.30E+04	
19	69.31	1,976	18.3	107.9	2.4	0.035	4.67	0.944	1.000	24.1	21.64	1.10E-05	7.651	0.9989	8.24	33	46	0.65	5.83E+04	
20	72.03	1,976	18.3	107.9	2.4	0.034	4.73	0.944	1.000	22.0	20.82	1.10E-05	7.362	0.9983	8.24	31	46	0.61	1.49E+05	
21	74.72	1,976	18.3	107.9	2.4	0.032	4.78	0.944	1.000	20.2	20.08	1.10E-05	7.098	0.9977	8.23	29	46	0.57	3.83E+05	
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																				
Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																				
8	36.23	696	13.4	51.9	2.1	0.057	4.00	0.776	1.000	33.7	41.40	1.10E-05	14.638	1.0000	8.25	43	46	0.84	2.96E+03	
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.778	1.000	27.5	37.90	1.10E-05	13.400	1.0000	8.25	36	46	0.72	1.65E+04	
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.780	1.000	23.0	35.02	1.10E-05	12.382	1.0000	8.25	32	46	0.63	9.67E+04	
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.782	1.000	19.5	32.61	1.10E-05	11.528	1.0000	8.25	28	46	0.56	5.82E+05	
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.783	1.000	16.7	30.55	1.10E-05	10.800	1.0000	8.25	25	46	0.50	3.51E+06	
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																				
14	55.12	1,976	18.3	107.9	2.4	0.044	4.36	0.783	1.000	34.4	27.21	1.10E-05	9.621	1.0002	8.25	43	46	0.85	2.55E+03	
15	58.05	1,976	18.3	107.9	2.4	0.042	4.43	0.784	1.000	30.5	25.84	1.10E-05	9.135	1.0001	8.25	39	46	0.78	6.75E+03	
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.785	1.000	27.2	24.62	1.10E-05	8.704	1.0000	8.25	36	46	0.71	1.83E+04	
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.785	1.000	24.5	23.52	1.10E-05	8.317	0.9998	8.25	33	46	0.66	5.05E+04	
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.786	1.000	22.1	22.54	1.10E-05	7.968	0.9994	8.24	31	46	0.61	1.41E+05	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_r = Tensión combinada (carga + alabeo), R/28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 1500 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5 °C.

La condición de carga crítica queda dada por los racks, dos placas en el borde de la junta (condición1) con carga máxima y con un análisis sin barras de traspaso de carga, resultando para este diseño de pavimento un espesor de losa de 19 cm.

6.2.2.3 Cálculo de armadura

Según como se menciona en el ACI 360 el porcentaje mínimo de acero que se puede utilizar es del 0.5%. En el cálculo de enfierradura se considera el espesor más desfavorable que es de 19 cm.

$$A_s = 0.5\% A_c$$

$$A_c = 100 * h$$

$$h = 19$$

$$A_c = 100 * 19 = 1900 \text{ cm}^2$$

$$A_s = \frac{0.5 * 1900}{100} = 9.5 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{\text{barra}} = \frac{9.5}{5} = 1.9$$

$$\frac{\pi * d^2}{4} = 1.9$$

$$d = \sqrt{\frac{1.9 * 4}{\pi}} = 1.56 \text{ cm} = 15.6 \text{ mm}$$

Entonces la armadura es de $5\Phi 16@20$

6.2.3 Pavimento de hormigón de retracción compensada

6.2.3.1 Diseño para el caso de estanterías

En el diseño se considera una longitud de losa de 3000 cm. Este diseño se analiza tanto para el caso de carga de borde y carga interior. En el caso para carga de borde se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f_{berma} se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3). En el caso para carga interior el análisis es sin barras de traspaso de carga.

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.7 y 6.8.

Tabla 6.7- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks, para caso de carga de borde.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	σ^2/P	f_{forma}	FL	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_a	σ_T	RE28 esp	$\sigma_T/RE28$	Número de Repeticiones
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kgf/cm ²]	[cm]					[kgf/cm ²]					[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]		
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																			
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																			
14	55.12	8,000	1800	4,4	23,9	0,434	1,37	0,607	1,000	33,9	54,42	1,10E-05	19,241	1,0000	8,2	43	46	0,85	2,84E+03
15	58,05	8,000	1800	4,4	23,9	0,412	1,43	0,616	1,000	31,3	51,68	1,10E-05	18,271	1,0000	8,2	40	46	0,79	5,42E+03
16	60,93	8,000	1800	4,4	23,9	0,393	1,49	0,624	1,000	29,0	49,24	1,10E-05	17,407	1,0000	8,3	38	46	0,75	1,05E+04
17	63,77	8,000	1800	4,4	23,9	0,375	1,54	0,631	1,000	26,9	47,05	1,10E-05	16,634	1,0000	8,3	36	46	0,70	2,05E+04
18	66,56	8,000	1800	4,4	23,9	0,360	1,59	0,638	1,000	25,1	45,07	1,10E-05	15,936	1,0000	8,3	34	46	0,67	4,02E+04
19	69,31	8,000	1800	4,4	23,9	0,345	1,64	0,644	1,000	23,4	43,28	1,10E-05	15,302	1,0000	8,3	32	46	0,63	7,96E+04
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																			
11	46,00	4,000	900	4,4	16,9	0,368	1,56	0,634	1,000	32,8	65,21	1,10E-05	23,056	1,0000	8,3	42	46	0,82	3,71E+03
12	49,11	4,000	900	4,4	16,9	0,345	1,64	0,644	1,000	29,4	61,09	1,10E-05	21,599	1,0000	8,3	38	46	0,75	9,28E+03
13	52,14	4,000	900	4,4	16,9	0,325	1,72	0,652	1,000	26,5	57,53	1,10E-05	20,341	1,0000	8,2	35	46	0,70	2,36E+04
14	55,12	4,000	900	4,4	16,9	0,307	1,78	0,660	1,000	24,0	54,42	1,10E-05	19,241	1,0000	8,2	33	46	0,65	6,10E+04
15	58,05	4,000	900	4,4	16,9	0,292	1,85	0,667	1,000	21,9	51,68	1,10E-05	18,271	1,0000	8,2	31	46	0,60	1,59E+05
16	60,93	4,000	900	4,4	16,9	0,278	1,91	0,673	1,000	20,0	49,24	1,10E-05	17,407	1,0000	8,3	29	46	0,57	4,14E+05

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R_{E28} = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 3000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

Tabla 6.8- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks, para caso de carga interior.

h [cm]	l [cm]	P [kgf]	Área [cm ²]	presión [kg/cm ²]	a [cm]	a/l	oh ² /P	σ _w [kg/cm ²]	L/l	α	λ	C	σ _a [kg/cm ²]	σ _r [kg/cm ²]	R28 esp [kg/cm ²]	σ _r /R28	Número de Repeticiones	
Análisis sin Barras de Traspaso de Carga																		
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																		
14	55.12	8,000	1800	4.4	23.9	0.434	0.81	32.9	54.4	1.10E-05	19.241	1.0000	9.7	43.2	46	0.85	2.56E+03	
15	58.05	8,000	1800	4.4	23.9	0.412	0.83	29.6	51.7	1.10E-05	18.271	1.0000	9.7	40	46	0.79	5.70E+03	
16	60.93	8,000	1800	4.4	23.9	0.393	0.86	26.9	49.2	1.10E-05	17.407	1.0000	9.7	37	46	0.73	1.28E+04	
17	63.77	8,000	1800	4.4	23.9	0.375	0.88	24.5	47.0	1.10E-05	16.634	1.0000	9.7	35	46	0.69	2.90E+04	
18	66.56	8,000	1800	4.4	23.9	0.360	0.91	22.4	45.1	1.10E-05	15.936	1.0000	9.7	33	46	0.64	6.56E+04	
19	69.31	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	0.93	20.6	43.3	1.10E-05	15.302	1.0000	9.7	31	46	0.61	1.48E+05	
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																		
10	42.83	4,000	900	4.4	16.9	0.395	0.86	34.3	70.0	1.10E-05	24.764	1.0000	9.7	44.6	46	0.88	1.91E+03	
11	46.00	4,000	900	4.4	16.9	0.368	0.89	29.6	65.2	1.10E-05	23.056	1.0000	9.7	40	46	0.79	5.82E+03	
12	49.11	4,000	900	4.4	16.9	0.345	0.93	25.8	61.1	1.10E-05	21.599	1.0000	9.7	36	46	0.71	1.80E+04	
13	52.14	4,000	900	4.4	16.9	0.325	0.96	22.8	57.5	1.10E-05	20.341	1.0000	9.7	33	46	0.65	5.61E+04	
14	55.12	4,000	900	4.4	16.9	0.307	0.99	20.2	54.4	1.10E-05	19.241	1.0000	9.7	30	46	0.60	1.75E+05	
15	58.05	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.02	18.1	51.7	1.10E-05	18.271	1.0000	9.7	28	46	0.56	5.39E+05	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_r = Tensión combinada (carga + alabeo), R₂₈ = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 3000 cm, k = 7.6 kgf/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.3.2 Diseño para el caso de montacargas

En el diseño se considera una longitud de losa de 3000 cm. Este diseño se analiza tanto para el caso de carga de borde y carga interior. En el caso para carga de borde se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, que para el cálculo de f_{berma} se asume un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3). En el caso para carga interior el análisis es sin barras de traspaso de carga.

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.9 y 6.10.

Tabla 6-9- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas, para caso de carga de borde.

h [cm]	l [cm]	P [kgf]	Área [cm ²]	presión [kg/cm2]	a [cm]	a/l	oh ² P	fuerza	fl	σ _w [kgf/cm ²]	L/l	α	λ	C	σ _a [kgf/cm ²]	σ _r [kgf/cm ²]	R28 esp [kgf/cm ²]	σ _r /R28	Número de Repeticiones
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																			
Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																			
8	36.23	696	13.4	51.9	2.1	0.057	4.00	0.776	1.000	33.7	82.80	1.10E-05	29.276	1.0000	8.25	43	46	0.84	2.96E+03
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.778	1.000	27.5	75.80	1.10E-05	26.800	1.0000	8.25	36	46	0.72	1.65E+04
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.780	1.000	23.0	70.04	1.10E-05	24.764	1.0000	8.25	32	46	0.63	9.67E+04
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.782	1.000	19.5	65.21	1.10E-05	23.056	1.0000	8.25	28	46	0.56	5.82E+05
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.783	1.000	16.7	61.09	1.10E-05	21.599	1.0000	8.25	25	46	0.50	3.51E+06
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																			
14	55.12	1,976	18.3	107.9	2.4	0.044	4.36	0.783	1.000	34.4	54.42	1.10E-05	19.241	1.0000	8.25	43	46	0.85	2.55E+03
15	58.05	1,976	18.3	107.9	2.4	0.042	4.43	0.784	1.000	30.5	51.68	1.10E-05	18.271	1.0000	8.25	39	46	0.78	6.75E+03
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.785	1.000	27.2	49.24	1.10E-05	17.407	1.0000	8.25	36	46	0.71	1.83E+04
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.785	1.000	24.5	47.05	1.10E-05	16.634	1.0000	8.25	33	46	0.66	5.05E+04
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.786	1.000	22.1	45.07	1.10E-05	15.936	1.0000	8.25	31	46	0.61	1.41E+05

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_r = Tensión combinada (carga + alabeo), R₂₈ = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 3000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

Tabla 6.10- Analisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas, para caso de carga interior.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	ch ² /P	σ_w	L/I	α	λ	C	σ_a	σ_T	RE28 esp	σ_T / RE28	Número de Repeticiones	
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm2]	[cm]			[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]			
Análisis sin Barras de Traspaso de Carga																		
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																		
6	29.20	696	13.4	51.9	2.1	0.071	1.79	34.7	102.7	1.10E-05	36.325	1.0000	9.7	45.0	46	0.89	1.76E+03	
7	32.78	696	13.4	51.9	2.1	0.063	1.86	26.4	91.5	1.10E-05	32.359	1.0000	9.7	37	46	0.72	1.50E+04	
8	36.23	696	13.4	51.9	2.1	0.057	1.91	20.8	82.8	1.10E-05	29.276	1.0000	9.7	31	46	0.61	1.34E+05	
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	1.96	16.8	75.8	1.10E-05	26.800	1.0000	9.7	27	46	0.53	1.18E+06	
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	2.00	13.9	70.0	1.10E-05	24.764	1.0000	9.7	24	46	0.47	9.79E+06	
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	2.04	11.7	65.2	1.10E-05	23.056	1.0000	9.7	22	46	0.43	7.45E+07	
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																		
11	46.00	1,976	18.3	107.9	2.4	0.052	1.96	32.0	65.2	1.10E-05	23.056	1.0000	9.7	42.3	46	0.84	3.19E+03	
12	49.11	1,976	18.3	107.9	2.4	0.049	1.99	27.3	61.1	1.10E-05	21.599	1.0000	9.7	38	46	0.74	1.10E+04	
13	52.14	1,976	18.3	107.9	2.4	0.046	2.03	23.7	57.5	1.10E-05	20.341	1.0000	9.7	34	46	0.67	3.89E+04	
14	55.12	1,976	18.3	107.9	2.4	0.044	2.06	20.7	54.4	1.10E-05	19.241	1.0000	9.7	31	46	0.61	1.38E+05	
15	58.05	1,976	18.3	107.9	2.4	0.042	2.08	18.3	51.7	1.10E-05	18.271	1.0000	9.7	28	46	0.56	4.85E+05	
16	60.93	1,976	18.3	108.0	2.4	0.040	2.11	16.3	49.2	1.10E-05	17.407	1.0000	9.7	26	46	0.52	1.69E+06	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), RE28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 3000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

Tanto para el caso de carga de borde y carga interior, la condición de carga crítica queda dada por los racks, dos placas en el borde de la junta (condición 1) con carga máxima y con un análisis sin barras de traspaso de carga, resultando para este diseño de pavimento un espesor de losa de 14 cm.

6.2.3.3 Cálculo de armadura

Es deseable que la losa contenga una cuantía mínima de armadura del 0.15% de la sección. Además, la armadura no debe exceder una cuantía del 0.6%, ya que con dicha cuantía de armadura las deformaciones de expansión y retracción se igualan.

En el cálculo de enfierradura se considera el espesor más desfavorable que es de 14 cm (h= 5.5 pulgadas).

Para el cálculo de armadura se asume una expansión del prisma de 0.05% (ASTM C878/ C878M), por ende según la Figura 5.7 la cuantía es de 0.0182%.

Se asume que $b = 1 \text{ ft} = 12 \text{ pulgadas}$

Entonces

$$A_s = \rho * b * d = \frac{0.182 * 12 * 5.5}{100} = 0.12012$$

$$\text{Para } \rho = 0.182 \quad A_s = 0.12012 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}} = 2.58 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{\text{barra}} = \frac{2.58}{3} = 0.86$$

$$\frac{\pi * d^2}{4} = 0.86$$

$$d = \sqrt{\frac{0.86 * 4}{\pi}} = 1.05 \text{ cm} = 10.5 \text{ mm}$$

Entonces la armadura es de $3\Phi 12 @ 40$

Para el cálculo de tensión en la armadura, se considera para el módulo de elasticidad del acero un valor de 29000000 psi y según como se indica en la Figura 5.7 se considera una expansión de losa de 0.0454 % (0.000454).

$$\sigma = \epsilon_{exp} * E_s = 0.000454 * 29000000 = 13166 \text{ psi}$$

Para el cálculo de fricción losa-subbase se asume que $\gamma = 150 \text{ pcf}$; $\mu = 0.3$

Entonces

$$F = \mu * N$$

$$N = \gamma * h * \frac{L}{2} * ancho = 150 * \frac{5.5}{12} * \frac{100}{2} * 1 = 3437.5$$

$$F = \mu * N = 0.3 * 3437.5 = 1031.25 \text{ lb/ft}$$

Debido a que la fricción varía a lo largo de la losa, se utiliza la fuerza promedio:

$$\frac{1031.25 \text{ lb/ft}}{2} = 515.625 \text{ lb/ft}$$

El área de armadura equivalente es:

$$\frac{515.625 \text{ lb/ft}}{13166 \text{ psi}} = 0.0392 \text{ in}^2/\text{ft}$$

La cuantía de armadura en porcentaje es:

$$\rho_{eq} = \frac{0.12012 \text{ in}^2/\text{ft} + 0.0392 \text{ in}^2/\text{ft}}{5.5 \text{ in} * 12 \text{ in}/\text{ft}} * 100 = 0.241\%$$

De la Figura 5.7, la expansión de la losa con restricción por la sub-base es $\epsilon_{exp_equ} = 0.0413$ o 0.000413 in/in .

De la Figura 5.7, la retracción de la losa con restricción de la sub-base es $\epsilon_{sh_equ} = 0.03\%$ o 0.0003 in/in .

La fuerza de la armadura después que se ha producido la retracción es:

$$A_s(\epsilon_{exp_equ} - \epsilon_{sh_equ})E_s = 0.12012 \text{ in}^2/\text{ft}(0.000413 \text{ in/in} - 0.0003 \text{ in/in}) * 29000000 = 394 \text{ lb/ft}$$

$$A_s(\epsilon_{exp_equ} - \epsilon_{sh_equ})E_s = 5.96 \text{ kg/cm}$$

6.2.4 Pavimento de hormigón con fibras

6.2.4.1 Diseño para el caso de estanterías

En el diseño se considera una longitud de losa de 1000 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, en el cual se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, en donde el cálculo de f_{berma} se asume con un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11 - Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de racks.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	σ^2/P	f_{cmax}	fL	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_a	σ_T	R28 esp	$\sigma_T/R28$	Número de Repeticiones
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm2]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]		
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																			
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																			
14	55.12	8,000	1800	4,4	23,9	0,434	1,37	0,607	1,000	33,9	18,14	1,10E-05	6,414	0,9963	8,2	43	46	0,84	2,86E+03
15	58,05	8,000	1800	4,4	23,9	0,412	1,43	0,616	1,000	31,3	17,23	1,10E-05	6,090	0,9964	8,2	40	46	0,79	5,46E+03
16	60,93	8,000	1800	4,4	23,9	0,393	1,49	0,624	1,000	29,0	16,41	1,10E-05	5,802	0,9974	8,2	38	46	0,75	1,05E+04
17	63,77	8,000	1800	4,4	23,9	0,375	1,54	0,631	1,000	26,9	15,68	1,10E-05	5,545	0,9995	8,2	36	46	0,70	2,05E+04
18	66,56	8,000	1800	4,4	23,9	0,360	1,59	0,638	1,000	25,1	15,02	1,10E-05	5,312	1,0026	8,3	34	46	0,67	3,99E+04
19	69,31	8,000	1800	4,4	23,9	0,345	1,64	0,644	1,000	23,4	14,43	1,10E-05	5,101	1,0067	8,3	32	46	0,64	7,77E+04
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																			
11	46,00	4,000	900	4,4	16,9	0,368	1,56	0,634	1,000	32,8	21,74	1,10E-05	7,685	0,9989	8,2	42	46	0,82	3,71E+03
12	49,11	4,000	900	4,4	16,9	0,345	1,64	0,644	1,000	29,4	20,36	1,10E-05	7,200	0,9979	8,2	38	46	0,75	9,33E+03
13	52,14	4,000	900	4,4	16,9	0,325	1,72	0,652	1,000	26,5	19,18	1,10E-05	6,780	0,9969	8,2	35	46	0,70	2,38E+04
14	55,12	4,000	900	4,4	16,9	0,307	1,78	0,660	1,000	24,0	18,14	1,10E-05	6,414	0,9963	8,2	33	46	0,65	6,17E+04
15	58,05	4,000	900	4,4	16,9	0,292	1,85	0,667	1,000	21,9	17,23	1,10E-05	6,090	0,9964	8,2	31	46	0,60	1,61E+05
16	60,93	4,000	900	4,4	16,9	0,278	1,91	0,673	1,000	20,0	16,41	1,10E-05	5,802	0,9974	8,2	29	46	0,57	4,19E+05

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R₂₈ = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 1000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.4.2 Diseño para el caso de montacargas

En el diseño se considera una longitud de losa de 1000 cm. Este diseño se analiza para el caso de carga de borde, en el cual se realiza un análisis con barras de traspaso de carga, en donde el cálculo de f berma se asume con un valor de 18 para AGG/KI, esto quiere decir que existe un 80% de transferencia de carga (ver figura 4.3).

El análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12- Análisis de tensiones para las distintas condiciones de carga de montacargas.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	σ^2/P	f_{forma}	fl.	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_a	σ_T	R/28 esp	$\sigma_T/R/28$	Número de Repeticiones
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm ²]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]		
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																			
Montacargas: Rueda estabilizadora, brazo retraído																			
8	36.23	696	13.4	51.9	2.1	0.057	4.00	0.776	1.000	33.7	27.60	1.10E-05	9.759	1.0001	8.25	43	46	0.84	2.96E+03
9	39.58	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.778	1.000	27.5	25.27	1.10E-05	8.933	1.0001	8.25	36	46	0.72	1.65E+04
10	42.83	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.780	1.000	23.0	23.35	1.10E-05	8.255	0.9997	8.25	32	46	0.63	9.68E+04
11	46.00	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.782	1.000	19.5	21.74	1.10E-05	7.685	0.9989	8.24	28	46	0.56	5.85E+05
12	49.11	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.783	1.000	16.7	20.36	1.10E-05	7.200	0.9979	8.23	25	46	0.50	3.56E+06
Montacargas: Rueda de Carga, brazo extendido																			
14	55.12	1,976	18.3	107.9	2.4	0.044	4.36	0.783	1.000	34.4	18.14	1.10E-05	6.414	0.9963	8.22	43	46	0.85	2.57E+03
15	58.05	1,976	18.3	107.9	2.4	0.042	4.43	0.784	1.000	30.5	17.23	1.10E-05	6.090	0.9964	8.22	39	46	0.78	6.81E+03
16	60.93	1,976	18.3	107.9	2.4	0.040	4.50	0.785	1.000	27.2	16.41	1.10E-05	5.802	0.9974	8.23	36	46	0.71	1.84E+04
17	63.77	1,976	18.3	107.9	2.4	0.038	4.56	0.785	1.000	24.5	15.68	1.10E-05	5.545	0.9995	8.25	33	46	0.66	5.05E+04
18	66.56	1,976	18.3	107.9	2.4	0.036	4.62	0.786	1.000	22.1	15.02	1.10E-05	5.312	1.0026	8.27	31	46	0.61	1.39E+05

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R/28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 1000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

La condición de carga crítica queda dada por los racks, dos placas en el borde de la junta (condición1) con carga máxima y con un análisis sin barras de traspaso de carga, resultando para este diseño de pavimento un espesor de losa de 14 cm.

6.2.4.3 Cálculo del factor residual para el caso de racks.

Debido a que la formación de rótulas plásticas depende de la tenacidad, la resistencia residual mínima Re_3 debe ser mayor que 50%.

Se determina el factor de resistencia residual utilizando los siguientes parámetros:

Propiedades del hormigón:

-Resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón (f_c'): 275 Kgf/cm²

-Módulo de rotura del hormigón (f_r): 37.9 Kgf/cm²

El factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13- Factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga de racks.

h	l	s	P	Área	presión	a	a/l	ct ² /P	f _{forma}	f _L	σ _w	L/l	α	λ	C	σ _a	σ _τ	Ma	Mp+Mm	Re3	
[cm]	[cm]	[cm ² /cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm ²]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[K-g-cm]	[K-g-cm]		
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																					
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																					
14	55.12	32.67	8,000	1800	4.4	23.9	0.434	1.37	0.607	1.000	33.9	18.14	1.10E-05	6.414	0.9963	8.2	42.8	1397	1191	109.0	
15	58.05	37.50	8,000	1800	4.4	23.9	0.412	1.43	0.616	1.000	31.3	17.23	1.10E-05	6.090	0.9964	8.2	40.1	1504	1226	92.1	
16	60.93	42.67	8,000	1800	4.4	23.9	0.393	1.49	0.624	1.000	29.0	16.41	1.10E-05	5.802	0.9974	8.2	37.7	1611	1259	77.5	
17	63.77	48.17	8,000	1800	4.4	23.9	0.375	1.54	0.631	1.000	26.9	15.68	1.10E-05	5.545	0.9995	8.2	35.7	1718	1290	64.8	
18	66.56	54.00	8,000	1800	4.4	23.9	0.360	1.59	0.638	1.000	25.1	15.02	1.10E-05	5.312	1.0026	8.3	33.8	1826	1319	53.7	
19	69.31	60.17	8,000	1800	4.4	23.9	0.345	1.64	0.644	1.000	23.4	14.43	1.10E-05	5.101	1.0067	8.3	32.2	1935	1347	44.0	
Rack: Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																					
11	46.00	20.17	4,000	900	4.4	16.9	0.368	1.56	0.634	1.000	32.8	21.74	1.10E-05	7.685	0.9989	8.2	41.6	840	652	95.1	
12	49.11	24.00	4,000	900	4.4	16.9	0.345	1.64	0.644	1.000	29.4	20.36	1.10E-05	7.200	0.9979	8.2	38.2	916	674	74.8	
13	52.14	28.17	4,000	900	4.4	16.9	0.325	1.72	0.652	1.000	26.5	19.18	1.10E-05	6.780	0.9969	8.2	35.2	992	695	58.0	
14	55.12	32.67	4,000	900	4.4	16.9	0.307	1.78	0.660	1.000	24.0	18.14	1.10E-05	6.414	0.9963	8.2	32.7	1069	714	44.0	
15	58.05	37.50	4,000	900	4.4	16.9	0.292	1.85	0.667	1.000	21.9	17.23	1.10E-05	6.090	0.9964	8.2	30.6	1146	732	32.1	
16	60.93	42.67	4,000	900	4.4	16.9	0.278	1.91	0.673	1.000	20.0	16.41	1.10E-05	5.802	0.9974	8.2	28.7	1224	748	22.0	

Donde: h = espesor de losa, S= Módulo de sección de la losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_τ = Tensión combinada (carga + alabeo), R₂₈ = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón (f_c)= 275 kgf/cm², Módulo de rotura del hormigón (f_t)= 37.9 kgf/cm², Longitud de losa = 1000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.4.4 Cálculo del factor residual para el caso de montacargas

Debido a que la formación de rótulas plásticas depende de la tenacidad, la resistencia residual mínima R_{e3} debe ser mayor que 50%.

Se determina el factor de resistencia residual utilizando los siguientes parámetros:

Propiedades del hormigón:

-Resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón (f_c): 275 Kgf/cm²

-Módulo de rotura del hormigón (f_r): 37.9 Kgf/cm²

El factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga se muestra en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14- Factor de resistencia residual para las distintas condiciones de carga de montacargas.

h	l	S	P	Área	presión	a	a/l	σ^2/P	fórmula	FL	σ_w	L/l	α	λ	C	σ_h	σ^r	Ma	Mp+Mn	Re3	
[cm]	[cm]	[cm ² /cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm ²]	[cm]					[kg/cm ²]					[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[Kg-cm]	[Kg-cm]		
Análisis con Barras de Traspaso de Carga																					
Rack1s : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																					
8	36.23	10.67	696	13.4	51.9	2.1	0.057	4.00	0.776	1.000	33.7	27.60	1.10E-05	9.759	1.0001	8.3	42.60	454	204	62.81	
9	39.58	13.50	696	13.4	51.9	2.1	0.052	4.12	0.778	1.000	27.5	25.27	1.10E-05	8.933	1.0001	8.3	36.32	490	206	36.16	
10	42.83	16.67	696	13.4	51.9	2.1	0.048	4.23	0.780	1.000	23.0	23.35	1.10E-05	8.255	0.9997	8.2	31.66	528	208	16.55	
11	46.00	20.17	696	13.4	51.9	2.1	0.045	4.32	0.782	1.000	19.5	21.74	1.10E-05	7.685	0.9989	8.2	28.11	567	210	1.673	
12	49.11	24.00	696	13.4	51.9	2.1	0.042	4.41	0.783	1.000	16.7	20.36	1.10E-05	7.200	0.9979	8.2	25.32	608	212	-9.897	
13	52.14	28.17	696	13.4	51.9	2.1	0.040	4.50	0.785	1.000	14.5	19.18	1.10E-05	6.780	0.9969	8.2	23.10	651	213	-19.08	
Rack2 : Una placa en el borde de la junta (Condición 2), con carga máxima																					
14	55.12	32.67	1,976	18.3	108.0	2.4	0.044	4.36	0.783	1.000	34.4	18.14	1.10E-05	6.414	0.9963	8.2	43.23	1412	599	62.44	
15	58.05	37.50	1,976	18.3	108.0	2.4	0.042	4.43	0.784	1.000	30.5	17.23	1.10E-05	6.090	0.9964	8.2	39.28	1473	602	46.02	
16	60.93	42.67	1,976	18.3	108.0	2.4	0.040	4.50	0.785	1.000	27.2	16.41	1.10E-05	5.802	0.9974	8.2	35.98	1535	606	32.39	
17	63.77	48.17	1,976	18.3	108.0	2.4	0.038	4.56	0.786	1.000	24.5	15.68	1.10E-05	5.545	0.9995	8.2	33.22	1600	608	20.97	
18	66.56	54.00	1,976	18.3	108.0	2.4	0.036	4.62	0.786	1.000	22.1	15.02	1.10E-05	5.312	1.0026	8.3	30.87	1667	611	11.31	
19	69.31	60.17	1,976	18.3	108.0	2.4	0.035	4.67	0.787	1.000	20.1	14.43	1.10E-05	5.101	1.0067	8.3	28.86	1737	613	3.059	

Donde: h = espesor de losa, S= Módulo de sección de la losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_r = Tensión combinada (carga + alabeo), R_{t28} = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón (f_c)= 275 kgf/cm², Módulo de rotura del hormigón (f_r)= 37.9 kgf/cm², Longitud de losa = 1000 cm, k = 7.6 kgf/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

6.2.5 Pavimento de hormigón postensados

En el análisis se considera solo el diseño para el caso de racks, ya que es la condición más desfavorable.

6.2.5.1 Diseño para el caso de estanterías

Este diseño se analiza para el caso de carga de interior. En el diseño se considera una longitud de losa de 5000 cm y un piso de hormigón de 50x50m.

A su vez se considera que las pérdidas por creep, retracción del hormigón, relajación de los tendones, pérdida en anclajes equivale a un 20% de la tensión de tensado requerida.

Se analiza solo con la carga de 8000 kgf excluyendo la de 4000 kgf, ya que es la situación más desfavorable en el análisis de tensiones.

El análisis de tensiones de racks se muestra en la Tabla 6.15, 6.16 y 6.17.

Tabla 6.15- Análisis de tensiones de racks.

h	l	P	Área	presión	a	a/l	oh ² /P	σ _w	L/l	α	λ	C	σ _a	σ _T	R128 esp	σ _T /R128	Número de Repeticiones	
[cm]	[cm]	[kgf]	[cm ²]	[kg/cm2]	[cm]			[kgf/cm ²]					[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]			
Análisis sin Barras de Traspaso de Carga																		
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición 1), con carga máxima																		
12	49.11	8,000	403.28	19.8	11.3	0.231	1.15	63.7	101.8	1.10E-05	35.999	1.0000	9.7	74.4	46	1.47	5.70E+01	
13	52.14	8,000	403.28	19.8	11.3	0.217	1.18	55.8	95.9	1.10E-05	33.901	1.0000	9.7	66	46	1.31	1.04E+02	
14	55.12	8,000	403.28	19.8	11.3	0.206	1.21	49.4	90.7	1.10E-05	32.068	1.0000	9.7	60	46	1.18	1.94E+02	
15	58.05	8,000	403.28	19.8	11.3	0.195	1.24	44.0	86.1	1.10E-05	30.451	1.0000	9.7	54	46	1.08	3.72E+02	
16	60.93	8,000	403.28	19.8	11.3	0.186	1.26	39.5	82.1	1.10E-05	29.012	1.0000	9.7	50	46	0.99	7.25E+02	
17	63.77	8,000	403.28	19.8	11.3	0.178	1.29	35.7	78.4	1.10E-05	27.723	1.0000	9.7	46	46	0.91	1.43E+03	

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R128 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 5000 cm, k = 7.6 kgf/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

Tabla 6.16- Análisis de tensiones de racks.

h	Pretensado Efectivo Requerido	Pretensado Efectivo Requerido	Tensado requerido por cm ancho Longitudinal	Tensado requerido por cm ancho Transversal	Coefficiente Fricción	Fuerza de Fricción	Fuerza de Fricción	Tensado Final Requerido Longitudinal	Tensado Final Requerido Transversal	Fuerza Longitudinal	Fuerza Transversal
[cm]	[kgf/cm ²]	[psi]	[Kg/cm]	[Kg/cm]		[kgf/cm ²]	[Kg/cm]	[Kg/cm]	[Kg/cm]	[Kg]	[Kg]
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición I), con carga máxima											
12	35.3	502.3	261.0	146.3	0.5	2.9	34.6	295.7	180.9	1478276	904473
13	27.4	388.8	225.6	129.2	0.5	2.9	37.5	263.1	166.7	1315390	833395
14	20.8	295.8	189.8	110.9	0.5	2.9	40.4	230.2	151.3	1150901	756391
15	15.4	218.6	153.8	91.6	0.5	2.9	43.3	197.1	134.9	985606	674279
16	10.8	153.7	117.8	71.4	0.5	2.9	46.2	164.0	117.5	820063	587728
17	6.9	98.6	81.9	50.4	0.5	2.9	49.1	130.9	99.5	654658	497293

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_T = Tensión combinada (carga + alabeo), R28 = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 5000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

Tabla 6.17- Análisis de tensiones de racks.

h	Arequero		Espaciamiento Tendones	Nº Tendones	Área		Diámetro		Diámetro	
	Longitudinal	Transversal			Tendón Long	Tendón Transv	Tendón Long	Tendón Transv	Tendón Long	Tendón Transv
[cm]			[cm]		[cm ²]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Racks : Dos placas en el borde de la junta (Condición I), con carga máxima										
12	98	60	48	104	0.94	0.57	10.92	8.54	11.00	9.00
13	87	55	52	96	0.90	0.57	10.72	8.53	11.00	9.00
14	76	50	56	89	0.85	0.56	10.41	8.44	11.00	9.00
15	65	45	60	83	0.78	0.53	9.97	8.25	10.00	9.00
16	54	39	64	78	0.69	0.50	9.39	7.95	10.00	8.00
17	43	33	68	74	0.59	0.45	8.65	7.54	9.00	8.00

Donde: h = espesor de losa, P = carga, Área = área de aplicación de la carga, a = radio equivalente del área de carga, σ_w = Tensión debida a la carga, σ_a = Tensión debida al alabeo térmico, σ_r = Tensión combinada (carga + alabeo), R_{t28} = Resistencia a la flexotracción especificada a los 28 días. Constantes utilizadas en el cálculo: Módulo de elasticidad= 300000 kgf/cm², Coeficiente de poisson= 0.15, Longitud de losa = 5000 cm, k = 7.6 kg/cm²/cm, Diferencial Térmico = 5°C.

La condición de carga crítica queda dada por los racks, dos placas en el borde de la junta (condición1) con carga máxima y con un análisis sin barras de traspaso de carga, resultando para este diseño de pavimento un espesor de losa de 14 cm.

7. Evaluación económica de cada tipo de pavimento

En el análisis de precios unitarios se consideran sólo los costos directos, por lo que se excluyen los costos generales y las utilidades en cada tipo de pavimento.

El análisis de precio unitario en cada tipo de pavimento se confecciona considerando los costos por materiales, equipos y maquinarias y mano de obra. Los costos se consideran sin IVA incluido.

En el análisis de precio unitario de pavimentos simples con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga, pavimentos reforzados y pavimentos con fibras se consideran los costos por la realización de juntas. En estos tipos de pavimentos se requiere mantenimiento de juntas (reposiciones de sello).

En pavimentos de hormigón de retracción compensada en el análisis de precio unitario se consideran los costos por la colocación de cantonera y barras de traspaso de carga. En este tipo de pavimento se necesita poco mantenimiento.

En pavimentos de hormigón postensados se requiere reparaciones de mayor complejidad y costo.

7.1 Pavimento de hormigón simple con juntas con/sin dispositivos de traspaso de carga

Tabla 7.1- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón simple con juntas c/s dispositivos de traspaso de carga.

Materiales	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Hormigón	m ²	1	7791	7,791
Combustible	m ²	1	9	9
Disco	m ²	1	119	119
Membrana de curado	m ²	1	330	330
Sello juntas	m ²	1	96	96
Barras traspaso carga	m ²	1	6425	6,425
Placas metálicas 30x30	m ²	1	5500	5,500
			Subtotal	20,269

Equipos y maquinarias	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Cortadora	m ²	1	6	6
Tren pavimentador	m ²	1	577	577
			Subtotal	583

Mano de obra	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Operador de cortadora	m ²	1	53	53
Jornal	m ²	1	31	31
Maestro carpintero	m ²	1	20	20
Maestro concretero	m ²	1	20	20
Operador tren pavimentador	m ²	1	32	32
			Subtotal	156

Total, \$/m2	21,008
--------------	--------

7.2 Pavimento de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas

Tabla 7.2- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón reforzado para el control de ancho de grietas.

Materiales	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Hormigón	m ²	1	8223	8,223
Combustible	m ²	1	2	2
Disco	m ²	1	29	29
Membrana de curado	m ²	1	330	330
Sello juntas	m ²	1	24	24
Barras Traspaso Carga	m ²	1	1600	1,600
Placas metálicas 30x30	m ²	1	5500	5,500
			Subtotal	15,708

Equipos y maquinarias	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Cortadora	m ²	1	2	2
Tren pavimentador	m ²	1	604	604
			Subtotal	606

Mano de obra	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Operador de cortadora	m ²	1	13	13
Jornal	m ²	1	1437	1,437
Maestro carpintero	m ²	1	20	20
Maestro concretero	m ²	1	20	20
Operador tren pavimentador	m ²	1	32	32
			Subtotal	1,522

Total, \$/m ²	17,836
--------------------------	--------

7.3 Pavimento de hormigón de retracción compensada

Tabla 7.3- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón de retracción compensada.

Materiales	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Hormigón	m ²	1	6059	6,059
Cantonera	m ²	1	3080	3,080
Membrana de curado	m ²	1	330	330
Barras traspaso carga	m ²	1	750	750
Placas metálicas 30x30	m ²	1	5500	5,500
			Subtotal	15,719

Equipos y maquinarias	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Tren pavimentador	m ²	1	444	444
			Subtotal	444

Mano de obra	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Jornal	m ²	1	500	500
Maestro carpintero	m ²	1	20	20
Maestro concretero	m ²	1	20	20
Operador tren pavimentador	m ²	1	32	32
			Subtotal	572

Total, \$/m ²	16,735
--------------------------	--------

7.4 Pavimento de hormigón con fibras

Tabla 7.4- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón con fibras.

Materiales	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Hormigón	m ²	1	6059	6,059
Combustible	m ²	1	3	3
Disco	m ²	1	44	44
Membrana de curado	m ²	1	330	330
Sello juntas	m ²	1	36	36
Barras Traspaso Carga	m ²	1	2370	2,370
Placas metálicas 30x30	m ²	1	5500	5,500
Fibras	m ²	1	14050	14,050
			Subtotal	28,392

Equipos y maquinarias	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Cortadora	m ²	1	2	2
Tren pavimentador	m ²	1	444	444
			Subtotal	446

Mano de obra	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Operador de cortadora	m ²	1	19	19
Jornal	m ²	1	31	31
Maestro carpintero	m ²	1	20	20
Maestro concretero	m ²	1	20	20
Operador tren pavimentador	m ²	1	32	32
			Subtotal	122

Total, \$/m2	28,961
--------------	--------

7.5 Pavimento de hormigón posttensado

Tabla 7.5- Análisis de precio unitario de pavimento de hormigón posttensado.

Materiales	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Hormigón	m ²	1	6059	6059
Membrana de curado	m ²	1	330	330
Placas metálicas 14,2x14,2	m ²	1	1242	1,242
Postensado	m ²	1	12023	12023
			Subtotal	19654

Equipos y maquinarias	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Tren pavimentador	m ²	1	381	381
			Subtotal	381

Mano de obra	Ud	Cantidad	P.Unitario	Total
			(\$)	(\$)
Jomal	m ²	1	31	31
Maestro carpintero	m ²	1	20	20
Maestro concretero	m ²	1	20	20
Operador tren pavimentador	m ²	1	32	32
			Subtotal	103

Total, \$/m2	20,138
--------------	--------

7.6 Resumen de precios unitarios de los distintos tipos de pavimentos

Tabla 7.6- Resumen de precios unitarios de los distintos tipos de pavimentos.

Tipo de pavimento	PU
	\$/m2
Pavimento hormigón Simple con BTC	21,008
Pavimento reforzado	17,836
Pavimento HRC	16,735
Pavimento fibras	28,961
Pavimento postensado	20,138

8. Comentarios

Este estudio surge ante una necesidad del medio debido a que no se dispone de una herramienta de tipo práctico para el diseño de pavimentos o pisos industriales de hormigón. Además, no es sólo los procedimientos de diseño, sino que también respecto de los distintos tipos de pavimentos de hormigón que existen en el mercado. En efecto, la práctica habitual es considerar como solución de pisos industriales un pavimento de hormigón convencional, los que muchas veces se diseñan asimilándolo a un pavimento vial. Por lo anterior, en este estudio, se han abordado el análisis y diseño de los siguientes tipos de pavimentos de hormigón:

- ❖ Pavimentos de hormigón simple con juntas.
- ❖ Pavimentos de hormigón reforzados para el control de ancho de grietas.
- ❖ Pavimentos de hormigón con fibras.
- ❖ Pavimentos de hormigón de retracción compensada.
- ❖ Pavimentos de hormigón postensados.

Los pisos de hormigón, industriales, comerciales o de tránsito ligero, deben ser diseñados y construidos sin olvidar los aspectos económicos a los que se encuentran ligados. La construcción de un buen piso de hormigón requiere de una comunicación estrecha entre el propietario, arquitecto, ingeniero y contratista, con un mutuo entendimiento del nivel de calidad necesaria para el proyecto en particular.

Para lo anterior, se ha efectuado una profunda revisión bibliográfica sobre el tema detallando las distintas etapas involucradas en un diseño de un piso industrial. Se incluye la caracterización de las solicitaciones (cargas), entre las que destacan cargas de tránsito al interior de las bodegas, normalmente generadas por montacargas y/o grúas horquilla, cargas a piso de pallets y cargas de estanterías o racks. También, y considerando que el diseño de un piso de hormigón se basa fundamentalmente en que las tensiones de trabajo inducidas en el pavimento de hormigón no deben sobrepasar la capacidad resistente de la losa, se incluye un análisis tensional de la losa, el que se basa en las ecuaciones de Westergaard.

Debido a que los esfuerzos inducidos en el pavimento depende de las solicitaciones de carga por un lado y de las condiciones de borde de la losa por otro, se incluye las diferentes condiciones de carga en una losa y que corresponde a las cargas de borde de losa, esquina e interior. Con ello, y aplicando factores de seguridad y/o aplicando leyes de fatiga según corresponda, se obtiene el espesor de la losa para las diferentes solicitaciones de carga a que la losa se encuentra sometida.

En este trabajo de título se ha incluido las metodologías de diseño incorporadas en el método de la ACI a fin de disponer de un elemento de diseño adicional y sintetizado en un documento.

Lo anterior, sienta las bases para el diseño de pavimentos industriales, la que se ha aplicado a un caso típico del diseño de un pavimento de un piso industrial, para el cual se han obtenido de un lugar de la zona poniente de Santiago, las características geotécnicas del suelo de fundación y se han supuesto ciertas condiciones de carga, para lo cual se ha efectuado el diseño del piso industrial.

9. Análisis de resultados y conclusiones

Del diseño de los distintos pavimentos industriales se puede deducir que los casos de pavimento de hormigón de retracción compensada y pavimento de hormigón con fibras son los más adecuados a utilizar en una bodega industrial, ya que el espesor de ambos es de 14 cm, esto se debe a que en el diseño se utilizan placas de apoyo de 30x30, al utilizar estas placas de mayor dimensión que las de 14.2x14.2 la presión de contacto es menor y por ende las tensiones son menores y resulta un espesor menor. A su vez en el diseño también se considera como opción a utilizar un pavimento de hormigón postensado, ya que al igual que los pavimentos anteriores resulta un espesor de 14 cm, pero con placas de 14.2x14.2, esto quiere decir que la presión de contacto es mayor y por ende las tensiones son mayores y el espesor mayor; la explicación por la cual se utilizó en el pavimento de hormigón postensado placas de menor dimensión, es porque no puede existir un espesor de losa tan pequeño.

De los diseños obtenidos y efectuado un análisis de precios unitarios de los costos directos del valor por metro cuadrado del piso de hormigón, se ha determinado que la solución más económica resulta el pavimento de hormigón de retracción compensada. Del análisis efectuado, se obtiene que el pavimento de hormigón postensado presenta un costo superior al de retracción compensada, pero resulta competitivo con los demás tipos de pavimentos. Ello es particularmente interesante ya que por las técnicas constructivas que hoy existen, con este tipo de pavimento es posible obtener pisos con mayor planicidad y de interés para bodegas donde el sistema de almacenamiento de carga se haga a gran altura y que desviaciones menores en el piso pueda incluso significar la inestabilidad de los equipos de levante.

Por último y dadas las características de la información y antecedentes incluidos en este trabajo, servirá de gran ayuda a quienes estén interesados en el diseño de pavimentos de hormigón y especialmente en el diseño de pavimentos industriales de hormigón.

10. Referencia bibliográfica

ACI 302.1R-04, "Guide for Concrete Floor and Slab Construction " 2010.

ACI 360R-10 "Guide to Design of Slabs-on-Ground", ACI, Abril 2010.

Miner, M.A., "Cumulative Damage in Fatigue," Transactions, Am. Soc. Of Mechanical Engr., Vol 67, 1945, pp. A159 – A164.

Timoshenko, S., and Woinowsky – Krieger, S., "Theoty of Plates and Shells," Mc Graw – Hill Book Co., Inc., Second Edition, New York, 1959.

Westergaard, H.M., "Computation of Stresses in Concrete Roads," Highway Research Board Proceedings, Vol 6, 1926.

Ioannides, A.M., Thompson, M.R., and Barenberg, E.J., "Westergaard Solutions Reconsidered," Transportation Research Record N° 1043, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1985.

Cristian Alejandro Cabrera Torrico, "Calibración Del Modelo De Agrietamiento Para Pavimentos De Hormigón Simple Implementado En El Sistema GIMPh", Borrador memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, (1998).

ERES Consultants, INC; Techniques For Pavement Rehabilitation A Training Course Third Revisión, October 1987.

Cabello, Joaquín; "Análisis de Tensiones en Losas de Hormigón Sometidas al Efecto Combinado de Cargas de Tránsito y Alabeo por Temperatura", Borrador memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, (1995).

Portland Cement Association (PCA), "Concrete Floors on Ground," Engineering Bulletin EB075, third edition, Skokie, IL., 2001.

Ringo, B.C., "Consideration in Planning and Designing an Industrial Floor," Concrete Construction, Addison, IL., 1985.

S. Nagataki and H. Gomi, "Expansive admixtures (mainly ettringite)" Cement and Concrete Composites, v.20, 1998, pp. 163-170.

Meyerhof, G.G., "Load - Carrying Capacity of Concrete Pavements," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, pp. 89 – 117, June 1962.

11. Referencia bibliográfica complementaria

Ioannides, A.M., and Korovesis, G.T., "Aggregate Interlock: A Pure Shear Load Transfer Mechanism," Transportation Research Record N° 1286, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990.

Alani, A.M., Beckett, D., "Mechanical Properties of a large scale Synthetic Fiber Reinforced Concrete Ground Slab", Construction and Building Materials 41, 335 – 344, 2013.

ASTM C878-95a: "Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete", 1995.

ASTM C878/C878M – 09 Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete, 2009.

ASTM E1155, "Standard Test Method for Determining Floor Flatness and Levelness Using the F-Number System ", 2014.

ASTM C845: "Standard Specification for Expansive Hydraulic Cements", 2012.

ACI Report 223-90: "Standard Practice for the Use of Shrinkage- Compensating Concrete", 1990.

Barenberg, E.J., Design of Prestressed Pavements, University of Illinois at Urbana Champaign 1989.

Bekaert, Dramix, Guía Práctica para la Ejecución de Pavimentos de Hormigón con fibras de acero Dramix, 1999.

Cement & Concrete Association of New Zealand, "Concrete Ground Floors & Pavements for Commercial & Industrial Use", 1999.

Concrete Society Report TR34 Concrete Industrial Ground Floors, Fourth Edition 2013.

ICH, Hormigón al Día, Noviembre 2012 – N° 52.

Losberg, A "Structurally Reinforced Concrete Pavements, 1960.

Packard, R.G., "Slab Thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade," ISI95.01D, Portland Cement Association, Skokie, IL., 1976.

Post Tensioning Institute, Design and Construction of Post – Tensioned Slabs – on – Ground, 1996.

Salsilli, R.A., "Calibrated Mechanistic Design Procedure for Jointed Plain Concrete Pavements", PH.D.Thesis, Urbana, Illinois, 1991.

UFC 3-260-02 "Prestressed Concrete Pavement Design", Chapter 16, June 2001.

ACI 223R-10 "Guide for the Use of Shrinkage – Compensating Concrete", ACI, Diciembre 2012.

Anexo 1: Mecánica de suelos

DESCRIPCIÓN ESTRATIGRAFICA DE SUELOS	
---	--

		FECHA DE MUESTREO
Calicata	N° 62	<i>Tramo</i>
DM puntual		FOLIO :
Calzada	Zona existente	
Coordenadas		

Estrato	TIPO	Horizonte (Entre)	PROFUN. (MTS)	DESCRIPCION DE LOS MATERIALES	Clasificación AASHTO / USCS
1	SUELO VEGETAL	H-0 0,00-0,15	0.15	ESCARPE CAPA VEGETAL CON PRESENCIA DE RAICES	
2	ARCILLA LIMOSA	H-1 0,15-0,60	0.45	ARCILLA LIMOSA CONSISTENCIA MEDIA COLOR CAFÉ OSCURO HUMEDAD MEDIA A ALTA ESTRUCTURA HOMOGENEA PLASTICIDAD MEDIA A ALTA	CL
3	LIMO	H-2 0,60 AL 1,00	0.40	LIMO HUMEDAD MEDIA A ALTA ESTRUCTURA HOMOGENEA	ML

Observaciones:

- No hay presencia de napa freatica a cota de Excavación

DESCRIPCIÓN ESTRATIGRAFICA DE SUELOS	
---	--

		<i>FECHA DE MUESTREO</i>
<i>Calicata</i>	N°62 ,	<i>Tramo</i>
<i>DM Puntual</i>		FOLIO :
<i>Calzada</i>		
<i>Coordenadas</i>		

<i>Estrata n°</i>	<i>TIPO</i>	<i>Horizonte (Entre)</i>	<i>PROFUN. (MTS)</i>	<i>DESCRIPCION DE LOS MATERIALES</i>	<i>Clasificación AASHTO / USCS</i>
1	SUELO VEGETAL	H-0 0,00-0,30	0.30	ESCARPE CAPA VEGETAL CON PRESENCIA DE RAICES	



Observaciones:

- No hay presencia de napa freatica a cota de Excavación

CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE SUELO

1.- Antecedentes Generales

CERTIFICADO N° : 389

MATERIA : Pomacita Centro Distribución El Parque 1307

2.- Identificación de la Muestra

Dm Puntual	Acopio Provisorio P. Hormigon	
Lado	Norponiente Planta Hormigón.	
Fecha de Muestreo	21-02-2014	

3.- Granulometría

Tamiz		% que pasa	% que pasa	Exigencia TM
mm	ASTM			
150	6"			---
100	4"			---
80	3"			---
63	2 1/2"			---
50	2"	100		---
40	1 1/2"	98		---
25	1"	97		---
20	3/4"	95		---
10	3/8"	91		---
5	N° 4	85		---
2	N° 10	79		---
0.5	N° 40	64		---
0.08	N° 200	25		---

4.- Cubicidad de Partícula

Partícula Chancada (%)	---		---
Desgaste de los Ángeles	---		---
Sales solubles	---		---

5.- Límites de Atterberg

Límite Líquido (%)	---		---
Límite Plástico (%)	---		---
Índice de Plasticidad (%)	N.P		---

6.- Relación Humedad - Densidad (Ensayo Proctor)

D.M.C.S (kg/m3)	1.440		---
Humedad Optima (%)	19.1		---
Peso es pecif. bajo 5 mm.(G)	2.342		

7.- Razón de Soporte California (Ensayo C.B.R.)

CBR al 95% de la D. M. C. S. (%)	32%		Mín. 20%
-------------------------------------	-----	--	----------

Clasificación AASHTO A-2-4 IG (O)
Clasificación UCSC SM

CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE SUELO

1.- Antecedentes Generales

CERTIFICADO N° : 562

MATERIAL PROCEDENTE : CALICATA N°62

2.- Identificación de la Muestra

Dm Puntual	Relleno existente	
Lado	Calicata n°62	
Fecha de Muestreo	11-03-2014 M -66	

3.- Granulometría

Tamiz		% que pasa	% que pasa	Exigencia TM
mm	ASTM			
150	6"			---
100	4"			---
80	3"			---
63	2 1/2"			---
50	2"			---
40	1 1/2"			---
25	1"			---
20	3/4"			---
10	3/8"			---
5	N° 4	100		---
2	N° 10	99		---
0.5	N° 40	88		---
0.08	N° 200	57		---

4.- Cubicidad de Partícula

Partícula Chancada (%)	---		---
Desgaste de los Ángeles	---		---
Sales solubles	---		---

5.- Límites de Atterberg

Límite Líquido (%)	22.4		---
Límite Plástico (%)	17.3		---
Índice de Plasticidad (%)	5.1		---

6.- Relación Humedad - Densidad (Ensayo Proctor)

D.M.C.S (kg/m3)	1.873		---
Humedad Óptima (%)	14.6		---
Peso especif. bajo 5 mm.(G).	2.342		

7.- Razón de Soporte California (Ensayo C.B.R.)

CBR al 95% de la D. M. C. S. (%)	3%		Mín. 10
-------------------------------------	----	--	---------

Clasificación AASHTO A-4 IG (O)
Clasificación UCSC CL - ML