

**GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PISOS
INDUSTRIALES EN CONCRETO POSTENSADO**

MANUEL ALEJANDRO ROCHA JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA
2019**

**GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PISOS
INDUSTRIALES EN CONCRETO POSTENSADO**

MANUEL ALEJANDRO ROCHA JAIMES

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Estructuras

Director

TOMÁS GÓMEZ SUÁREZ

Magister en Ingeniería Estructural

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2019

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. GENERAL	15
2.2. ESPECÍFICOS	15
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. CONCRETO PRESFORZADO	16
3.1.1. Clasificación según el instante en el que se efectúa la transferencia del preesfuerzo sobre el concreto.	18
3.1.1.1. Concreto pretensado.	18
3.1.1.2. Concreto postensado.....	19
3.1.2. Clasificación de presfuerzo según adherencia	20
3.1.2.1. Presforzado adherido.	20
3.1.2.2. Presforzado no adherido.....	20
3.1.3.1. Pérdidas inmediatas	23
3.1.3.2. Pérdidas a largo plazo	27
3.2. SUELO DE SOPORTE PARA LOSAS SOBRE TERRENO	31
3.2.1. Fundación Winkleriana.	31
3.2.2. Coeficiente de balastro.	32
3.3. PISOS Y LOSAS SOBRE TERRENO	33
3.3.1. Pisos especiales.	35
3.4. PISOS INDUSTRIALES	36
3.5. IRREGULARIDADES EN PISOS	39
3.5.1. Agrietamiento.....	39
3.5.1.1. Agrietamiento por contracción plástica.	41
3.5.1.2. Agrietamiento aleatorio sin patrón definido.....	41
3.5.1.3. Agrietamiento a largo plazo.	42
3.5.2 Alabeo.	43
3.6. REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PISOS INDUSTRIALES	44
3.6.1. Sistema de Números F.	46
3.6.2. Medición de la regularidad.....	49
4. METODOLOGÍA DE DISEÑO	51

4.1. NORMATIVA EXISTENTE.....	51
4.1.1. Normativa Colombiana.	51
4.1.2. Normativa Americana.	53
4.1.3. Otras normativas internacionales de referencia.....	53
4.2. ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES	54
4.2.1. Concreto.	54
4.1.2. Acero de refuerzo.	57
4.1.3. Acero de presfuerzo.	57
4.1.4. Sistema monotorón.....	58
4.1.5. Recubrimiento para tendones no adheridos.	59
4.3. METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA CON BASE EN ACI360R-10 [5]	61
4.3.1. Procedimientos de diseño aplicables en ACI360R-10.	61
4.3.1.1. Diseño por espesor.....	61
4.3.1.2. Diseño para control de agrietamiento.	62
4.3.1.3. Diseño como piso industrial.	62
4.3.2. Evaluación de cargas.	63
4.3.2.1. Vehículos.	64
4.3.2.2. Cargas concentradas.....	69
4.3.2.3. Cargas distribuidas.	71
4.3.3. Factores de seguridad.	73
4.3.4. Cálculo de la fuerza efectiva de preesfuerzo.	73
4.3.5. Fuerza requerida para evitar fisuración.	76
4.3.6. Separación de torones.....	77
4.3.6. Revisión de espesor de losa.....	79
4.3.6.1. Revisión de espesor por carga de vehículo.	80
4.3.6.2. Revisión de espesor por carga concentrada.....	83
4.3.6.2. Revisión de espesor por carga distribuida.	88
4.3.7. Verificación de esfuerzos.....	92
4.3.7.1. Verificación de esfuerzos de flexión mediante ecuaciones de Westergaard.	92
4.3.7.2. Verificación de resistencia al corte en el perímetro crítico.	95
4.3.7.3. Verificación de esfuerzo de contacto.	96

5. EJEMPLO PRÁCTICO	97
5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO.....	97
5.1.1. Geometría de la losa.	97
5.1.2. Planteamiento de secuencia constructiva.....	98
5.1.3. Módulo de la subrasante.....	100
5.2. DEFINICIÓN DE CARGAS.	101
5.2.1. Carga de vehículo.....	101
5.2.2. Carga de estantería.	102
5.3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL PREESFUERZO.....	104
5.4. FUERZA REQUERIDA PARA EVITAR FISURACIÓN.....	105
5.4. ESPACIAMIENTO DE TORONES Y ESFUERZO RESIDUAL DE PRECOMPRESIÓN.	107
5.5. DEFINICIÓN DE MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO.	107
5.6. REVISIÓN DE ESPESOR POR CARGA DE VEHÍCULO (PCA).	108
5.7. REVISIÓN DE ESPESOR POR CARGA DE ESTANTERÍA (PCA).	111
5.8. CARGA MÁXIMA DISTRIBUIDA ADMISIBLE.	113
5.9. VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS ADMISIBLES.	113
5.9.1. Verificación de esfuerzos mediante ecuaciones de Westergaard.....	113
5.9.2. Verificación de resistencia al corte en el perímetro crítico.	115
5.9.3. Verificación de esfuerzo de contacto.	116
6. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS.....	117
6.1. PREPARACIÓN DEL TERRENO.	117
6.2. COLOCACIÓN DEL CONCRETO Y SECUENCIA CONSTRUCTIVA.	118
6.3. OPERACIONES DE EXTENDIDO Y COMPACTADO.	119
6.4. OPERACIONES DE ENRASADO.....	121
6.5. OPERACIONES DE ACABADO.	122
6.6. CURADO DEL CONCRETO.	123
6.7. TENSIONAMIENTO DEL PRESFUERZO.	125
7. CONCLUSIONES.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principio constructivo del pretensado	19
Figura 2. Esquema de viga postensada.....	20
Figura 3. Formación de fisuras en el presforzado adherido y en el presforzado no adherido.....	21
Figura 4. Comportamiento de la deformación por retracción de fraguado	27
Figura 5. Pérdidas por relajamiento del acero	30
Figura 6. Esquema del conjunto de la prueba de placa.	33
Figura 7. Nivelación y planicidad	45
Figura 8. Inclinação estática de cargador trilateral.....	46
Figura 9. Valoración de curvatura de planicidad (FF)	47
Figura 10. Valoración de curvatura de nivelación (FL).....	47
Figura 11. Dispositivos de medición de regularidad.....	50
Figura 12. Dispositivo perfilógrafo de medición de regularidad.....	51
Figura 13. Monotorón en sistema no adherido.....	60
Figura 14. Consideraciones para el control de diseño para varios tipos de cargas en losas sobre terreno	64
Figura 15. Principales características de montacargas.....	65
Figura 16. Área de contacto efectiva dependiendo del espesor de losa.....	68
Figura 17. Cargas de estantería “racks”.....	69
Figura 18. Principal información de cargas concentradas.....	70
Figura 19. Disposición típica de una columna de carga.....	71
Figura 20. Esfuerzo de precompesión en distintas etapas de tensión	76
Figura 21. Ábaco para determinar el espesor de la losa para vehículos con llantas de eje sencillo	81
Figura 22. Ábaco para determinar el factor F de carga equivalente para vehículos con llantas de eje doble	82
Figura 23. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=15\text{MPa}$	84

Figura 24. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=30\text{MPa}$	85
Figura 25. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=55\text{MPa}$	86
Figura 26. Configuración de estantería para método de diseño	87
Figura 27. Carga de esquina en losa	92
Figura 28. Localización de carga concentrada.....	95
Figura 29. Geometría de losa propuesta y posibles corredores de tensionamiento	98
Figura 30. Ilustración de enrasadora Stream <i>PACLITE Equipment</i>	99
Figura 31. Secuencia constructiva propuesta para la losa.....	100
Figura 32. Esquema general para geometría de estantería.....	102
Figura 33. Longitud crítica de arrastre ($L/2$) para cada etapa de tensionamiento	106
Figura 34. Cálculo gráfico de área de contacto efectiva	109
Figura 35. Cálculo gráfico de espesor requerido para carga de vehículo.	110
Figura 36. Cálculo gráfico del espesor de losa requerido para carga de estantería	112
Figura 37. Armado de formaleta lateral para franjas de vaciado y armado de cables de presfuerzo	118
Figura 38. Extensión y compactado de concreto para losa con pala de puente cuadrada y regla vibratoria portátil.....	120
Figura 39. Enrasado de la superficie de la losa con regla manual de enrase.	122
Figura 40. Aplicación de membrana líquida en spray para curado de losa.....	124
Figura 41. Tensionamiento de cables no adheridos	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de fricción para tendones postensados	24
Tabla 2. Clases de pisos con base en el uso	34
Tabla 3. Guía para el uso típico de planicidad y horizontalidad en losas sobre terreno.....	48
Tabla 4. Resistencia mínima a compresión del concreto a los 28 días.....	56
Tabla 5. Características torones grado 270 de baja relajación.	58
Tabla 6. Principales características de torones por diámetro nominal.	59
Tabla 7. Cargas por eje y espaciamiento entre ruedas representativas para montacargas	66
Tabla 8. Presión de contacto representativa en función del material.....	67
Tabla 9. Factores de seguridad frecuentemente usados.	73
Tabla 10. Valores recomendados para coeficiente de arrastre	77
Tabla 11. Esfuerzo residual de precompresión recomendado	78
Tabla 12. Cargas admisibles para cargas sin distribución fija.....	88
Tabla 13. Cargas admisibles para cargas distribuidas definidas	90
Tabla 14. Características principales de vehículo montacarga.	101
Tabla 15. Dimensiones y espaciamiento de ruedas de vehículo montacarga.....	101
Tabla 16. Resumen de cargas de vehículo montacarga.	102
Tabla 17. Gemoetría de estantería propuesta	103
Tabla 18. Cargas de estantería.....	103
Tabla 19. Datos de entrada para ábacos de Figuras 16 y 21 para cargas de.....	108
vehículo.....	108
Tabla 20. Datos de entrada en ábacos de la Figura 24 para carga de estantería.	111
Tabla 21. Resumen de cargas en la losa.....	113

RESUMEN

TÍTULO: GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PISOS INDUSTRIALES EN CONCRETO POSTENSADO*

AUTOR: MANUEL ALEJANDRO ROCHA JAIMES**

PALABRAS CLAVE: Pisos industriales, concreto postensado, diseño de losas sobre terreno.

El presente trabajo de monografía consistió en el análisis y determinación de los principales factores para el diseño estructural de pisos industriales en concreto postensado, con base en normativas internacionales, que servirá a los profesionales de la ingeniería como guía de diseño.

Para lograr este propósito, el documento inicia con una presentación de las principales definiciones, características y parámetros de un piso industrial, sus posibles irregularidades y los beneficios de introducir e implementar la tecnología de acero presforzado. Se desarrolla una metodología según la recopilación de criterios de las principales normativas internacionales y se plantea un ejercicio práctico para su mayor comprensión.

Finalmente se enuncian las consideraciones constructivas principales a tener en cuenta en la ejecución de pisos industriales, con el fin de garantizar las especificaciones dadas para la superficie.

*Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Tomás Gómez Suarez Ingeniero Civil, MSc.

ABSTRACT

TÍTULO: METHODOLOGIC GUIDE FOR STRUCTURAL DESIGN OF POST-TENSIONED CONCRETE SLABS-ON-GROUND*

AUTHOR: MANUEL ALEJANDRO ROCHA JAIMES**

KEY WORDS: Industrial Floors, post-tensioned concrete, design of Slabs-on-Ground.

The present monograph work consisted in the analysis and determination of the main factors for the structural design of industrial floors in post-tensioned concrete, based on international codes, which will serve engineering professionals as a design guide.

To achieve this purpose, the document begins with a presentation of the main definitions, characteristics and parameters of an industrial floor, its possible irregularities and the benefits of inducing prestressed steel technology. A methodology is developed according to the compilation of criteria of the main international regulations and a practical exercise is proposed for its greater understanding.

Finally, the main constructive considerations to be taken into account in the execution of industrial floors are stated, in order to guarantee the specifications given for the surface.

*Monography.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Tomás Gómez Suarez Ingeniero Civil, MSc.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de un piso o losa de concreto depende en gran medida del logro de una superficie plana, resistente y durable, relativamente libre de grietas y con la pendiente y elevación apropiada. Las propiedades de la superficie están determinadas por el proporcionamiento de mezclas y la calidad de las operaciones para la fabricación y el colado del concreto y localización de las juntas¹.

Uno de los principales problemas al que es enfrentado un propietario o inversionista de una futura bodega o patio industrial tiene relación con el tipo de pavimento que deberá considerar para su construcción. Es frecuente que profesionales involucrados en los diseños de este tipo de infraestructuras no conozcan cabalmente las diferentes tecnologías que existen y que permiten entregar una adecuada solución para un piso².

Los pisos de hormigón, sean estos industriales o comerciales, deben ser diseñados y contruidos sin olvidar los aspectos económicos a los que se encuentran ligados. El diseño y construcción de un piso industrial requiere de una comunicación estrecha de todos los involucrados en el proyecto².

El postensionamiento en pavimentos de concreto tiene dos funciones principales, la primera contener el agrietamiento por contracción durante las primeras horas de fraguado y la segunda precomprimir el concreto para resistir esfuerzos de tensión bajo cargas de servicio y gradientes de temperatura³.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p

³ HEYMANNS, Paul; STRUCTURAL SYSTEMS AFRICA. *Post-tensioning: the right solution*. En: Civil Engineering, South African Institution of Civil Engineering. Agosto de 2011, pp. 47-49

El diseño de una losa postensada, optimiza los sobrecostos de una estructura, incluido el costo para la preparación del terreno y el costo de la losa misma. Además, provee un área libre de juntas y agrietamientos. Comparado con losas reforzadas convencionalmente, el postensado provee a lo largo de la vida útil una alta capacidad de carga, con requerimientos de mantenimiento muy bajos³.

En la actualidad, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 no incluye una metodología clara para el diseño de pisos industriales, mucho menos para aquellos con acero de preesfuerzo, lo que puede llevar a errores conceptuales en el análisis estructural, que generarán pisos con irregularidades no deseadas y baja calidad de servicio⁴.

Por ello, se propuso realizar una metodología para que los profesionales en ingeniería, la empleen como base para el análisis y diseño de pisos industriales en concreto postensado, cumpliendo con las exigencias mínimas dadas en el documento ACI360R-10: “Guide to Design of Slabs-on-Ground”, elaborado por el comité 360 del Instituto Americano del Concreto ⁵.

³ HEYMANNS, Paul; STRUCTURAL SYSTEMS AFRICA. Post-tensioning: the right solution. En: Civil Engineering, South African Institution of Civil Engineering. Agosto de 2011, pp. 47-49.

⁴COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

⁵ ACI Committee 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Establecer lineamientos mínimos que sirvan como guía metodológica práctica para el diseño estructural de pisos industriales en concreto postensado.

2.2. ESPECÍFICOS

- Identificar las principales características de un piso industrial.
- Enunciar los criterios más relevantes a considerar en el diseño de pisos industriales.
- Realizar un análisis de criterios normativos existentes.
- Proponer una metodología para el diseño de pisos industriales en concreto postensado.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. CONCRETO PRESFORZADO

El concreto tiene como característica principal su gran capacidad para soportar esfuerzos de compresión, caso contrario a los esfuerzos de tensión, donde su capacidad para soportarlos se ve considerablemente disminuida, tanto así que, al momento de diseñar, se deja fuera de consideración. Por tanto, la aplicación de una fuerza de preesfuerzo en el concreto, implica la aplicación de una carga compresiva, previa al estado de cargas de diseño, buscando así una reducción o anulación de los esfuerzos de tensión⁶.

El presforzado Puede definirse en términos generales como el precargado de una estructura, antes de la aplicación de las cargas de diseño requerida, hecho en forma tal que mejore su comportamiento general⁷.

Además del incremento en la capacidad para soportar esfuerzos durante las condiciones de servicio, el concreto presforzado tiene la ventaja de controlar significativamente el agrietamiento y la deflexión en las estructuras, brindado así un mayor desempeño de servicio durante su vida útil⁶.

Los anchos de las grietas en las vigas convencionales de concreto reforzado, son proporcionales al esfuerzo que actúa en el refuerzo de tensión, y por esta razón tienen que limitarse los esfuerzos en el acero a valores mucho menores que los que podrían usarse si eso no ocurriera. En las vigas presforzadas, el alto esfuerzo en el acero no va acompañado por grietas anchas en el concreto, porque se aplica al

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

⁷ NAWY, Edward G. Prestressed Concrete: A Fundamental Approach. 5 ed. Prentice Hall, 2010. 949 p. ISBN: 0-13-608150-9.

acero gran parte del esfuerzo antes de ser anclado al concreto y antes de que se aplique la carga al elemento⁶.

En general, el presforzado permite el uso de materiales eficientes de alta resistencia, con elementos de menores dimensiones, generando una reducción a la relación entre carga muerta y viva, permitiendo así, una mayor longitud entre vanos⁶.

Según NSR-10, los elementos presforzados a flexión deben clasificarse como Clase U, Clase T o Clase C en función de f_t (esfuerzo en la fibra extrema por tracción en la zona de tracción precomprimida, calculado para las cargas de servicio usando las propiedades de la sección bruta⁴.

Clase U:	$f_t \leq 0.62\sqrt{f'_c}$	(EC – 01)[4]
Clase T:	$0.62\sqrt{f'_c} < f_t \leq 1.0\sqrt{f'_c}$	(EC – 02)[4]
Clase C:	$f_t > 1.0\sqrt{f'_c}$	(EC – 03)[4]

Los elementos de la Clase U se supone que poseen un comportamiento como elementos no fisurados. Los elementos Clase C se supone que poseen un comportamiento como elementos fisurados. El comportamiento de los elementos de Clase T se supone como en transición entre los fisurados y los no fisurados⁴.

Según NSR-10, en el Artículo C.18.4.2. *“para los elementos presforzados sometidos a flexión Clase U y Clase T, los esfuerzos en el concreto bajo las cargas de servicio (después de que han ocurrido todas las pérdidas en presforzado) no deben exceder los siguientes valores:*

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

- a) *Esfuerzo en la fibra extrema en compresión debido al presforzado y a las cargas permanentes en el tiempo: $0.45f_c$.*
- b) *Esfuerzo en la fibra extrema en compresión debida al presforzado y a todas las cargas $0.60f_c$.”⁴.*

3.1.1. Clasificación según el instante en el que se efectúa la transferencia del preesfuerzo sobre el concreto.

3.1.1.1. Concreto pretensado. En este tipo de concreto se efectúa inicialmente el tensionamiento del acero de preesfuerzo y posteriormente se funde el concreto. Es un procedimiento ideal para elementos prefabricados⁸.

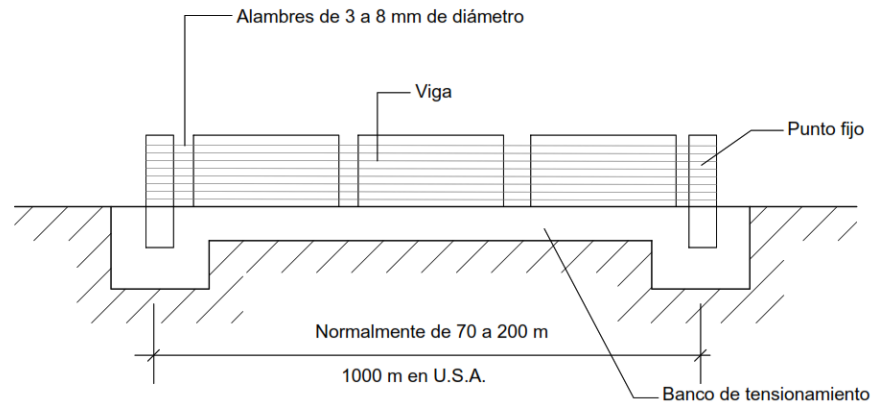
Los torones se tensionan y se anclan a los bancos (ver Figura 1), luego se vacía el concreto y después de alcanzada una resistencia específica se liberan los torones del banco, estos tienden a acortarse, pero no lo hacen por la adherencia con el concreto, de esta forma es transferida la carga para comprimir el concreto⁹.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

⁹ [9]. MONTROYA, Esneyder. Curso de Estructuras Postensadas, Módulo 1: Principios Básicos del Postensado, ciudad de Panamá.

Figura 1. Principio constructivo del pretensado



Fuente: adaptado de VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011.

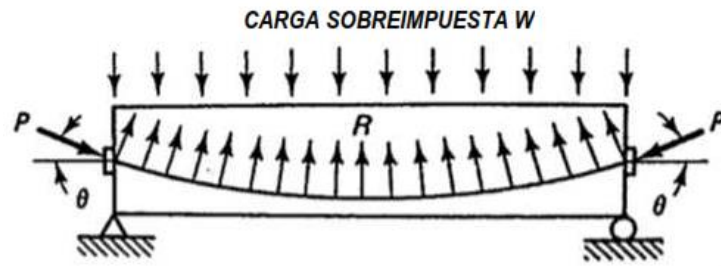
3.1.1.2. Concreto postensado. En este tipo de concreto se colocan ductos metálicos dentro o fuera de la sección. A través de los ductos se enhebran cables de acero de preesfuerzo. Posteriormente se funde el concreto y una vez éste ha alcanzado la resistencia deseada, se tensiona cada uno de los cables desde los anclajes. Tras el tensionamiento se inyecta mortero de cemento dentro de los ductos con el fin de garantizar la adherencia entre el acero de preesfuerzo, el ducto y el concreto circundante⁸.

Si los tendones se curvan, de tal manera que sigan un perfil determinado, además de ejercer compresión en el perímetro, van a ejercer un beneficioso conjunto de fuerzas que compensan las cargas aplicadas de servicio y peso propio aliviando parte de la estructura y contribuyendo a una mayor resistencia, tal como muestra la Figura 2 ⁷.

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

⁷ NAWY, Edward G. Prestressed Concrete: A Fundamental Approach. 5 ed. Prentice Hall, 2010. 949 p. ISBN: 0-13-608150-9.

Figura 2. Esquema de viga postensada



Fuente: adaptado de NAWY, Edward G. *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. 5 ed. Prentice Hall, 2010.

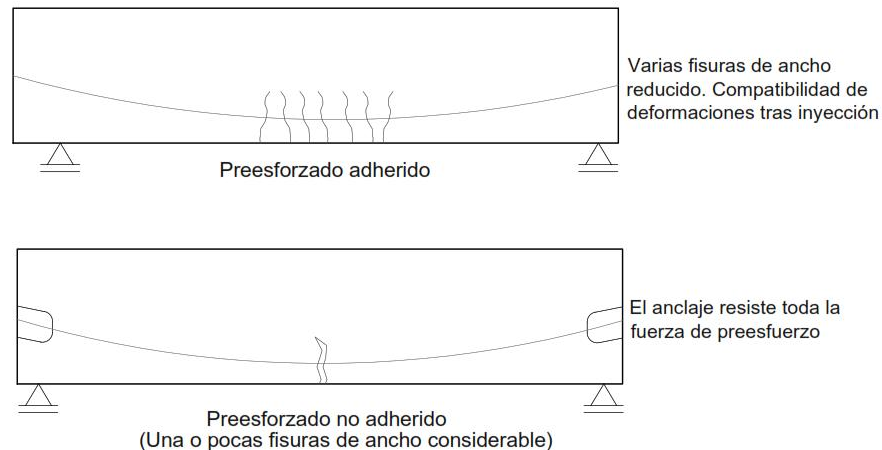
3.1.2. Clasificación de presfuerzo según adherencia

3.1.2.1. Presforzado adherido. En este caso existe adherencia entre el acero de presfuerzo y el concreto circundante. El concreto pretensado es siempre adherido, por el contrario, el concreto postensado es adherido si se inyecta lechada de cemento en los ductos, una vez efectuada la transferencia. Esta inyección protege los cables contra la oxidación, incrementa la seguridad de la estructura a la rotura y reduce la separación entre fisuras (el ancho de las fisuras se reduce a medida que su separación disminuye)⁸.

3.1.2.2. Presforzado no adherido. En este tipo de concreto no existe adherencia entre el acero de presfuerzo y el concreto circundante. De esta forma toda la acción del cable queda supeditada a los anclajes extremos. Además, si no existe adherencia entre el acero de presfuerzo y el concreto, cada incremento de solicitaciones es resistido por el cable en toda su longitud, lo que produce mayores alargamientos del mismo y por consiguiente aumenta el ancho de fisuras tal como se representa en la Figura 3⁸.

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. *Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica*. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

Figura 3. Formación de fisuras en el presforzado adherido y en el presforzado no adherido.



Fuente: Adaptado de VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011.

3.1.3. Pérdidas en el preesfuerzo. La falta de éxito experimentada en los primeros intentos para presforzar el concreto se debieron, en la mayoría de los casos, a la falla en la apreciación de la importancia de las pérdidas parciales inevitables de la fuerza pretensora⁶.

Según el Artículo C.18.6 de NSR-10, para determinar el esfuerzo efectivo en el acero de presforzado, se deben considerar las siguientes fuentes de pérdidas⁴:

- a) Asentamiento del acero de presforzado durante la transferencia.
- b) Acortamiento elástico del concreto.

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

- c) Flujo plástico del concreto.
- d) Retracción del concreto.
- e) Relajación del esfuerzo en el acero de presfuerzo.
- f) Pérdidas por fricción debidas a la curvatura intencional o accidental de los tendones de postensado.

Las pérdidas de presfuerzo reales, mayores o menores a los valores calculados, tienen poco efecto sobre la resistencia de diseño del elemento, pero afectan el comportamiento bajo cargas de servicio (deflexiones, contra flecha, cargas de fisuración) y las conexiones. En el estado de cargas de servicio, la sobreestimación de las pérdidas de presforzado puede ser tan dañina como la subestimación, puesto que lo primero puede dar como resultado una contra flecha excesiva y movimientos horizontales⁴.

Para la evaluación de las pérdidas, se subdividen en dos grupos: pérdidas que ocurren a través de un lapso de tiempo extenso y pérdidas que ocurren inmediatamente durante el proceso de construcción⁶.

La fuerza que es inducida por el gato se denomina P_j , la cuál será la mayor fuerza que podrá actuar en el torón durante su vida útil; la fuerza P_i será la fuerza de presfuerzo después de ocurridas las pérdidas iniciales; y P_e la fuerza pretensora efectiva que incluye los efectos a largo plazo⁶.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

3.1.3.1. Pérdidas inmediatas

3.1.3.1.1. Pérdidas por fricción y curvatura. En los miembros postensados, por lo general los tendones se anclan a un extremo y se tensan mediante los gatos desde el otro. A medida en que el acero se desliza a través del ducto, se desarrolla la resistencia friccionante, con el resultado que la tensión en el extremo anclado es menor que la tensión en el gato. La pérdida total por fricción es la suma de la fricción por deformación no intencional del ducto, y la fricción debida a la curvatura intencional del tendón⁶.

Según las ecuaciones C.18-1 y C.18-2 del Artículo C.18.6.2 de NSR-10 [4], la fuerza en los tendones de postensado a una distancia x del extremo donde se aplica la fuerza del gato, se calcula como:

$$P_{px} = P_j * e^{-(k_i * x + \mu * \alpha)} \quad (EC - 04)[4]$$

Cuando $(k_i x + \mu * \alpha)$ no es mayor que 0,30 la fuerza en los tendones puede calcularse como:

$$P_{px} = P_j * (1 + k_i * x + \mu * \alpha)^{-1} \quad (EC - 05)[4]$$

donde:

P_{px} = fuerza en los tendones de postensado a una distancia x .

P_j = fuerza aplicada en el gato.

k_i = coeficiente de fricción involuntaria “Wobble” o coeficiente de desviación accidental (1/m).

μ = coeficiente de fricción por curvatura (1/rad).

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

x = distancia medida desde el extremo donde se aplica la fuerza del gato.

α = variación angular de la trayectoria del tendón entre dos puntos.

Los coeficientes incluidos en la Tabla 1 dan el rango de valores que normalmente pueden esperarse. Estos coeficientes varían según el material y depende del proveedor que lo fabrique⁴.

Tabla 1. Coeficientes de fricción para tendones postensados

			Coeficiente de desviación accidental, K por metro	Coeficiente de curvatura μ por radian.
Tendones inyectados en revestimiento metálico		Tendones de alambre	0.0033 – 0.0049	0.15 – 0.25
		Barras de alta resistencia	0.0003 – 0.0020	0.08 – 0.30
		Torones de 7 alambres	0.0016 – 0.0066	0.15 – 0.25
Tendones no adheridos	Recubrimiento con mástico	Tendones de alambres	0.0033 – 0.0066	0.05 – 0.15
		Torones de 7 alambres	0.0033 – 0.0066	0.05 – 0.15
	Pre engrasado	Tendones de alambres	0.0010 – 0.0066	0.05 – 0.15
		Torones de 7 alambres	0.0010 – 0.0066	0.05 – 0.15

Fuente. Tabla CR18.6.2. Capítulo 18. Título C. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C. enero de 2010.

3.1.3.1.2. Asentamiento de cuña. En los elementos sometidos a preesfuerzo por la metodología de postensado, la fuerza producida cuando se libera el gato es

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

transferida al concreto mediante anclajes, estos sufren inevitablemente un deslizamiento después de la transferencia⁶.

Su magnitud dependerá del sistema particular que se use en el presfuerzo o en el dispositivo de anclaje. La gran variedad de anclajes excluye cualquier generalización. La fuente más confiable de información puede ser el fabricante del dispositivo seleccionado o, mejor aún pruebas específicas del equipo en laboratorio⁶.

Si se conocen las características del deslizamiento del dispositivo de anclaje, y suponiendo que el deslizamiento se encuentra uniformemente distribuido a lo largo de la longitud del tendón, la pérdida por deslizamiento en el anclaje se puede calcular mediante la expresión⁶:

$$\Delta f_{pa} = \frac{\Delta L}{l} * E_p * A_p \quad (EC - 06)[6]$$

donde:

Δf_{pa} = Pérdidas inmediatas por asentamiento de cuña.

ΔL = Deslizamiento del dispositivo de anclaje.

E_p = Módulo de elasticidad para el acero de presfuerzo.

A_p = Área del torón de presfuerzo.

3.1.3.1.3. Acortamiento Elástico del concreto. En vigas postensadas, si todo el acero se tensa al mismo tiempo, no existirán pérdidas debidas al acortamiento elástico. Sin embargo, para el caso en que se usan tendones múltiples, y en que éstos se tensan siguiendo una secuencia, existirán pérdidas⁶.

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

El acortamiento elástico es presente en el concreto, es producto de la compresión que ejerce la fuerza pretensora. Suponiendo que existe compatibilidad de deformaciones a nivel del centroide del acero, es posible calcular las pérdidas con las siguientes ecuaciones ^{11 6}:

$$\text{Concreto pretensado:} \quad \Delta f_{\text{PES}} = \frac{E_p}{E_c} * f_{\text{cpy}} \quad (\text{EC} - 07)[6]$$

$$\text{Concreto postensado:} \quad \Delta f_{\text{PES}} = \frac{N-1}{2N} \frac{E_p}{E_c} * f_{\text{cpy}} \quad (\text{EC} - 08)[6]$$

$$f_{\text{cpy}} = f_{\text{sc}} + f_{\text{cpm}} \quad (\text{EC} - 09)[6]$$

donde:

Δf_{PES} = Pérdidas por acortamiento elástico del concreto (MPa).

f_{cpy} = Esfuerzo de compresión en el concreto al nivel del centroide del acero (MPa).

E_p = Módulo de elasticidad del acero de presfuerzo (MPa).

E_c = Módulo de elasticidad del concreto (MPa).

N = Cantidad de veces que se aplica el presfuerzo en el elemento.

f_{sc} = Esfuerzo de compresión en el concreto debido a la fuerza pretensora de los cables (MPa).

f_{cpm} = Esfuerzo de compresión en el concreto debido a las cargas permanentes (MPa).

¹¹ GARZÓN, Jaime E. Curso de Diseño de Puentes. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2019.

⁶ NILSON, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9.

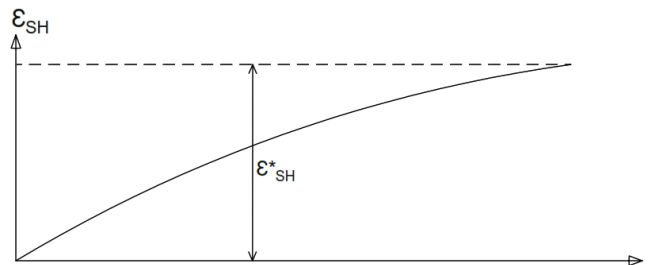
3.1.3.2. Pérdidas a largo plazo

3.1.3.2.1. Retracción de fraguado (shrinkage). La retracción de fraguado se debe a la evaporación del agua presente en los poros de la pasta de cemento, aumenta con el tiempo y su comportamiento se asemeja a la Figura 4⁸.

La retracción de fraguado crece a medida que⁸:

- a) Aumenta la relación agua cemento.
- b) Aumenta el contenido y grado de finura del cemento.
- c) Aumenta la temperatura del medio ambiente.
- d) Disminuye la humedad relativa del ambiente.
- e) Aumenta el área expuesta del elemento de concreto a la acción del medio ambiente.
- f) Disminuye el tamaño del elemento del concreto.

Figura 4. Comportamiento de la deformación por retracción de fraguado



Fuente: VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011.

Las ecuaciones 5.9.5.3-1, 5.9.5.3-2 y 5.9.5.3-3 del Artículo 5.9.5.3 del Código Colombiano de Puentes CCP-14¹⁰, describe una forma para calcular las pérdidas

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

¹⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

de presfuerzo a largo plazo, las pérdidas correspondientes a la retracción de fraguado podrían calcularse siguiendo las ecuaciones EC-10, EC-11 y EC-12 del presente documento¹⁰:

$$\gamma_h = 1,70 - 0,01(RH) \quad (EC - 10)[10]$$

$$\gamma_{st} = \frac{35}{1 + f'_{ci}} \quad (EC - 11)[10]$$

$$\Delta f_{SH} = 83 * \gamma_h * \gamma_{st} \quad (EC - 12)[10]$$

donde:

Δf_{SH} = Pérdidas por retracción de fraguado.

γ_h = Factor de corrección para humedad relativa del ambiente.

γ_{st} = Factor de corrección de la resistencia especificada del concreto en el instante de transferencia del presfuerzo al miembro de concreto.

f'_{ci} = Resistencia del concreto al momento de la aplicación del presfuerzo.

RH = Humedad relativa del ambiente promedio anual (%).

3.1.3.2.2. Flujo plástico (creep). El flujo plástico es una deformación producida por la aplicación sostenida de un esfuerzo sobre el concreto. Al igual que en la retracción de fraguado, la sección del elemento y las condiciones ambientales, así como las propiedades de la mezcla de concreto influyen en el flujo plástico⁸.

Las pérdidas por flujo plástico (creep) aumentan a medida que⁸:

- a) Aumenta el esfuerzo actuante sobre el concreto.
- b) Disminuye la edad del concreto en el momento de la transferencia de la fuerza de preesfuerzo.

¹⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

- c) Aumenta la relación agua cemento de la mezcla.
- d) Aumenta la temperatura del medio ambiente.
- e) Disminuye la humedad relativa del ambiente.
- f) Disminuye la resistencia a la compresión del concreto.
- g) Disminuye el módulo de elasticidad de los materiales de la mezcla de concreto.
- h) Aumenta a medida que disminuye el tamaño del elemento de concreto.

La ecuación 5.9.5.3-1 del Artículo 5.9.5.3 del Código Colombiano de Puentes CCP-14, describe una forma para calcular las pérdidas de presfuerzo a largo plazo, las pérdidas correspondientes al flujo plástico podrían calcularse siguiendo la ecuación EC-13 del presente documento¹⁰.

$$\Delta f_{\text{CREEP}} = 10 * \frac{f_{\text{pi}} * A_p}{A_g} * \gamma_h * \gamma_{\text{st}} \quad (\text{EC} - 13)[10]$$

donde:

Δf_{CREEP} = Pérdidas a largo plazo por flujo plástico del concreto.

f_{pi} = Esfuerzo inicial de precompresión aplicado por el gato.

A_p = Área del torón de presfuerzo.

A_g = Área total de la sección de concreto.

f_{pi} = Esfuerzo del acero de presfuerzo inmediatamente antes de transferencia (MPa).

γ_h = Factor de corrección para humedad relativa del ambiente.

γ_{st} = Factor de corrección de la resistencia especificada del concreto en el instante de transferencia del presfuerzo al miembro de concreto.

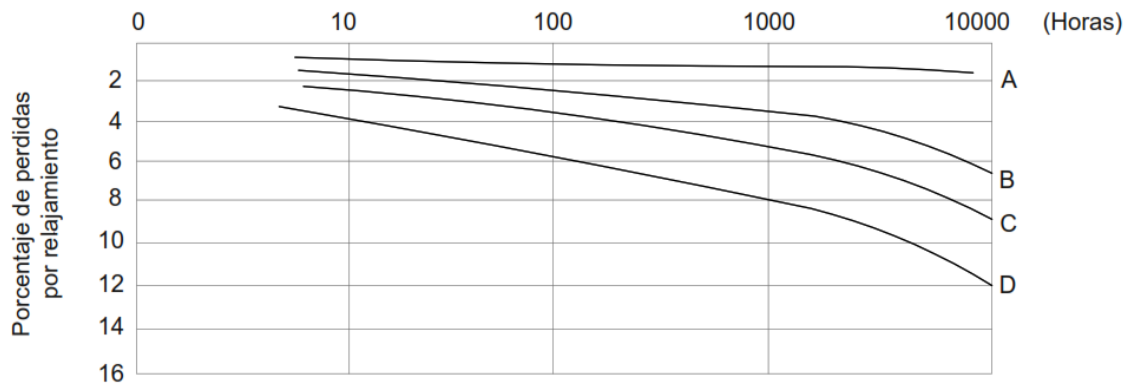
¹⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

3.1.3.2.3. Relajamiento del acero (relaxation). Estas pérdidas se presentan a lo largo del tiempo y son una disminución del esfuerzo efectivo al que es sometido el acero de preesfuerzo sin cambiar ninguna de las condiciones¹¹.

Las pérdidas por relajación dependen del esfuerzo inicial (Cuanto más alto, mayor la pérdida) y de la temperatura. Es una pérdida que puede variar del 1% al 10% del esfuerzo inicial. Es en general un dato que suministra el fabricante de los torones⁸.

En la Figura 5, se observa el porcentaje de pérdidas por relajamiento del acero, en función del tiempo transcurrido después de la aplicación de la carga de presfuerzo para diferentes porcentajes de aplicación de carga y temperatura del ambiente⁸.

Figura 5. Pérdidas por relajamiento del acero



Fuente: VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011.

- Curva A = Carga al 60% de la resistencia última y a 15°C.
- Curva B = Carga al 70% de la resistencia última y a 15°C.

¹¹ GARZÓN, Jaime E. Curso de Diseño de Puentes. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2019.

⁸ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

- Curva C = Carga al 60% de la resistencia última y a 21°C.
- Curva D = Carga al 70% de la resistencia última y a 21°C.

Según el Artículo 5.9.5.3 del Código Colombiano de Puentes CCP-14¹⁰, las pérdidas por relajación del acero pueden aproximarse a 16MPa para torones de baja relajación, luego se plantea la siguiente ecuación:

$$\Delta f_{RT} = 16 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 14)[10]$$

3.2. SUELO DE SOPORTE PARA LOSAS SOBRE TERRENO

3.2.1. Fundación Winkleriana. Winkler propuso que la deformación de la superficie del suelo puede ser modelada por la simple ecuación¹²:

$$p = k * w \quad (\text{EC} - 15)[12]$$

donde:

p = presión actuando en la superficie del suelo.

k = constante de proporcionalidad llamada módulo de reacción.

w = deflexión de la región cargada.

A lo largo de los años se ha usado el modelo de Winkler por su simplicidad para representar el suelo en análisis de suelo-estructura. Muchas de las fórmulas empíricas fueron propuestas para k, inclusive pensando en que el suelo no tiene un único valor de k. El módulo de reacción no es una propiedad dependiente únicamente del suelo, también depende de la rigidez de la estructura, duración de la carga, tipo de carga y profundidad del suelo¹².

¹⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

¹² GUNALAN, Kancheepuram N. Analysis of Industrial Floor Slabs-on-Ground for Design Purposes. Doctor of Philosophy, Civil Engineering. Lubbock, Texas: Texas Tech University, 1986. 262 p.

Esta modelación considera que el suelo de fundación se representa por un conjunto de resortes sin interacción entre ellos, por lo que la fundación se deflacta proporcionalmente a la carga aplicada, sin que se produzcan esfuerzo de corte en las áreas adyacentes².

3.2.2. Coeficiente de balastro. El coeficiente de balastro o módulo de reacción de la base k , es el parámetro que representa la rigidez de los resortes de una fundación de Winkler¹³.

La determinación de este parámetro se realiza mediante la ejecución del Ensayo de placa de carga ilustrado en la Figura 6. Alternativamente puede estimarse a través de correlaciones con ensayos de suelo rutinarios y/o a través de las características físicas del suelo¹³.

Existen dos tipos de ensayos de placa de carga que están normalizados por AASHTO⁶: ensayos con cargas estáticas repetitivas (AASHTO T221)¹⁴ y ensayos con cargas estáticas no repetitivas (AASHTO T222)¹⁵.

El valor de k que se requiere para el diseño de un pavimento de hormigón se puede determinar con cualquiera de los dos ensayos indicados. En el ensayo de carga repetitiva, el valor k se determina como la razón entre la carga y la deformación

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

¹³ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; ÁLVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008. 114 p

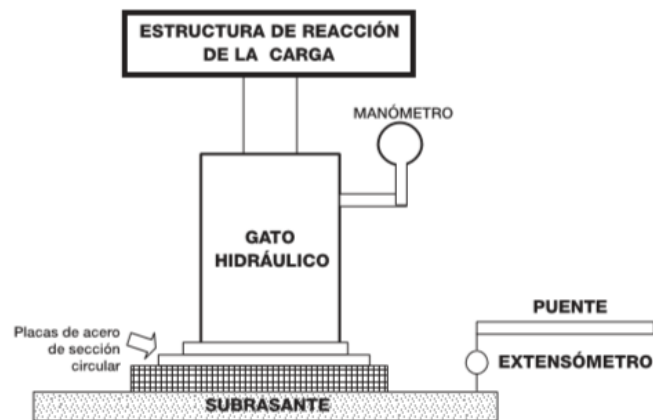
⁶ American Association of State Highway and Transportation Officials.

¹⁴ [14]. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. Standard Method of Test for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements AASHTO T 221. Enero de 2017. 5 p.

¹⁵ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements AASHTO T 222. Enero de 2017. 10 p.

elástica (la parte que se recupera de la deformación total), en cambio para el ensayo de carga no repetitiva, se define como la razón entre la carga y deformación para una deformación de 1,25 mm (0,05 in)².

Figura 6. Esquema del conjunto de la prueba de placa.



Fuente: LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; ÁLVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

3.3. PISOS Y LOSAS SOBRE TERRENO

Los pisos en concreto dan una solución económica, duradera y funcional para el problema de planicidad en pisos de edificaciones comerciales, industriales e institucionales. Las características de la superficie de la losa y el desempeño de las juntas son los factores que más alto impacto tienen en la calidad de servicio del piso. Según el documento ACI302.1R-15¹ desarrollado por el Instituto Americano del Concreto, los pisos se clasifican dependiendo del uso pretendido y la técnica de acabado final, tal como especifica la Tabla 2.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

Tabla 2. Clases de pisos con base en el uso

Clase	Tipo anticipado de tránsito	Uso	Acabado final
Clase 1. Una capa sencilla	Superficie expuesta tránsito peatonal.	Oficinas, iglesias, comercial, institucional, residencial de multiunidades.	Acabado normal alisado con llanas de acero, acabado no deslizante cuando se requiera.
Clase 2. Una sencilla capa.	Superficie expuesta o cubierta, tránsito peatonal.	Oficinas, iglesia, comercial, institucional con cubiertas de piso, residencial de multifamiliares.	Acabado ligero alisado con llana de acero.
Clase 3. Dos capas.	Superficie expuesta o cubierta tránsito peatonal.	Capa superior desligada o ligada sobre losa base de edificaciones no industriales o comerciales	Losa base: acabado alisado debajo de la capa superior, superficie con textura, limpia. Capa superior: acabado normal alisado con llana de acero.
Clase 4. Una sencilla capa.	Superficie expuesta o cubierta tránsito peatonal y vehicular ligero.	Institucional y comercial.	Acabado ligero alisado con llana de acero.
Clase 5. Una capa sencilla.	Superficie expuesta tránsito industrial vehicular.	Pisos industriales para fabricación, procesamiento y bodegas.	Acabado ligero alisado con llana de acero.
Clase 6. Una sencilla capa	Superficie expuesta tránsito industrial vehicular.	Pisos industriales sujetos a tránsito pesado.	Endurecedor de superficie especial de agregado metálico o mineral; alisado intenso con llana de acero repetido.
Clase 7. Dos capas.	Superficie expuesta tránsito industrial vehicular.	Pisos ligados de dos capas sujetos a	Superficie base: con textura adecuada, llanas

		fuerte tránsito e impacto.	mecánicas especiales para capa. Capa superior: alisado con llana de acero.
Clase 8. Dos capas.	Como en clases 4, 5 o 6.	Capa superior desligada sobre pisos nuevos o antiguos.	Como en clases 4,5 o 6.
Clase 9. Capa sencilla o capa superior.	Superficie expuesta requeridas las tolerancias de superficie superplana críticas. Vehículos especiales para manejo de materiales o robotizados que requieren tolerancias específicas.	Bodega de naves altas, de pasillos angostos, estudios de televisión, pistas de hielo, gimnasios.	Deben seguirse las técnicas para acabados de pisos superplanos.

Fuente. Adaptado de ACI Committee 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015

3.3.1. Pisos especiales. Ciertas instalaciones que presentan manejo de materiales pesados y pasillos angostos, requieren pisos extraordinariamente planos y a nivel, estos son denominados pisos superplanos, que podrían construirse con una sola capa o como un piso de dos capas. Según el documento ACI302.1R-15, son los clasificados como “pisos clase 9”¹.

Comúnmente estas superficies de piso deberán soportar tránsito vehicular a lo largo de trayectorias que son definidas antes de la construcción y que no cambian durante la vida de la superficie del piso. Ejemplo centro de distribución que utiliza pasillos muy angostos y sistemas de colocación en anaqueles en grandes vanos. El

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

procedimiento de acabado para esta clase de pisos presenta la ejecución más rigurosa y exigente¹.

3.4. PISOS INDUSTRIALES

Entre mayor sea la calidad del piso, se permite un uso más eficiente del espacio, un manejo más rápido de los productos dentro de los recintos de producción y una mayor vida útil del pavimento.

Dependiendo de la metodología usada para el refuerzo de pisos en concreto, estos se agrupan en las siguientes categorías²:

- a) Pisos de concreto simple con juntas con o sin elementos de transferencia de carga.
- b) Pisos de concreto reforzados para control de ancho de grietas.
- c) Pisos de concreto reforzados con fibras.
- d) Pisos de concreto de retracción compensada.
- e) Pisos de concreto postensados.

Un piso industrial normalmente se estructura con una subbase granular sobre la cual se construye el pavimento de hormigón. Esta estructura de pavimento se emplaza sobre una superficie especialmente preparada y que se denomina subrasante y que corresponde al suelo de fundación que soporta la estructura de pavimento².

3.4.1. Pisos industriales postensados. Un piso industrial postensado está compuesto por losas de hormigón en las que, a los refuerzos, cables de acero de

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

12,7 mm de diámetro, se les aplican grandes fuerzas por medio de gatos hidráulicos, hasta alcanzar una fuerza efectiva de alrededor de 25.000 lb (11.340 kgf). Esta fuerza en los tendones es transferida a las losas de hormigón por dispositivos de anclaje en sus extremos².

El empleo de torones de acero de alta resistencia como refuerzo en vez de refuerzo convencional para temperatura y contracción permite al contratista introducir un esfuerzo de compresión relativamente alto en el concreto por medio de postensado. Este esfuerzo de compresión proporciona un equilibrio para el esfuerzo de tensión que produce el agrietamiento que se desarrolla conforme el concreto se contrae durante el proceso de curado. El presfuerzo por etapas, o tensado parcial, de la losa al día siguiente de la colocación puede dar por resultado una reducción importante de grietas de contracción. Las cargas aplicadas en la construcción sobre el concreto se deberán reducir al mínimo hasta que las losas están plenamente esforzadas¹.

En los pavimentos de hormigón postensado, es posible eliminar juntas transversales y construir grandes paneles en zonas de tráfico aleatorio además de obtener una planeidad y horizontalidad de gran calidad. El propósito de las juntas de contracción es predefinir la ubicación de las grietas por motivos de estética y funcionamiento¹⁶.

Los pavimentos postensados permiten obtener mejores perfiles de pisos debido a que al disminuir las juntas, se elimina una de las principales causas de fallas posteriores producto del uso de los pavimentos, lo que reduce el costo de

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

¹⁶ DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

mantención de bodega y de los equipos. Además, los Números-F disminuyen significativamente en las cercanías de las juntas, debido a la curvatura de la losa¹⁷.

Entre las ventajas que poseen los pisos superplanos postensados se pueden mencionar¹⁶:

- a) Reducción de cerca del 95% de la cantidad de juntas de contracción y dilatación.
- b) Es posible reducir los espesores del pavimento en comparación a los pavimentos tradicionales, según las cargas de servicio consideradas, lo que se traduce en estructuras más livianas y en ahorros en hormigón y armaduras.
- c) Permite hacer pistas o calles que se hormigonan continuamente sin tener la necesidad de ejecutar juntas transversales, ya que las potenciales fisuras por retracción están controladas por la compresión residual con la que se diseña el pavimento, la cual se proporciona a través de los cables del sistema postensado.
- d) Permite el diseño de pistas angostas de hasta 60 metros de largo.
- e) Permite tener calles de tránsito definidas con una calidad y precisión de acuerdo a las necesidades del usuario. En bodegas, donde se utilizan equipos de almacenaje de precisión, esta característica es fundamental para satisfacer los requerimientos que demanda el funcionamiento de estos equipos.
- f) Reduce los costos de mantenimiento de la bodega gracias a la ausencia de juntas y grietas¹⁸.
- g) Mayor impermeabilidad, resistencia superficial y resistencia a bajas temperaturas del pavimento.
- h) Mayor control de fisuración.
- i) Se pueden hormigonar mayores superficies.

¹⁷ KEITH, F.R.; HOLLAND, J.A. And the Owner Said, "Let There Be Light...and no floor joints or cracks". En: Concrete Internacional Magazine, 1996. pp. 32-37.

¹⁶ DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

¹⁸ AVENDAÑO, A. Radier Postensado. En: Boletín de Información Tecnológica, Cámara Chilena de la Construcción. Julio de 1999. Nro. 14, pp.27-28.

Comparado con el reforzamiento convencional, el postensado provee una vida de servicio más larga y una capacidad de carga mayor, con un menor mantenimiento. Los pisos postensados han sido usados exitosamente en todo el mundo para diversas soluciones de logística y manufacturación, grandes bodegas de carga y otras estructuras³.

3.5. IRREGULARIDADES EN PISOS

El concreto es un material indulgente; no obstante, la calidad del concreto puede ser afectada adversamente por condiciones sobre las cuales el diseñador o constructor tiene poco control. Raramente habrá una sola causa para una imperfección dada; usualmente alguna combinación será la responsable¹.

Según el documento ACI302.1R-15, es más probable obtener resultados satisfactorios si se evitan cuidadosamente las causas para las varias clases de imperfecciones¹.

3.5.1. Agrietamiento. Es generado por la restricción (interna o externa) del cambio de volumen, comúnmente originado por una combinación de factores tales como contracción por secado, contracción térmica, alabeo y asentamiento del sistema de soporte del suelo y de las cargas aplicadas.

El agrietamiento es producido por restricción de los cambios de volumen, éstos serían de poca consecuencia si el concreto estuviera libre de restricción. Pese a que el concreto está usualmente restringido por las cimentaciones, la subrasante,

³ HEYMANNS, Paul; STRUCTURAL SYSTEMS AFRICA. Post-tensioning: the right solution. En: Civil Engineering, South African Institution of Civil Engineering. Agosto de 2011, pp. 47-49.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

el refuerzo o los mientras de conexión, se desarrollan esfuerzos importantes en tensión.

La contracción por secado puede disminuirse si se toman medidas para colocar el concreto con el contenido de agua más bajo posible, no obstante, deben emplearse buenas prácticas para no ocasionar agrietamientos indeseables, algunas de ellas son¹:

- a) Juntas de contracción no ubicadas a distancia demasiado grandes.
- b) Juntas de contracción lo bastante profundas.
- c) Juntas de contracción selladas oportunamente.
- d) Losas no fuertemente restringidas en sus perímetros por adherencia del concreto de piso o losa a la cimentación, muros u otra construcción, o por refuerzo que conecta a cimentaciones, plataformas de carga o muros.
- e) Juntas de aislamiento alrededor de las columnas,
- f) Acero de refuerzo adicional colocado diagonalmente en esquinas entrantes.
- g) Mezclas de concreto de resistencia necesaria con la cantidad apropiada de cemento y agua.
- h) Curado apropiado.
- i) Losas restringidas por una superficie de apoyo dispareja y variaciones en el espesor de la losa.
- j) Refuerzo discontinuo a través de las juntas, que alienta la abertura de las juntas.
- k) Losas colocadas encima de una subbase que tiene un bajo coeficiente de fricción, tal como piedra triturada granulometría fina.

El agrietamiento puede ocurrir a edades tempranas, inclusive antes de que el concreto haya endurecido, esto complica considerablemente las operaciones de acabado¹.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

3.5.1.1. Agrietamiento por contracción plástica. Son grietas poco profundas, relativamente cortas, que pueden ocurrir antes del acabado final en días cuando el viento, la baja humedad atmosférica y las altas temperaturas del concreto y ambientales también ocurren. La humedad superficial se evapora más rápidamente de lo que puede reponerse mediante el agua de sangrado que aflora, por lo que la superficie se contrae más que el interior. A medida que el concreto interior restringe la contracción del concreto de la superficie, se desarrollan los esfuerzos que exceden la resistencia de tensión del concreto, lo que da por resultado grietas superficiales¹.

Estas grietas varían en longitud desde 10 a 100 centímetros, pueden ser aproximadamente paralelas entre sí y separadas alrededor de 10 a 60 centímetros, pero usualmente siguen un patrón no definido e irregular¹.

Las grietas por contracción plástica en estado todavía no endurecido, pueden ser cerradas apisonando y golpeando la superficie con una llana manual, no obstante, las medidas de protección más efectivas son¹:

- a) Humedecer la subbase cuando no se emplea retardador de vapor.
- b) Colocar rompevientos.
- c) Colocar parasoles.
- d) Enfriar los agregados y el agua antes de mezclar.
- e) Impedir el secado rápido de la superficie de concreto.

3.5.1.2. Agrietamiento aleatorio sin patrón definido. Consiste en un patrón de grietas muy delgadas que no penetran mucho debajo de la superficie; es causado por contracción menor superficial. Las grietas son muy finas y apenas visibles. Las

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

grietas circundan pequeñas áreas de concreto de dimensiones menores, aproximadamente 50 mm, formando un patrón como de tela de gallinero. Aunque las grietas aleatorias pueden dar mal aspecto y pueden acumular suciedad, el agrietamiento no es estructuralmente serio y no indica necesariamente el comienzo de deterioro futuro en las losas¹.

Cuando el concreto empieza a ganar resistencia, las condiciones del clima, sobre todo la humedad relativa durante el periodo de secado en un ciclo de mojado y secado, son una causa importante de este agrietamiento¹.

Para impedir este agrietamiento, los procedimientos de curado deberán comenzar inmediatamente, especialmente cuando las condiciones atmosféricas son adversas. El concreto se debe proteger contra cambios rápidos de temperatura y humedad siempre que sea factible¹.

3.5.1.3. Agrietamiento a largo plazo. El agrietamiento a largo plazo es producido por causas diferentes a la contracción. Las principales causas son¹:

- a) Apoyo disparejo de la subrasante, o subbase por deficiente preparación, mal drenaje o apoyo disparejo a consecuencia del ondulado de las orillas de la losa.
- b) Presencia de arcilla expansiva en la subrasante.
- c) Sulfatos en el suelo de la subrasante o agua subterránea.
- d) Colocación de concreto sobre relleno preformado de juntas (al colocar concreto adyacente).
- e) Juntas y sellos inadecuados.
- f) Sobrecarga estructural, especialmente en seguida de la fase de construcción del piso en un proyecto de edificación.
- g) Cargas por impacto.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

- h) Fractura por corrosión del acero de refuerzo.
- i) Fractura por congelación y deshielo a lo largo de las orillas y de esquinas.
- j) Movimientos de tierra generados por obras contiguas (Ej. construcción de pilotes).
- k) Contracción térmica, tal como una caída aguda de la temperatura ambiental al acabar de colar un piso o losa.
- l) Tránsito de construcción en forma prematura o excesiva.
- m) Diseño inadecuado que conduce a una losa de espesor insuficiente para las condiciones de servicio.

3.5.2 Alabeo. Es la deformación de las esquinas y orillas de una losa a causa de diferencias en el contenido de humedad o de la temperatura entre las partes superior e inferior de una losa. La parte superior se seca completamente o se enfría y se contrae más que la parte inferior, más húmeda y más caliente. Si la sección alabeada de una losa recibe carga más allá de la resistencia a la flexión del concreto, se desarrollarán grietas paralelas a las juntas en las cuales ocurre el alabeo ¹.

Para disminuir las ondulaciones en las losas se recomienda¹:

- a) Igualar el contenido de humedad y la temperatura entre la parte superior y la inferior de una losa.
- b) Usar una mezcla de concreto con características de contracción baja, es decir, una mezcla de concreto áspero con agregado grueso de tamaño máximo en la cantidad más alta compatible con la trabajabilidad requerida.
- c) Emplear una subbase permeable seca (porosa).
- d) Utilizar concreto con compensación de contracción.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

- e) Colocar una cantidad generosa de refuerzo en el tercio superior de la losa.
- f) Aplicar técnica de postensado.

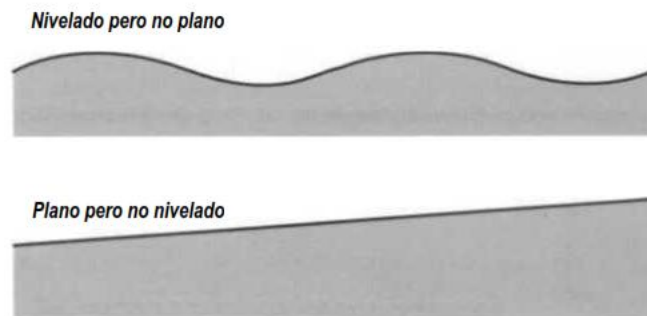
3.6. REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PISOS INDUSTRIALES

El perfil en la superficie del piso es un parámetro que debe ser controlado, con el fin de obtener un funcionamiento eficiente, la rigurosidad con la que se lleve a cabo este control depende de la calidad de piso que se desea. Hay pisos que requieren mayor control en la regularidad, siendo el caso de manejo de materiales en grandes alturas con equipos especiales¹⁹.

La regularidad superficial es limitada en dos factores: el piso debe tener una planicidad apropiada (flatness), con el fin de impedir en general la inestabilidad de los equipos de carga de material, y una nivelación apropiada (levelness), con el fin de asegurar que toda el área del piso pueda brindar un servicio eficiente para las cargas móviles y estáticas, tal como ilustra la Figura 7. La regularidad inapropiada del piso, puede resultar en que las operaciones sean más lentas, reduciendo productividad y requiriendo altos mantenimientos¹⁹.

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

Figura 7. Nivelación y planicidad



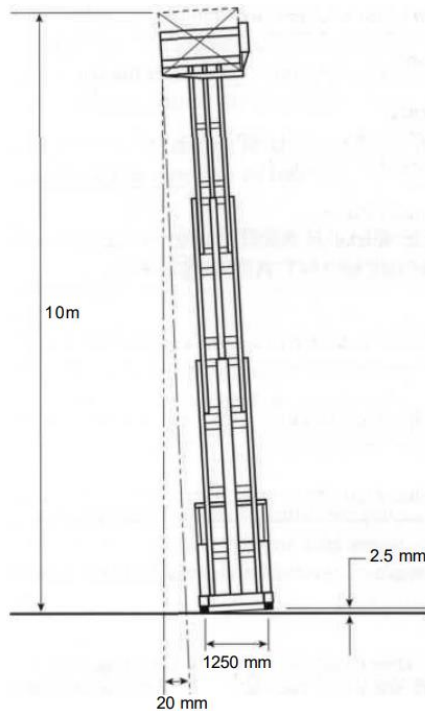
Fuente: Adaptado de THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016.

En lo que afecta a la regularidad superficial conviene distinguir entre las que tienen un tránsito de vehículos con trayectorias determinadas, normalmente porque los vehículos están guiados por perfiles metálicos o por inducción magnética, que se denominan instalaciones con tránsito definido o guiado; y las que tienen un tránsito vehicular o peatonal sin trayectorias determinadas².

Los equipos de levante están diseñados para operar a pleno rendimiento y con seguridad en pavimentos planos y horizontales. Si las condiciones del pavimento no cumplen con lo anterior, los equipos de levante pueden ser inestables disminuyendo significativamente su rendimiento, como se observa en la Figura 8. No obstante, es importante reconocer que una superficie perfectamente plana no se puede conseguir y que el costo de terminación aumenta a medida que se requieren mejores terminaciones superficiales².

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

Figura 8. Inclinación estática de cargador trilateral



Fuente: Adaptado de THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016.

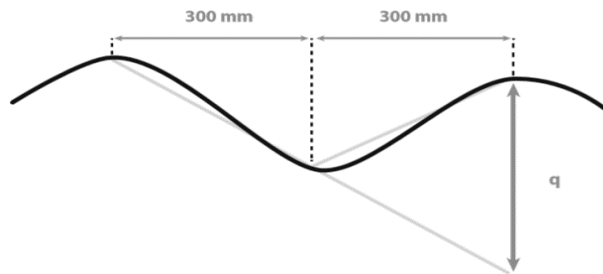
3.6.1. Sistema de Números F. El sistema de números-F utiliza dos parámetros para caracterizar la regularidad superficial, el número FF (Floor-Flatness) que define la planicidad y el número FL (Floor-Levelness) que define la nivelación u horizontalidad del pavimento¹⁹.

El número FF controla la curvatura local de la superficie mediante la limitación de la magnitud de cambios de pendiente en tramos sucesivos de 30 centímetros y el número FL, controla la correspondencia local respecto a la rasante de diseño sobre

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

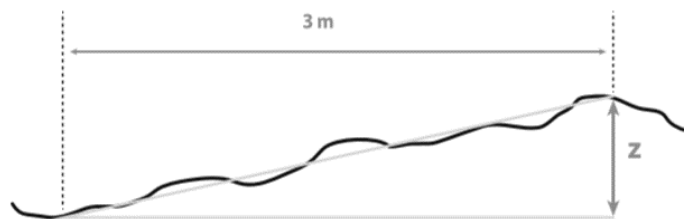
distancias de 3 metros¹, tal como se puede observar en las Figuras 9 y 10. Ambos parámetros se determinan a lo largo de líneas de medición de conformidad con lo indicado por la organización ASTM en el documento ASTM E 1155²⁰.

Figura 9. Valoración de curvatura de planicidad (FF)



Fuente: SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013.

Figura 10. Valoración de curvatura de nivelación (FL)



Fuente: SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013.

El par de números-F siempre se escribe en el orden secuencial FF/FL (Ejemplo 45/35). En la práctica los valores se ubican generalmente entre 12 y 45 tanto para FF como para FL, a menos que se requiera un piso especial con alto grado de

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

²⁰ [20]. ASTM International. ASTM E1155-14 Standard Test Method for Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2014.

regularidad. A medida que aumentan los números FF y FL, se obtiene un piso de mayor calidad¹.

La planicidad es el resultado de la destreza del operario para manejar los equipos de allanado, mientras que altos números de nivelación, son gracias al trabajo de nivelación de la formaleta y las labores de enrasado, renivelado y extendido del concreto¹⁹.

En la Tabla 3, se presenta una guía propuesta en el documento ACI302.1R-15, de los valores típicos de números-F definidos para distintos usos¹.

Tabla 3. Guía para el uso típico de planicidad y horizontalidad en losas sobre terreno.

Planicidad	Horizontalidad	Uso típico	Regularidad
20	15	Cuartos de máquinas no críticos, áreas no públicas, superficies que van a tener un piso elevado para computadoras, superficies con revestimiento grueso y losas estructurales de estacionamiento.	Corriente
25	20	Áreas alfombradas de edificios de oficinas y comerciales con tránsito ligero.	Normal
35	25	Piso de revestimiento delgado o piso de bodegas con tránsito moderado o pesado.	Plana

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

45	35	Bodegas con uso de paleta neumática, pistas de patinaje o pisos para gimnasia.	Muy plana
>50	>50	Estudios de cine o televisión, naves industriales.	Super plana

Fuente: Adaptado de ACI Committee 302. *Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015.

3.6.2. Medición de la regularidad. Existen diferentes equipos para medir la regularidad superficial, entre los más usuales se destacan²¹:

- a) Reglas.
- b) Inclínómetros digitales DIPSTICK.
- c) Niveles ópticos.
- d) Niveles láser.
- e) Perfilógrafos.

Concretamente para las reglas, y a pesar que su uso se encuentra muy difundido por todo el mundo, no existe normativa que especifique las condiciones requeridas para la medición de la regularidad superficial.

Los aparatos del tipo DIPSTICK miden la inclinación a través de la diferencia de nivel existente entre dos puntos separados entre sí 300 milímetros, con este tipo de equipo se consigue una precisión del orden de $\pm 0,1$ milímetros. Suelen estar equipados con un pequeño computador portátil, con capacidad suficiente para

²¹ ARIAS L., Germán Darío. Irregularidades superficiales de pisos y losas: Mantenimiento y reparación. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

guardar las medidas realizadas y generar los cálculos necesarios, tal como se ilustra en la Figura 11.

Los DIPSTICK son los equipos más apropiados para cuantificar la regularidad superficial de cualquier pavimento pues tienen una gran precisión, son fáciles de transportar y usar, pueden adaptarse para medir los parámetros de los números-F, proporcionando perfiles longitudinales bastante exactos del pavimento².

Figura 11. Dispositivos de medición de regularidad



Fuente: ARIAS L., Germán Darío. Irregularidades superficiales de pisos y losas: Mantenimiento y reparación. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

Los perfilógrafos son equipamientos móviles de medida equipados con ruedas sensoras, capaces de registrar, de forma continua, el desnivel entre las mismas, como muestra la Figura 12. Por norma están equipados con 4 ruedas sensoras, pudiendo adaptarse su separación de acuerdo con la separación de las ruedas de cualquier equipo de levante o vehículo de carga, permitiendo obtener las diferencias de nivel transversales y longitudinales de la zona donde efectivamente circulan².

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

Figura 12. Dispositivo perfilógrafo de medición de regularidad



Fuente: SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013.

Como limitación, no consiguen proporcionar el perfil longitudinal de cotas. Estos instrumentos están especialmente indicados para pasillos con tráfico definido y para cuando se conoce concretamente el tipo de equipo de levante que será utilizado. Su precisión depende de la distancia entre las ruedas sensoras, pero se puede decir que, para separaciones del orden de los 2 metros, la precisión es de $\pm 0,1$ milímetro².

4. METODOLOGÍA DE DISEÑO

4.1. NORMATIVA EXISTENTE

4.1.1. Normativa Colombiana. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en el Capítulo 18 abarca los requerimientos generales para los sistemas presforzados. Algunos de estos requerimientos son citados en el presente

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

documento⁴. No obstante, normativamente no se hace referencia específica al diseño de pisos industriales.

Según el comentario CR.18.1.1 de NSR-10 *“Las disposiciones del capítulo C.18 se desarrollaron principalmente para elementos estructurales tales como losas, vigas y columnas que se utilizan comúnmente en las edificaciones. Sin embargo, muchas de estas disposiciones pueden aplicarse a otros tipos de estructuras, tales como recipientes a presión, pavimentos, tuberías y durmientes. Para los casos que no se citan específicamente en el Título C del Reglamento NSR-10, la aplicación de las disposiciones se deja al criterio del profesional facultado para diseñar”*⁴.

El Instituto Nacional de vías de INVIAS, en su manual de diseño de pavimentos en concreto, hace referencia al diseño de pisos que van a ser sometidos a cargas de vehículos de llantas neumáticas, las tablas de diseño y espesores dados están en función de camiones de diseño y diversos factores propios de vías de circulación nacional, luego, aunque no es un manual con criterios de diseño para pisos industriales, expresa diversos factores asociados al terreno de soporte, calidad de los materiales y consideraciones constructivas que son válidos para el estudio de pisos industriales¹³.

“Los espesores dados en el manual de diseño de pavimentos de concreto, está dirigido a solicitudes de vehículos con llantas neumáticas, por lo tanto, pavimentos que han de ser solicitados por otro tipo de vehículo requieren que se diseñen teniendo en cuenta las particularidades de dichos vehículos. En la literatura técnica se consiguen cartas, nomogramas y manuales para calcular el espesor de las losas para prácticamente cualquiera de los vehículos y medios para el manejo y

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

¹³ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; ÁLVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008. 114 p.

almacenamiento de cargas en forma de arrumes, estanterías o contenedores. En general se recomienda que el espesor de cualquier losa para pavimentos de concreto no tenga menos de 13 cm de espesor y que la longitud de las losas no sea mayor a 25 veces el espesor ni mayor a 1,3 veces el ancho de la misma”¹³.

4.1.2. Normativa Americana. El comité 360 del Instituto Americano del Concreto en su documento ACI360R-10, “Guide to Design Slabs-on-Ground”, presenta información para el diseño de losas sobre terreno principalmente para pisos industriales.

Este documento recopila información de teorías de diseño, tipos de losas, sistemas de soporte de suelo, cargas y juntas. Los métodos de diseño son dados para concreto simple, concreto reforzado, concreto postensado, concreto de retracción compensada y concreto reforzado con fibras, además presenta una serie de ejemplos de diseño. Es la normativa más completa, presenta un capítulo exclusivo al diseño de pisos postensados⁵.

“Esta guía cubre el diseño de losas sobre terreno para cargas de material almacenado en la losa, cargas de estantería, cargas estáticas y dinámicas asociadas a los equipamientos y vehículos. Otras cargas como las cargas de cubierta transferidas por estanterías con doble propósito también son mencionas. Esta guía discute la capacidad de soporte del suelo, acortamiento y efectos de temperatura, agrietamiento y alabeo”⁵.

4.1.3. Otras normativas internacionales de referencia. “El Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, con el apoyo de un grupo de profesionales conocedores

¹³ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; ÁLVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008. 114 p.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

de la problemática y expertos en la materia, crean el Comité de Pisos Industriales y con ello el Manual de diseño de pisos industriales”². Este manual tiene como referencia en la mayoría de sus capítulos la guía americana ACI360R-10.

Para el Reino Unido, la asociación *The Concrete Society* elaboró el reporte técnico: *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction* TR34⁷. Este reporte es una guía completa para el diseño de pisos industriales, abarca las solicitaciones de carga, regularidad superficial, requerimientos del terreno, reforzamiento, diseño de juntas, evaluación de esfuerzos, consideraciones constructivas y de mantenimiento. No incluye dentro de sus capítulos el estudio de la tecnología de postensado, no obstante, los análisis allí mencionados son aplicables al estudio de este documento¹⁹.

4.2. ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES

4.2.1. Concreto. Ya que la reducción al mínimo de la contracción es primordial, se debe prestar atención especial a la selección de las proporciones para la mezcla de concreto. Las características de contracción de una mezcla de concreto se pueden determinar siguiendo el documento elaborado por la organización ASTM en el documento ASTM C 157²². Es esencial que el concreto empleado en estas pruebas se haga con los mismos materiales que se vayan a ocupar en la obra.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

⁷ THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016.

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

²² [22]. ASTM International. ASTM C157/C157M-17 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2017.

Se debe verificar que el concreto no experimentará excesivas demoras, tiempo de fraguado diferencial o problemas de formación de costras superficiales bajo las condiciones de temperatura y humedad esperadas en el proyecto. Si es posible, el contratista deberá tener la oportunidad de revisar las proporciones de mezcla propuestas y preparar un colado de prueba para verificar la trabajabilidad, la calidad de acabado y el tiempo de fraguado para el uso propuesto¹.

Según requerimientos de NSR-10, los pisos y las losas de concretos sujetos a exposiciones moderadas y severas de congelación y deshielo, deberán tener una a/c ⁸ no mayor que 0,50. El concreto sujeto al empleo de sustancias químicas descongelantes deberá tener una relación a/c no mayor de 0,45. Concreto reforzado expuesto a agua salada, agua de mar, sustancias químicas y otros materiales agresivos relación a/c de 0,40⁴.

Se debe tener en cuenta que las resistencias del concreto logradas a través de contenidos más altos de material cementante únicamente pueden afectar adversamente las características de contracción y tenacidad (módulo de elasticidad del concreto)¹.

Según la clase de piso expuesto en la Tabla 2 del presente documento, el Comité 302 del Instituto Americano del Concreto, recomienda resistencias mínimas a compresión y asentamientos máximos como se observa en la Tabla 4 de este documento¹.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

⁸ Relación agua cemento.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

Tabla 4. Resistencia mínima a compresión del concreto a los 28 días.

Clase de piso	Resistencia a la compresión f'_c a los 28 días.	Asentamiento máximo
	MPa	mm
1, 2 y 3	21	125
4, 5 y 6	24	125
7 base	24	125
7 superficie de desgaste adherida	55	75
8 superficie de desgaste no adherida	28	75
9 super plano	28	125

Fuente: Adaptada de ACI Committee 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015.

Normalmente cuando se usa la metodología de pisos postensados, los requerimientos del piso serán Tipo 9 (super plano), luego la resistencia mínima a compresión será de 28 MPa.

El esfuerzo a flexión es determinado por el módulo de ruptura (M_R), según procedimiento descrito por ASTM en el documento ASTM C78 (*Flexural Strenght of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading*)²³.

Usualmente es usada la resistencia a los 28 días como el esfuerzo de diseño del piso. Según el comité Europeo del Concreto, es posible estimar el esfuerzo a flexión con la fórmula²⁴:

²³ ASTM International. ASTM C78/C78M-18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken, PA; ASTM International, 2018.

²⁴ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

$$M_R = 0,78\sqrt{f'_c} \quad (EC - 16)[24]$$

Siendo f'_c el esfuerzo a compresión en el concreto y M_R el módulo de rotura en el concreto, ambos en unidades de MPa.

4.1.2. Acero de refuerzo. Según NSR-10, el refuerzo debe ser barras corrugadas de baja aleación que cumpla con lo dispuesto por el ASTM en el documento ASTM A706M²⁵, con un esfuerzo de fluencia no menor que 420 MPa⁴. Éste, será acero de refuerzo pasivo usado en zonas de anclaje de aplicación de presfuerzo.

4.1.3. Acero de presfuerzo. Acero de alta resistencia que se utiliza para presforzar el concreto, comúnmente es un cable de siete hilos, donde un cable central es rodeado por los demás en forma de trenza. Es el elemento del torón que se alarga y se ancla para proporcionar la fuerza requerida de presforzado²⁶.

Según el Artículo C.3.5.6 de NSR-10, el acero de preesfuerzo debe cumplir con una de las siguientes normas elaboradas por la organización ASTM⁴:

- a) Alambre: ASTM A421M²⁷.
- b) Alambre de baja relajación: ASTM A421M²⁷.
- c) Torón: ASTM A416M²⁸.

²⁵ ASTM International. ASTM A706/A706M-16 Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2016.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

²⁶ COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006. 96 p.

²⁷ ASTM International. ASTM A421/A421M-15 Standard Specification for Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2015.

²⁸ [28]. ASTM International. ASTM A416/A416M-18 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.

d) Barras de alta resistencia: ASTM A722M²⁹.

4.1.4. Sistema monotorón. Para el diseño de pisos industriales, normalmente es usado el sistema monotorón, el cual consiste en un mecanismo completo constituido por anclajes, acero para presfuerzo, recubrimiento y revestimiento. El acero de presfuerzo consiste en un solo torón de 7 alambres, donde están trenzados 6 alambres a lo largo de un hilo central²⁶.

El torón es fabricado en acero de alta resistencia y debe cumplir con los requerimientos dados por ASTM, expuestos en las Tablas 5 y 6 del presente documento²⁸.

Tabla 5. Características torones grado 270 de baja relajación.

Esfuerzo último mínimo	fpu (MPa)	1.860
Esfuerzo de fluencia	Cuando	$\epsilon = 1.00\%$
	fpy min (MPa)	1.674
Módulo de elasticidad	Eps (MPa)	200.000

Fuente: Adaptado de ASTM International. ASTM A416/A416M-18 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.

²⁹ ASTM International. ASTM A722/A722M-18 Standard Specification for High-Strength Steel Bars for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2018.

²⁶ COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006. 96 p.

²⁸ ASTM International. ASTM A416/A416M-18 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.

Tabla 6. Principales características de torones por diámetro nominal.

Diámetro nominal	Área de acero del torón	Fuerza mínima de rotura	Fuerza mínima en fluencia	Peso del torón
in (mm)	in ² (mm ²)	lbf (kN)	lbf (kN)	lbf/1000ft (kgf/1000 m)
0,375 (9,53)	0,085 (54,8)	23 000 (102,3)	20 700 (92,1)	290 (432)
0,500 (12,70)	0,153 (98,7)	41 300 (183,7)	37 170 (165,3)	520 (775)
0,600 (15,75)	0,217 (140,0)	58 600 (260,7)	52 740 (234,6)	740 (1102)

Fuente: Adaptado de ASTM International. ASTM A416/A416M-18 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel for Prestressed Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.

4.1.5. Recubrimiento para tendones no adheridos. Según los requisitos descritos en el Capítulo 18 de NSR-10, los aceros de presforzado no adheridos deben estar recubiertos en un ducto de postensado. El acero debe quedar completamente recubierto y el ducto debe llenarse con un material (grasa) adecuado que asegure la protección contra la corrosión⁴.

El ducto debe ser impermeable y continuo en toda la longitud no adhería tal como ilustra la Figura 13. Además, debe cumplir con los requisitos expuestos por el comité 423 del Instituto Americano del Concreto, en el documento: *Specification for Unbonded Single-Strand Tendon Materials (ACI 423.7-14)*³⁰:

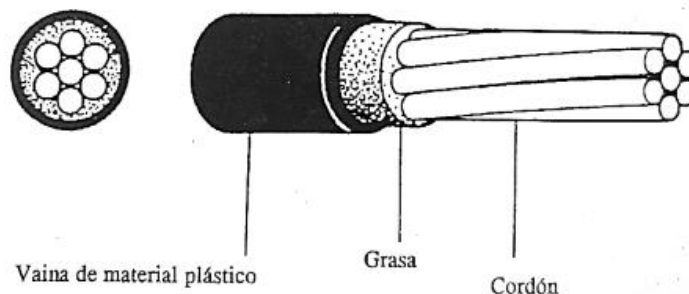
- Suficiente esfuerzo y durabilidad al daño durante su fabricación, transporte, instalación, colocación del concreto y preesfuerzo.
- Impermeable al agua y al vapor de agua sobre toda la superficie a lo largo del ducto.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

³⁰ ACI-ASCE COMMITTEE 423. Specification for Unbonded Single-Strand Tendon Materials (ACI 423.7-14). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2014. 8 p.

- c) Químicamente estable, sin fragilidad o ablandado al ser sometido a temperaturas anticipadas y durante la vida útil de la estructura.
- d) No reactivo con concreto, acero de preesfuerzo, acero de refuerzo y revestimiento de grasa del postensado.

Figura 13. Monotorón en sistema no adherido



Fuente: ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DE PRETENSADO. Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Losas Postensadas con Tendones no Adherentes. Editorial Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1996.

El espesor mínimo del ducto debe ser de 0,05 in (1,27 mm) para polietileno o polipropileno con una densidad mínima de 0,034 lb/in³ (0,941 g/cm³); y un diámetro interno de al menos 0,003 in (0,76 mm) mayor al máximo diámetro del torón³⁰.

El revestimiento (grasa) debe tener las siguientes propiedades³⁰:

- a) Proveer protección contra la corrosión para el acero de presfuerzo.
- b) Proveer lubricación entre el torón y el ducto.
- c) Resistir flujo producto de la gravedad sin exposición a temperatura anticipada.
- d) No debe ser frágil ante exposición anticipada de bajas temperatura.
- e) Ser químicamente estable y no reactivo con el acero de refuerzo, acero de presfuerzo, material del ducto y concreto.

³⁰ ACI-ASCE COMMITTEE 423. Specification for Unbonded Single-Strand Tendon Materials (ACI 423.7-14). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2014. 8 p.

La mínima cantidad de revestimiento no debe ser menor que 250 lb/ ft (37,40 gr/m) para torón con diámetro nominal de 0,5 in (12,7 mm) y 300 lb/ft (44,60 gr/m) para torón con diámetro nominal de 0,6 in (15,25 mm)³⁰.

4.3. METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA CON BASE EN ACI360R-10 [5]

4.3.1. Procedimientos de diseño aplicables en ACI360R-10. A continuación, se enumeran los cuatro métodos de diseños aplicables en el documento del ACI360R-10. Para los efectos de esta guía, se hace énfasis en el tercer método (diseño como piso industrial), que, dentro de su procedimiento, recopila los criterios del primer y segundo método de diseño (espesor y control de agrietamiento)⁵.

4.3.1.1. Diseño por espesor. En este procedimiento, el requerimiento del espesor es determinado incrementando la capacidad de resistencia a flexión en el concreto gracias al esfuerzo residual de precompresión⁵. Los tres métodos aceptados para definir el espesor son los definidos en los diagramas de diseño propuestos en:

- a) *Portland Cement Association design method (PCA)*³¹.
- b) *Wire Reinforcement Institute design method (WRI)*³².
- c) *The U.S. Army Corps of Engineers design method (COE)*³³.

³⁰ ACI-ASCE COMMITTEE 423. Specification for Unbonded Single-Strand Tendon Materials (ACI 423.7-14). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2014. 8 p.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

³² BRADBURY, R. D. Reinforced Concrete Pavements. Washington D.C. Wire Reinforcement Insitute, 1983. 190 p.

³³ DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE. Concrete Floor Slabs-on-Ground Subjected to Heavy Loads, Chapter 15. Washington D.C. 1987.

4.3.1.2. Diseño para control de agrietamiento. Este procedimiento es normalmente usado para losas con cargas ligeras, usualmente no tienen cargas de estantería. El postensionamiento principalmente es usado para incrementar el espaciamiento entre juntas y para proveer una preservación de la planicidad y nivelación del piso. Se debe calcular la fuerza mínima de presfuerzo para proveer una fuerza residual mayor a la tensión resultante de la fricción del suelo, producto del acortamiento y efectos de temperatura. Se recomienda un espesor mínimo de 4 in (100 mm) para proveer el recubrimiento mínimo del refuerzo presforzado⁵.

4.3.1.3. Diseño como piso industrial. Este procedimiento está enfocado en pisos industriales de cargas altas, especialmente para cargas concentradas. Se resume al cumplimiento de los siguientes pasos⁵:

- a) Determinar la geometría de la losa, dimensiones en planta y estimar espesor de la losa, normalmente varía entre 5 a 10 in (125 a 250 mm).
- b) Calcular el coeficiente de arrastre del terreno y las pérdidas por fricción, con el fin de encontrar el espaciamiento entre torones.
- c) Estimar pérdidas a largo plazo para la fuerza efectiva de presforzado. Para pisos sujetos a grandes cambios de temperatura, considerar estos efectos en el concreto para determinar la fuerza efectiva de presfuerzo.
- d) Analizar los efectos de carga usando las ecuaciones de Westergaard o similares para el análisis de esfuerzos bajo cargas concentradas y uniformes.
- e) Verificar que los esfuerzos totales superimpuestos no excedan los valores admisibles. Dependiendo de esto se podría modificar el espesor de la losa y el espaciamiento entre torones.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

4.3.2. Evaluación de cargas. Las losas deben ser diseñadas para la combinación más crítica de las cargas, considerando las variables que produzcan el mayor esfuerzo⁵.

Dependiendo de la carga a la cuál será sometida, las losas pueden superar sus límites admisibles debido a excesos en el esfuerzo de flexión, asentamientos excesivos por presión de suelos y esfuerzos cortantes excesivos².

La estrategia para diseñar la losa de piso, es tener la capacidad de soportar las diferentes respuestas sin factores de seguridad. La respuesta más crítica (consideración de control de diseño) será diferente para diferentes tamaños del área de contacto³¹.

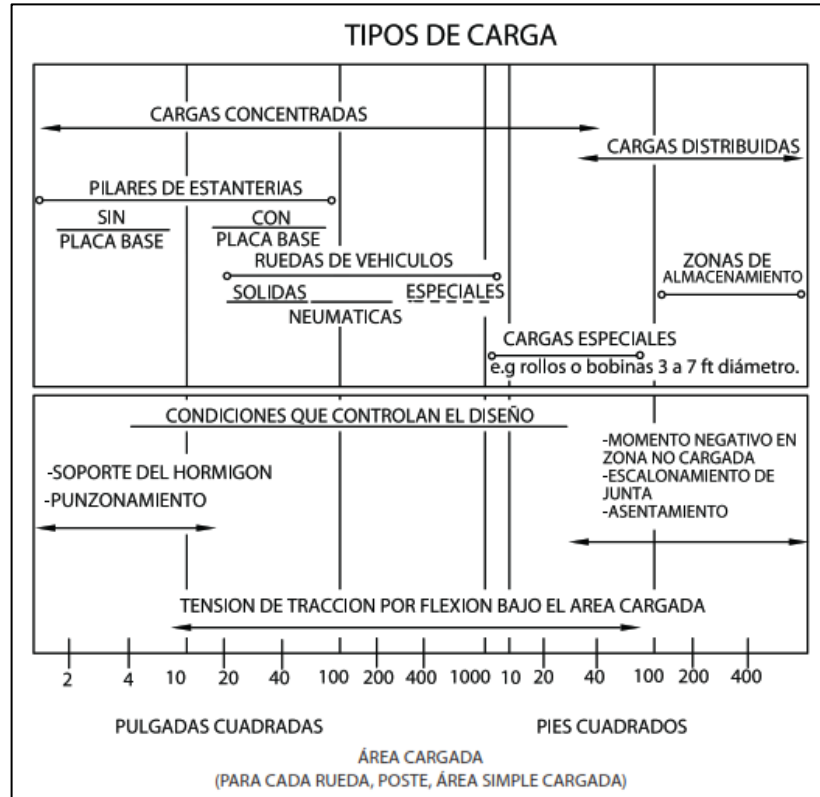
La Figura 14, es una guía con límites aproximados de las consideraciones de control de diseño. Por ejemplo, para un piso donde la carga crítica está dada por los vehículos con llantas neumáticas, las consideraciones de diseño estarán controladas por los efectos de flexión, en los rangos de área de contacto entre 40 a 200 in² (3,70 a 18,60 m²) luego un espesor que cumpla con los requerimientos de esa carga, cumplirá con los esfuerzos generados por demás cargas que se apliquen en un área de contacto similar.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Figura 14. Consideraciones para el control de diseño para varios tipos de cargas en losas sobre terreno



Fuente: Adaptado de PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996.

4.3.2.1. Vehículos. Las cargas vehiculares en pisos industriales consisten en montacargas y camiones de distribución que tienen capacidades hasta de 30 o más toneladas. Las principales propiedades del vehículo que afectan la selección del espesor de la losa son³⁴:

- Máxima carga por eje.
- Distancia entre llantas cargadas.
- Material de la llanta.

³⁴ SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

- d) Presión de inflado.
- e) Área de contacto de la llanta.
- f) Capacidad de carga.
- g) Repetición de carga durante la vida útil.

Para definir las cargas vehiculares sobre un piso industrial, es necesario contar como mínimo con las características presentadas en la Figura 15.

Figura 15. Principales características de montacargas

Capacidad de carga	_____ (kg)
Peso propio	_____ (kg)
Eje: Sencillo _____ Tandem _____	
Ruedas: Metálica _____ Neumáticas _____	
Ancho de la rueda	_____ (cm)
Presión de inflado de la llanta	_____ (kg/cm ²)
Área de contacto	_____ (cm ²)
Separación entre ejes: sd _____ (cm) sr _____ (cm)	

Fuente: SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

En la Tabla 7 se encuentra una recopilación de cargas por eje y separación entre ruedas representativas para diferentes tipos de montacargas, con capacidades de más de 20.000 lb (89 kN), realizada por *The Industrial Truck Association (ITA)* [35]. Cuando son desconocidas las especificaciones del vehículo que va a transitar por el piso, o se espera que cambie en un futuro, es posible usar la Tabla 7 como referencia para efectos de diseño⁵.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

Tabla 7. Cargas por eje y espaciamiento entre ruedas representativas para montacargas

Capacidad de carga del vehículo (lb)	Carga total estática por eje (lb)	Distancia centro a centro entre llantas (in)
2000	5.600 a 7.200	24 a 32
3000	7.800 a 9.400	26 a 34
4000	9.800 a 11.600	30 a 36
5000	11.600 a 13.800	30 a 36
6000	13.600 a 15.500	30 a 36
7000	15.300 a 18.100	34 a 37
8000	16.700 a 20.400	34 a 38
10.000	20.200 a 23.800	37 a 45
12.000	23.800 a 27.500	38 a 40
15.000	30.000 a 35.300	34 a 43
20.000	39.700 a 43.700	36 a 53

Fuente: Adaptado de INDUSTRIAL TRUCK ASSOCIATION. Recommended Practices Manual. Pittsburgh, Pa. 1985.

El área de contacto entre la llanta y la losa es usada en análisis y escogencia del espesor de losa. Es posible aproximar el área de contacto dividiendo la carga de la llanta en la presión de inflado de la llanta. Esta es una aproximación conservadora, ya que no se incluye los efectos de tensión en la superficie de la llanta³¹. La Tabla 8 del presente documento muestra las presiones de contacto usuales para distintos tipos de material de llanta.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Tabla 8. Presión de contacto representativa en función del material.

Tipo de llanta	Presión de contacto (psi)	Presión de contacto (MPa)
Llantas neumáticas	85 a 100	0,6 a 0,7
Llantas metálicas	90 a 120	0,6 a 0,8
Llantas macizas de caucho	180 a 250	1,2 a 1,7
Llantas de poliuretano	> 1000	> 6,9

Fuente: Adaptado de ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015.

Cuando el vehículo de carga tiene llantas dobles, el área de contacto en las ruedas se obtiene sumando el área de contacto de cada una y el área que existe entre ellas³¹.

Se debe encontrar el área de contacto efectiva, para ello se emplea el ábaco de diseño mostrado en la Figura 16 del presente documento, según lo presentado por Cipriano Londoño y Claudia Flórez en el Manual de diseño construcción y mantenimiento de pisos industriales, quienes a su vez se basan en los estudios realizados por Robert Packard^{24 31}. La razón para realizar esta corrección es que el esfuerzo en la losa para áreas de contacto pequeñas es sobreestimado cuando es analizado con la teoría convencional³¹.

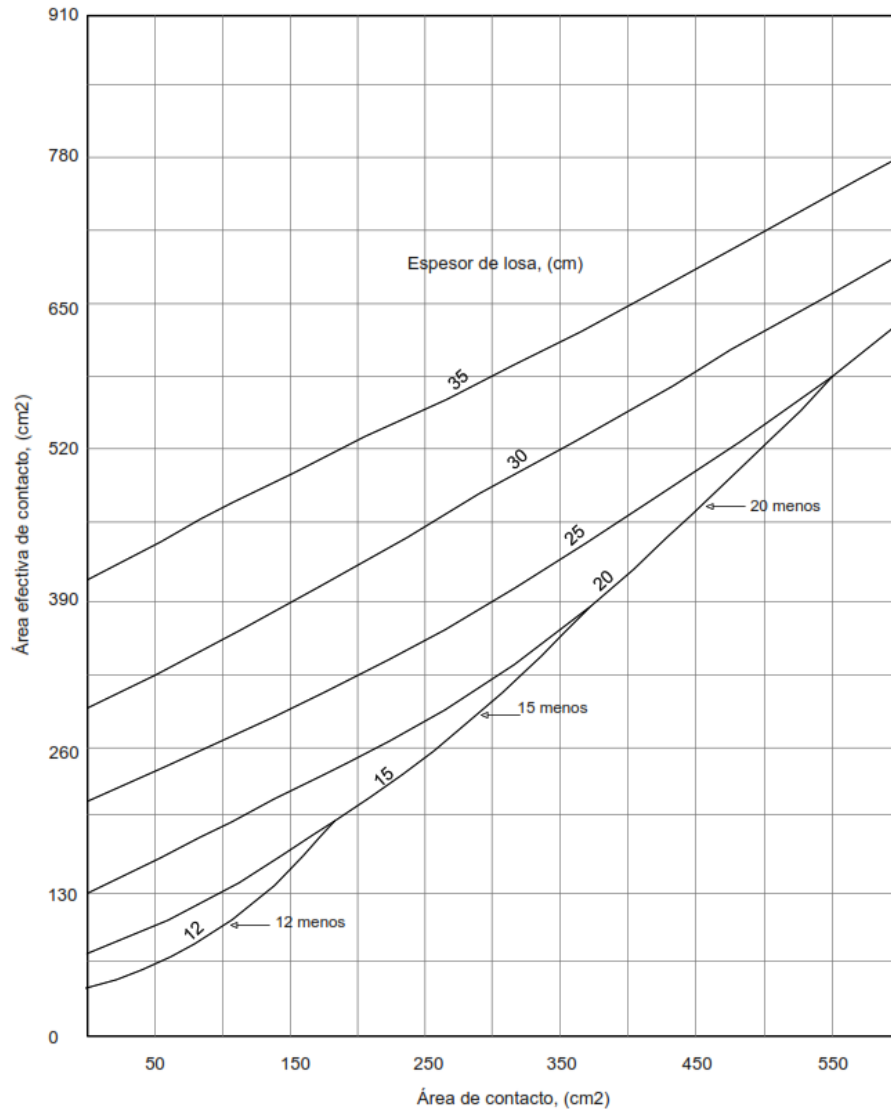
Para usar la Figura 16, se traza una línea vertical que cruce al eje de abscisas en el valor del área de contacto de la carga en cm², donde esta línea cruce con la curva

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

²⁴ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

correspondiente al espesor de la losa se traza una línea horizontal, en el lugar en que ésta última cruce con el eje de ordenadas, será el valor del área efectiva de contacto en cm^2 . Las curvas correspondientes al espesor de la losa pueden ser interpoladas gráficamente.

Figura 16. Área de contacto efectiva dependiendo del espesor de losa



Fuente: Adaptado de LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

4.3.2.2. Cargas concentradas. Uno de los sistemas más comunes del almacenamiento de mercancía 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 tal como ilustra la Figura 17. Las cargas concentradas son las que normalmente controlan el diseño del piso, luego producen esfuerzos a tracción mayores que las cargas distribuidas. La descarga a piso por apoyo de estanterías individuales puede variar de 3.5 a 10 toneladas, en depósitos de grandes alturas podrían acercarse inclusive a 20 toneladas².

Figura 17. Cargas de estantería “racks”



Fuente: SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

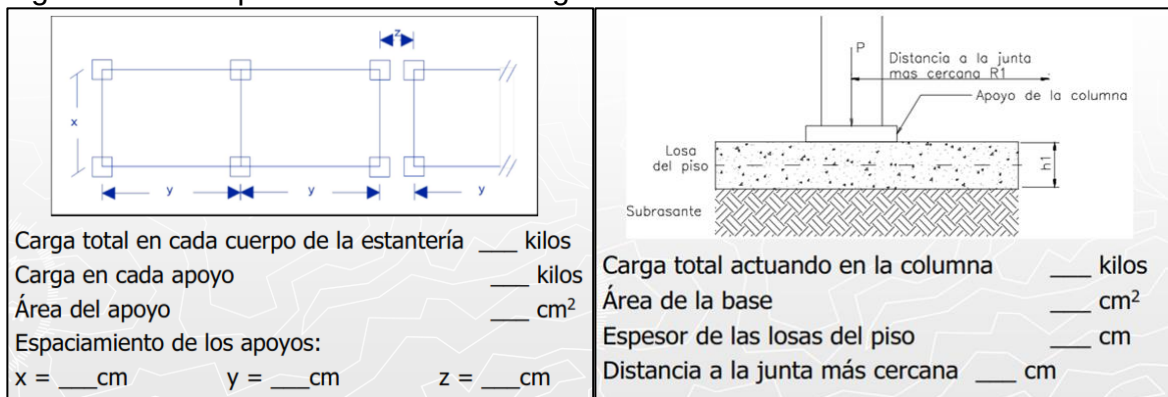
El agrietamiento puede también ser producido por la temprana instalación de sistemas de estanterías que pueden reducir los acortamientos y movimientos térmicos de la losa⁵.

Las variables que afectan el diseño son³⁴:

- Máxima carga representativa.
- Duración de la carga.
- Espaciamiento entre apoyos.
- Localización de la carga concentrada respecto a las juntas.
- Área de contacto entre la base del apoyo y la losa.

La Figura 18, presenta las mínimas características que se deben conocer de las cargas concentradas para el diseño de pisos industriales.

Figura 18. Principal información de cargas concentradas



Fuente: SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

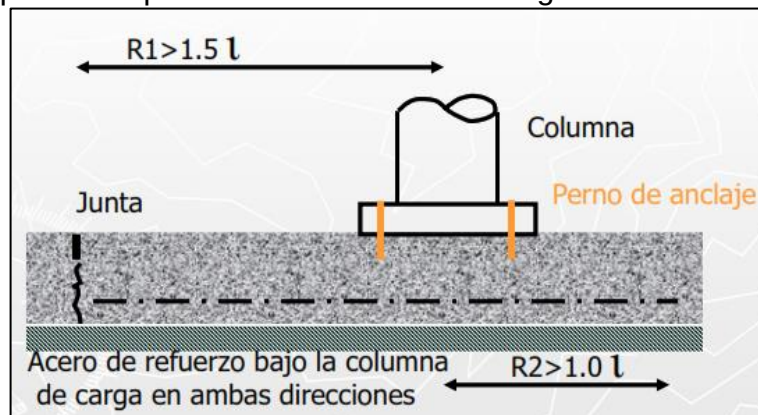
⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

³⁴ SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

Las columnas de carga son también generadoras de cargas concentradas, éstas son comunes en bodegas con estructuras de mezanine que se apoyan directamente sobre la losa tal como ilustra la Figura 19. Por lo general estas cargas son más altas que las generadas por los apoyos de los estantes².

La información de la estantería es normalmente obtenida por el proveedor. Es usual que se especifiquen dimensiones de apoyo más grandes de las usuales, con el fin de reducir los esfuerzos concentrados por la carga. Las dimensiones de la platina de base deben satisfacer una distribución cercana a la homogénea sobre ella².

Figura 19. Disposición típica de una columna de carga



Fuente: SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

4.3.2.3. Cargas distribuidas. En muchas bodegas, los materiales son almacenados directamente en la losa. Los esfuerzos de tensión en la losa son usualmente menores que los producidos por cargas concentradas. El diseño debe prevenir momentos negativos de agrietamiento y prevenir asentamientos excesivos.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

Los principales factores que afectan el diseño de la losa, relacionados a la carga distribuida son⁵:

- a) Magnitud de la carga.
- b) Dimensiones del área cargada.
- c) Ancho del corredor.
- d) Localización de las juntas.
- e) Tiempo de carga durante la vida útil (fija o no fija).

Las magnitudes del esfuerzo de tensión y deflexiones debidas a cargas distribuidas, varían dependiendo del espesor de la losa y el coeficiente de reacción del terreno (k). Además, también dependen del ancho del pasillo y el ancho de la carga. Cuando estos factores son desconocidos en el diseño, es posible utilizar la Ecuación 17 del presente documento, basada en la publicación realizada por Robert Packard³¹:

$$W = 0.033 * \frac{M_R}{F.S} * \sqrt{hk} \quad (EC - 17)[31]$$

donde:

W = Carga admisible (tnf/m²).

M_R = Módulo de rotura del concreto (kgf/cm²).

FS = Factor de seguridad.

h = Espesor de la losa (cm).

k = Módulo de la subrasante (kgf/m³).

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

4.3.3. Factores de seguridad. Los factores de seguridad están en función del servicio que puede llegar a prestar la estructura. Algunos de estos requerimientos para el funcionamiento son⁵:

- a) Minimizar alabeo y agrietamiento.
- b) Incrementar la durabilidad de la superficie.
- c) Optimizar la localización de las juntas.
- d) Maximizar la nivelación y planicidad al largo plazo.

Los valores usualmente usados para los factores de seguridad están expuestos en la Tabla 9 del presente documento, dependiendo del tipo de carga analizado⁵.

Tabla 9. Factores de seguridad frecuentemente usados.

Tipo de carga	Factor de seguridad usado comúnmente	Factor de seguridad usado ocasionalmente
Cargas dinámicas de vehículos	1.70 a 2.00	1.40 a 2.00
Cargas concentradas (estantería y postes)	1.70 a 2.00	Mayores bajo circunstancias especiales
Cargas uniformes	1.70 a 2.00	Límite mínimo 1.40
Cargas lineales	1.70	Límite máximo 2.00
Cargas constructivas	1.40 a 2.00	

Fuente: ACI committee 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010.

4.3.4. Cálculo de la fuerza efectiva de preesfuerzo. Inicialmente se aplica un esfuerzo de tensión en el acero de presfuerzo, de tal forma que se encuentre dentro de su límite elástico²⁶. Según los Artículos C.18.5.1(a) y C.18.5.2(b) de NSR-10 [4],

⁵ ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

²⁶ [26]. COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y

el esfuerzo de tracción en el acero de presfuerzo no debe exceder: 0,80fpu debido a la fuerza del gato y 0,74fpu inmediatamente después de la transferencia (después de pérdidas iniciales).

Luego la fuerza inicial de precompresión (Pj) y la fuerza después de pérdidas iniciales (Pi), se calculan según las expresiones dadas en EC-18 y EC-19 del presente documento⁴.

$$P_j = 0,80 * f_{pu} * A_p \quad (EC - 18)[4]$$

$$P_i = 0,74 * f_{pu} * A_p \quad (EC - 19)[4]$$

donde:

fpu = Esfuerzo último del acero de presfuerzo.

Ap = Área de torón de presfuerzo.

Las pérdidas a largo plazo se calculan según lo descrito en las expresiones EC-10, EC-13 y EC-14 de la sección 3.1.3.2 del presente documento. Luego el total de pérdidas de presfuerzo a largo plazo se expresa en EC-20¹⁰.

$$\Delta f_{PL} = \Delta f_{SH} + \Delta f_{CREEP} + \Delta f_{RT} \quad (EC - 20)[10]$$

donde:

Δf_{PL} = Pérdidas de presfuerzo totales a largo plazo.

Δf_{SH} = Pérdidas de presfuerzo debido a retracción de fraguado.

Δf_{CREEP} = Pérdidas de presfuerzo debido a flujo plástico.

Δf_{RT} = Pérdidas de presfuerzo debido a relajamiento del acero.

Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006. 96 p.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

¹⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

Según las características mencionadas en las Tablas 5 y 6 de la sección 4.1.4 del presente documento, el esfuerzo último mínimo (f_{pu}) de torones grado 270 de baja relajación equivale a 1.860 MPa. Luego la fuerza de precompresión para torones de baja relajación en las diferentes etapas está dada por las expresiones EC-21, EC-22 y EC-23⁴.

$$P_j = 1.488 * A_p \quad (EC - 21)$$

$$P_i = 1.376 * A_p \quad (EC - 22)$$

$$P_e = (1.376 - \Delta f_{PL}) * A_p \quad (EC - 23)$$

donde:

P_j = Fuerza inicial de precompresión inducida por el gato.

P_i = Fuerza de precompresión después de pérdidas iniciales.

P_e = Fuerza efectiva de precompresión, incluyendo pérdidas en el tiempo.

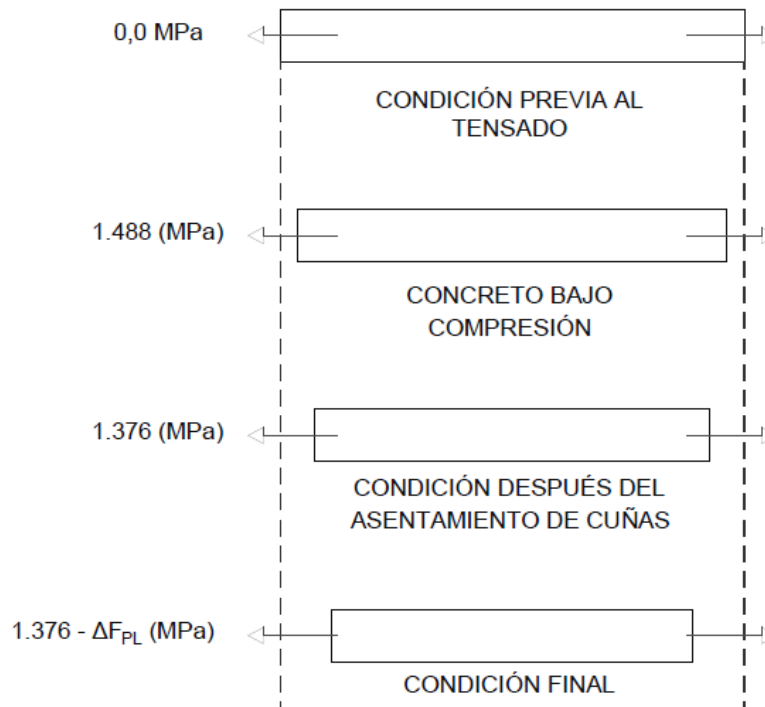
A_p = Área del torón de presfuerzo.

Δf_{PL} = Pérdidas de presfuerzo totales a largo plazo.

En la Figura 20 se observa los esfuerzos de precompresión aplicados al torón de presfuerzo en las diferentes etapas descritas anteriormente.

⁴ COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

Figura 20. Esfuerzo de precompresión en distintas etapas de tensión



Fuente: Adaptado de COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006.

4.3.5. Fuerza requerida para evitar fisuración. Al momento de realizar el postensionamiento, la subbase ejercerá una fuerza de fricción o de arrastre, la cual generará pérdidas en la fuerza efectiva de tensionamiento. De no superar las tensiones resultantes de este arrastre, se estarían induciendo fisuras y agrietamientos en el concreto⁵.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

La fuerza para superar la fricción en la subbase (Pr) está dada por la ecuación (10-1) del documento ACI360R-10⁵ y esta presentada en este documento como EC-24:

$$Pr = W_{\text{losa}} * \frac{L}{2} * \mu \quad (\text{EC} - 24)[5]$$

donde:

W = Peso propio de la losa (kg/m²).

L = Longitud entre juntas o largo de la losa (m).

μ = Coeficiente de arrastre entre la subbase y la losa.

En la Tabla 10, se enuncian los valores recomendados para el coeficiente de arrastre, dependiendo del tipo de material en que se apoya la losa⁵. Para pisos postensados se recomienda el uso de doble capa de polietileno, con el fin de garantizar que el concreto no esté contaminado por la subbase y que se la fuerza de arrastre sea la menor posible.

Tabla 10. Valores recomendados para coeficiente de arrastre

Superficie de apoyo de la losa	Valor de μ
Doble capa de polietileno	0.30 a 0.50
Una capa de polietileno	0.50 a 0.75
Losa sobre arena	0.75 a 1.00

Fuente: Adaptado de ACI committee 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010.

4.3.6. Separación de torones. La separación requerida para superar las pérdidas por fricción y mantener la compresión residual en el centro de la losa está dada por

⁵ ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

la ecuación (10-2) del documento ACI360R-10, y en el presente documento se cita como EC-25.

$$T.S = \frac{Pe}{f_{pr} * W * t + Pr} \quad (EC - 25)[5]$$

donde:

T.S. = Espaciamiento entre torones (m).

Pe = Fuerza efectiva en el torón (kgf).

fpr = Compresión residual efectiva de preesfuerzo en el centro de la losa (kgf/cm²).

W = Ancho unitario de la franja de losa (cm/m).

h = Espesor de la losa (cm).

Pr = Fuerza requerida para evitar fisuración (kg/m).

Es criterio del diseñador determinar el esfuerzo residual de precompresión (fpr) luego de todas las pérdidas de presfuerzo y fricción de la subrasante. Los valores recomendados por el Comité 360 del Instituto Americano del Concreto, se presentan en la Tabla 11 del presente documento⁵.

Tabla 11. Esfuerzo residual de precompresión recomendado

Tipo de losa	Esfuerzo residual de precompresión (fpr)	
	MPa	psi
Fundaciones residenciales.	0.3 a 0.5	50 a 75
Pisos industriales longitudes mayores a 30 m	0.5 a 0.7	75 a 100
Pisos industriales longitudes mayores a 60 m	0.7 a 1.0	100 a 150
Pisos industriales longitudes mayores a 90 m	1.0 a 1.4	150 a 200
Pisos industriales longitudes mayores a 120 m	1.4 a 1.7	200 a 250

Fuente: Adaptado de ACI committee 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010.

⁵ ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

El procedimiento a seguir, consiste en definir un espesor de losa inicial y una separación de torones, buscando cumplir con los límites recomendados de esfuerzo residual (f_{pr}).

4.3.6. Revisión de espesor de losa. El procedimiento para la evaluación del espesor de la losa, será el mismo que se usa para losas no reforzadas, con la diferencia de que el esfuerzo admisible a tensión del concreto, será aumentado por el esfuerzo residual de precompresión. Luego el esfuerzo admisible a tensión del concreto será equivalente al módulo de rotura de presfuerzo (M_{RP}), el cual se calcula como muestra la EC-26⁵.

$$M_{RP} = M_R + f_{pr} \quad (EC - 26)[5]$$

En esta Sección se escoge un espesor de losa a criterio del diseñador, para luego ser evaluado mediante los gráficos de diseño para los diferentes tipos de carga elaborados por Robert Packard³¹, citados por Cipriano Londoño y Claudia Flórez en su Manual de diseño de pisos industriales²⁴, en unidades métricas correspondientes al Sistema Internacional, y presentados en el presente documento como Figuras 21, 22, 23, 24 y 25.

El método de diseño propuesto por Robert Packard [31], usa como variables el módulo de rotura de presfuerzo a tensión, el esfuerzo de trabajo, área de contacto de los vehículos, espaciamiento y módulo de la subbase (k). Está diseñado para cargas interiores. Variaciones en el módulo de elasticidad (E) y coeficiente de Poissons (μ) tienen poco efecto en el espesor de diseño. Los valores usados para

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

²⁴ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

el desarrollo de la metodología de diseño de Robert Packard son $E=28.000 \text{ MPa}$ y $\mu=0,15$ ³¹.

Según el documento ACI360R-10⁵, se permite el uso de otros métodos, tal como se enuncia en la Sección 4.3.1.1 del presente documento.

4.3.6.1. Revisión de espesor por carga de vehículo. La Figura 21 es usada para montacargas industriales con ejes equipados de llantas simples. El dato de entrada en el ábaco es el esfuerzo admisible de trabajo por tonelada de carga de eje. Este esfuerzo admisible se obtiene dividiendo el módulo de ruptura de presfuerzo del concreto en el factor de seguridad escogido para el vehículo. El área de contacto efectiva debe ser calculada del ábaco presentado en la Figura 16 que se encuentra en la Sección 4.3.2.1 del presente documento³¹.

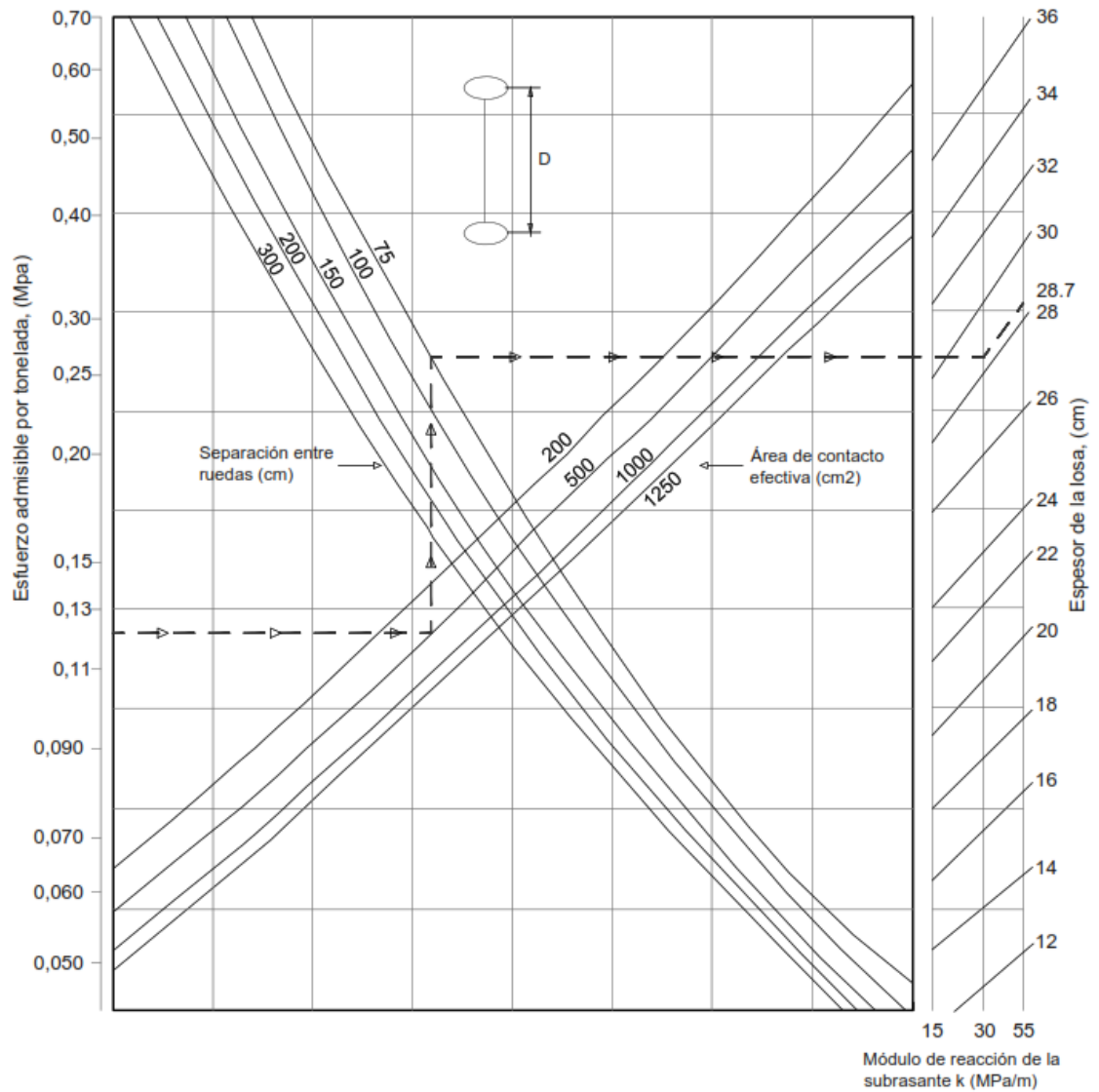
Para ejes equipados con llantas dobles, se usa el ábaco de la Figura 22 combinado con la Figura 21. Inicialmente, de la Figura 22 se obtiene el factor equivalente de carga para convertir la carga por eje de llanta doble en llanta sencilla, luego el esfuerzo admisible de trabajo es multiplicado por este factor para entrar a la Figura 21. Del ábaco se obtiene el espesor de losa requerido, el cuál es comparado con el espesor de losa escogido inicialmente en la Sección 4.3.6 del presente documento³¹.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

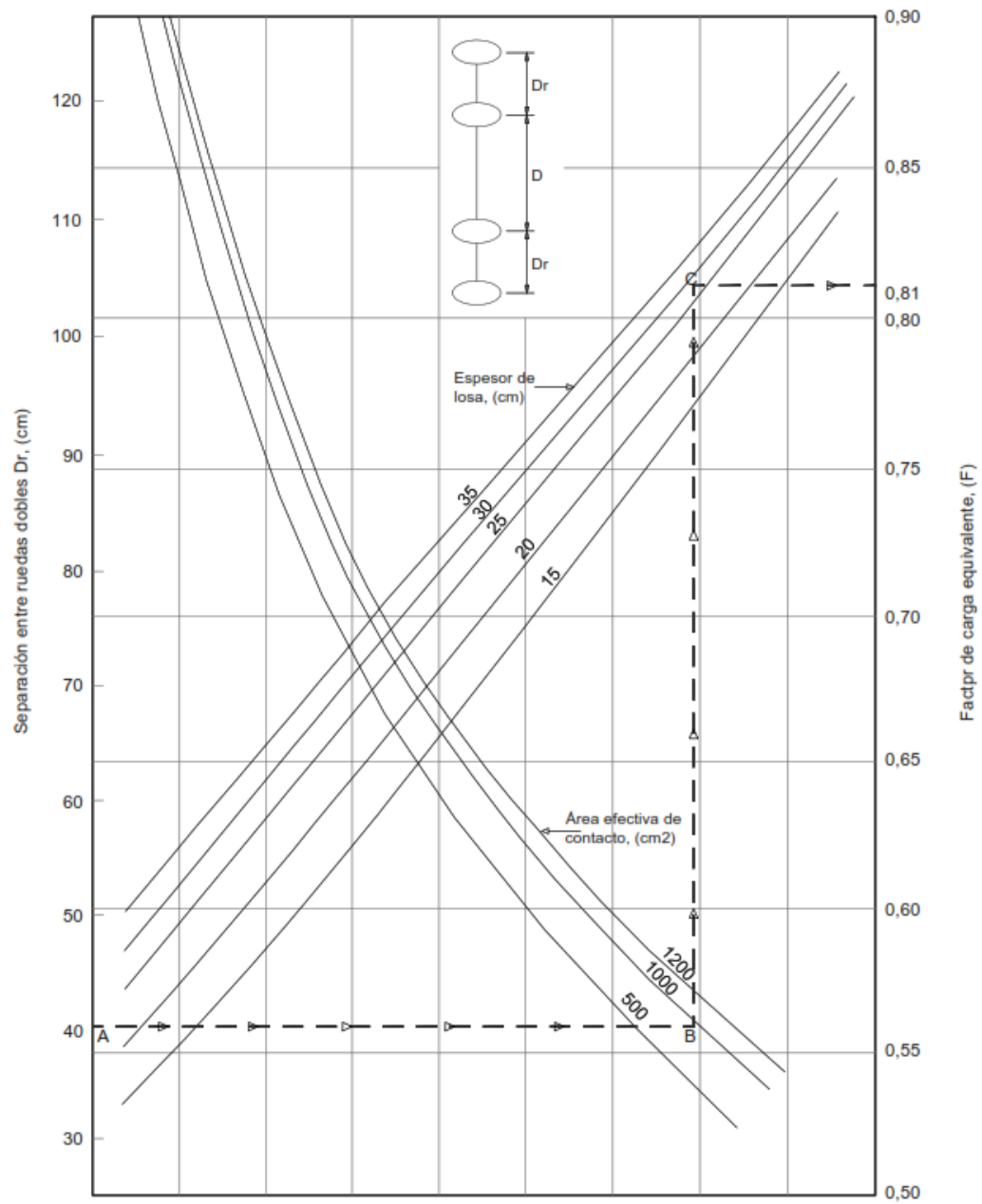
³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Figura 21. Ábaco para determinar el espesor de la losa para vehículos con llantas de eje sencillo



Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

Figura 22. Ábaco para determinar el factor F de carga equivalente para vehículos con llantas de eje doble



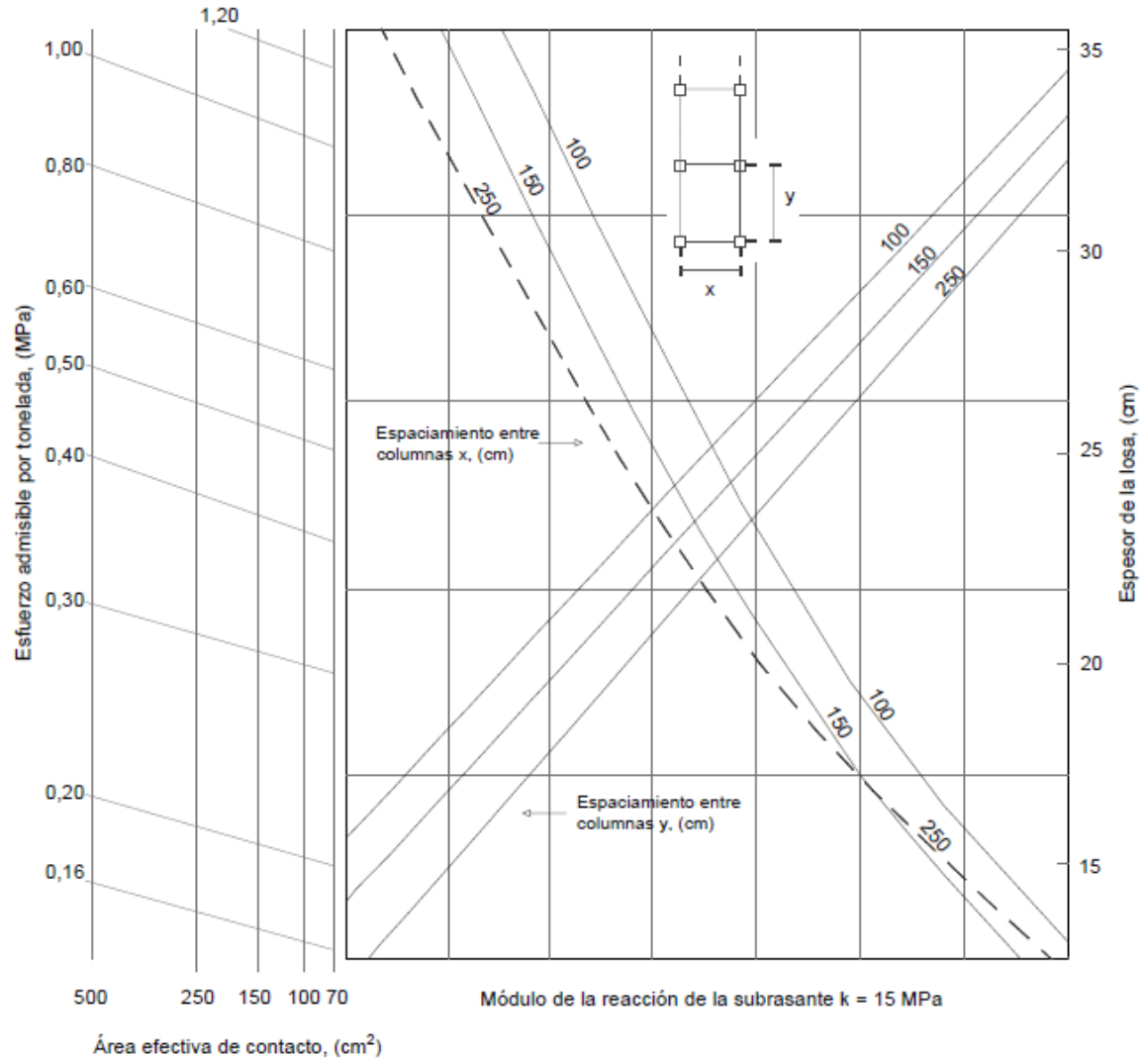
Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

4.3.6.2. Revisión de espesor por carga concentrada. El objetivo del diseño por cargas concentradas es mantener el esfuerzo en la losa dentro de los parámetros de seguridad. Para el rango de las variables de diseño propuestas, la flexión controla el diseño del espesor de losa. Cuando los requerimientos por flexión son satisfechos por un espesor de losa adecuado, las presiones en el suelo no son excesivas y cuando es usada el área apropiada de apoyo, el esfuerzo cortante y punzonamiento en el concreto no es excesivo³¹.

Los ábacos de las figuras 23, 24 y 25, son usados para determinar el espesor de losa requerida para valores de módulo de reacción de la subrasante (k) de 15, 30 y 55 MPa respectivamente. El área de contacto efectiva debe ser calculada según el ábaco presentado en la Figura 16 que se encuentra en la Sección 4.3.2.1 del presente documento. El esfuerzo admisible se obtiene dividiendo el módulo de ruptura de presfuerzo del concreto en el factor de seguridad escogido para la estantería. El espesor obtenido es comparado con el espesor de losa escogido inicialmente en la sección 4.3.6 del presente documento³¹.

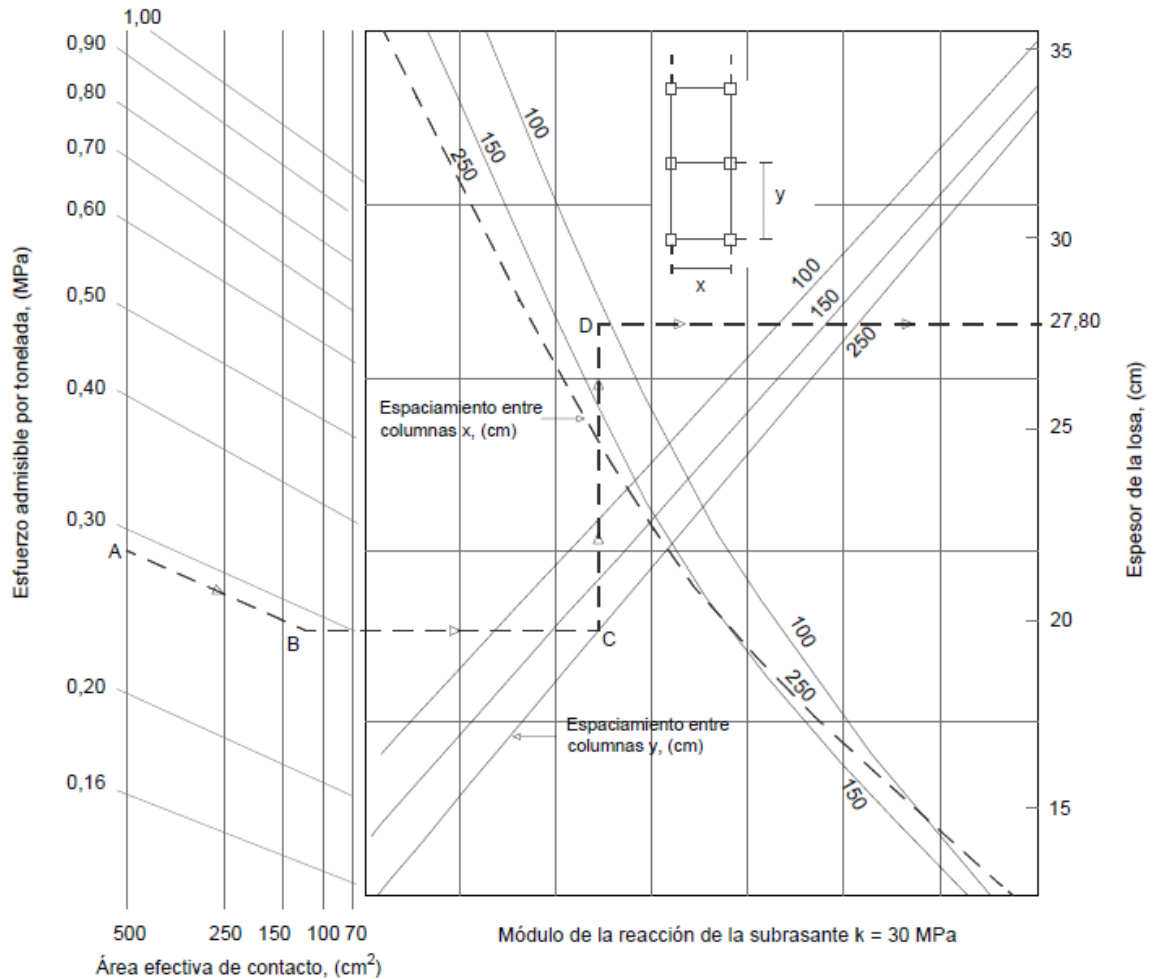
³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Figura 23. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=15\text{MPa}$



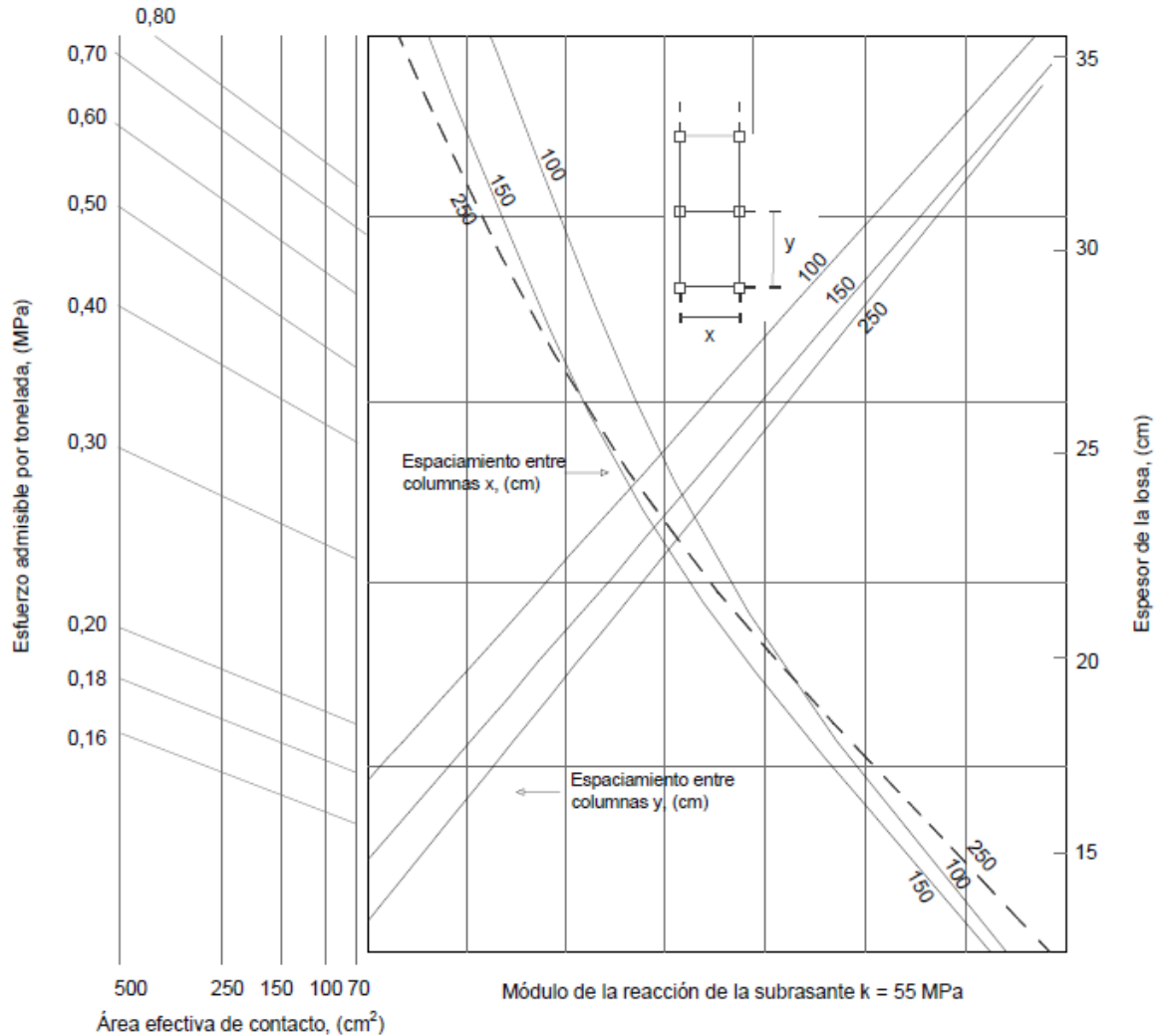
Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

Figura 24. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=30\text{MPa}$



Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

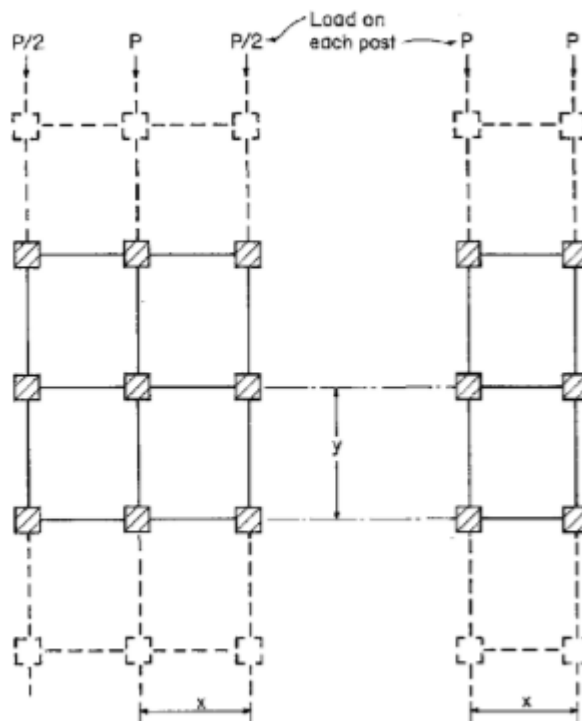
Figura 25. Ábaco para determinar espesor de losa bajo cargas de estantería con módulo de reacción de subrasante $k=55\text{MPa}$



Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

La metodología desarrollada por Robert Packard³¹, fue diseñada con configuraciones de estantería como la que se observa en la Figura 26. Donde (y) representa la distancia entre apoyos en la longitud larga de la estantería y (x) representa la distancia entre apoyos en la longitud corta. Es alcance de la metodología, estanterías de hasta tres (3) ejes en su lado corto, donde (P) representa la máxima carga posible por apoyo³¹. Para configuraciones con desviaciones substanciales a las presentadas, el esfuerzo debe ser determinado por software computacional basado en el análisis de elementos finitos, como por ejemplo el software SAFE³⁶.

Figura 26. Configuración de estantería para método de diseño



Fuente: PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996.

³¹ PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

³⁶ COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. (CSI). Software SAFE. California, US.

4.3.6.2. Revisión de espesor por carga distribuida. Los objetivos del diseño para cargas distribuidas son prevenir agrietamientos en los pasillos angostos debido a momentos negativos y evitar asentamientos en la losa. Usualmente la magnitud de las cargas distribuidas en pisos no es suficiente para causar asentamientos excesivos, sin embargo, para cargas distribuidas altas debe realizarse un estudio de consolidación del suelo³¹.

Cuando las cargas distribuidas no están definidas y estarán expuestas a futuros cambios en el transcurso de su vida útil, para encontrar las cargas admisibles se deberá usar la Ecuación 17 que se encuentra en la Sección 4.3.2.3 del presente documento, modificando el módulo de rotura del concreto (M_R) por el módulo de rotura de presfuerzo del concreto (M_{RP}), o en su defecto, usar la Tabla 12, la cual representa los resultados de la Ecuación 17. Las variables son el espesor de la losa, el módulo del suelo (k) y el esfuerzo de trabajo admisible que está calculado con un módulo de rotura de concreto de 4,4 MPa con un factor de seguridad de 2 (más crítico) y diversos valores de esfuerzo residual de presfuerzo³¹.

Tabla 12. Cargas admisibles para cargas sin distribución fija.

Espesor de losa (cm)	Módulo de subbase k (MPa/m)	(*) (**) Carga admisible (Ton/m ²)				
		Módulo de rotura del concreto $M_R = 4,4$ Mpa				
		$f_{pr} = 1,00$ MPa	$f_{pr} = 1,10$ MPa	$f_{pr} = 1,20$ MPa	$f_{pr} = 1,30$ MPa	$f_{pr} = 1,40$ MPa
12	15	3,78	3,85	3,92	3,99	4,06
	30	5,35	5,45	5,54	5,64	5,74
	55	7,24	7,37	7,51	7,64	7,77
14	15	4,08	4,16	4,23	4,31	4,39
	30	5,77	5,88	5,99	6,10	6,20
	55	7,82	7,96	8,11	8,25	8,40
15	15	4,23	4,30	4,38	4,46	4,54
	30	5,98	6,09	6,20	6,31	6,42

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

	55	8,09	8,24	8,39	8,54	8,69
16	15	4,36	4,45	4,53	4,61	4,69
	30	6,17	6,29	6,40	6,52	6,63
	55	8,36	8,51	8,67	8,82	8,98
18	15	4,63	4,72	4,80	4,89	4,97
	30	6,55	6,67	6,79	6,91	7,03
	55	8,87	9,03	9,19	9,36	9,52
20	15	4,88	4,97	5,06	5,15	5,24
	30	6,90	7,03	7,16	7,29	7,41
	55	9,34	9,52	9,69	9,86	10,04
22	15	5,12	5,21	5,31	5,40	5,50
	30	7,24	7,37	7,51	7,64	7,77
	55	9,80	9,98	10,16	10,35	10,53

Fuente: Adaptado de PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996.

*Cargas admisibles con factor de seguridad de 2.00.

**Para datos no presentados en la tabla es posible realizar interpolación lineal.

Las cargas admisibles para cargas distribuidas definidas por el usuario y permanentes durante el tiempo útil del piso son mostradas en la Tabla 13. Las variables son el espesor de la losa, el esfuerzo de trabajo admisible, y el módulo del suelo k . El esfuerzo de trabajo corresponde al módulo de rotura de presfuerzo del concreto (M_{RP}) dividido en el factor de seguridad escogido para cargas distribuidas. Para valores que no están en la tabla, es posible realizar interpolación lineal ³¹.

³¹ PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Tabla 13. Cargas admisibles para cargas distribuidas definidas

Espesor de losa (cm)	Esfuerzo de trabajo (MPa)	Ancho crítico (m)	Carga Distribuida admisible (ton/m2)					
			En ancho crítico	En otros anchos de pasillo				
				1,80 (m)	2,4 (m)	3(m)	3,6(m)	4,2(m)
Subbase k = 15,00 MPa/m								
12	2,00	1,70	2,99	3,01	3,28	3,99	5,14	5,95
	2,50		3,48	3,50	3,84	4,65	6,00	6,95
	3,00		3,99	4,01	4,38	5,31	6,85	7,93
15	2,00	1,90	3,28	3,30	3,40	3,81	4,625	5,75
	2,50		3,84	3,84	3,97	4,45	5,38	6,70
	3,00		4,38	4,38	4,53	5,09	6,17	7,68
20	2,00	2,40	3,77	3,92	3,77	3,92	4,31	4,94
	2,50		4,40	4,57	4,40	4,58	5,02	5,75
	3,00		5,01	5,24	5,01	5,21	5,75	6,60
25	2,00	2,90	4,14	4,55	4,18	4,16	4,33	4,67
	2,50		4,82	5,31	4,89	4,84	5,07	5,48
	3,00		5,50	6,07	5,60	5,55	5,80	6,29
30	2,00	3,30	4,48	5,21	4,67	4,47	4,53	4,72
	2,50		5,21	6,07	5,45	5,23	5,28	5,50
	3,00		5,97	6,95	6,21	5,97	6,02	6,31
35	2,00	3,70	4,79	6,00	5,23	4,89	4,80	4,87
	2,50		5,60	7,00	6,09	5,73	5,60	5,68
	3,00		6,41	7,98	6,97	6,53	6,40	6,51
Subbase k = 30,00 MPa/m								
12	2,00	1,70	4,23	4,41	5,34	7,19	8,54	8,85
	2,50		4,94	5,14	6,22	8,39	9,96	10,34
	3,00		5,65	5,87	7,12	9,56	11,37	11,80
15	2,00	1,90	4,65	4,68	5,21	6,46	8,32	9,41
	2,50		5,40	5,46	6,09	7,53	9,72	10,97
	3,00		6,19	6,24	6,95	8,61	11,11	12,53
20	2,00	2,40	5,36	5,41	5,48	6,06	7,18	8,88
	2,50		6,26	6,29	7,07	7,07	8,35	10,36
	3,00		7,15	7,19	8,08	8,07	9,55	11,83
25	2,00	2,90	5,95	6,19	5,95	6,21	6,84	7,88
	2,50		6,95	7,22	6,95	7,24	7,99	9,19
	3,00		7,95	8,05	7,95	8,27	9,11	10,51
30	2,00	3,30	6,46	6,97	6,48	6,51	6,87	7,51
	2,50		7,54	8,14	7,56	7,58	8,01	8,78
	3,00		8,59	9,29	8,66	8,66	9,13	10,02
35	2,00	3,70	6,88	7,78	7,07	6,88	7,04	7,46

	2,50		8,02	9,08	8,24	8,03	8,21	8,68
	3,00		9,18	10,37	9,42	9,18	9,38	9,92
Subbase k = 55,00 MPa/m								
12	2,00	1,70	5,99	6,85	9,43	11,97	12,53	12,33
	2,50		6,97	7,97	11,02	13,97	14,60	14,38
	3,00		7,97	9,11	12,58	15,96	16,70	16,42
15	2,00	1,90	6,55	6,92	8,58	11,70	13,38	13,74
	2,50		7,65	8,07	10,02	13,67	15,62	16,01
	3,00		8,72	9,24	11,45	15,57	17,84	18,30
20	2,00	2,40	7,58	7,58	8,28	9,99	12,87	15,01
	2,50		8,85	8,85	9,67	11,70	15,01	17,50
	3,00		10,09	10,11	12,77	13,33	17,16	20,01
25	2,00	2,90	8,46	8,53	8,68	9,60	11,38	14,16
	2,50		9,87	9,94	10,11	11,19	13,26	16,13
	3,00		11,28	11,36	11,55	12,80	15,16	18,86
30	2,00	3,30	9,24	9,50	9,26	9,75	10,89	12,77
	2,50		10,77	11,09	10,80	11,38	12,70	14,89
	3,00		12,31	12,67	12,33	12,99	14,51	17,01
35	2,00	3,70	9,89	10,50	9,92	10,09	10,80	12,13
	2,50		11,53	12,26	11,55	11,75	12,60	14,13
	3,00		13,19	14,01	13,21	13,43	14,40	16,16

Fuente. PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

Para ambos procedimientos, la carga admisible encontrada en las Tablas 12 y 13 deberá ser mayor a la carga distribuida de diseño. En su defecto el diseñador podría definir la carga distribuida máxima que podrá almacenar el piso, usando un factor de seguridad de 1 y un módulo de rotura de presfuerzo de concreto M_{RP} en la Ecuación 17.

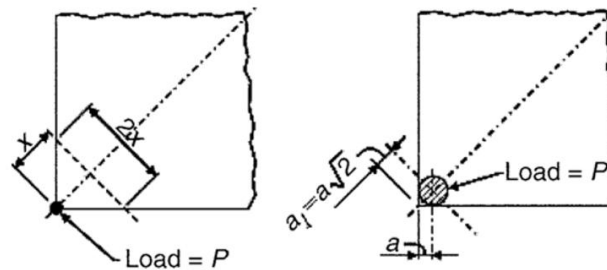
4.3.7. Verificación de esfuerzos

4.3.7.1. Verificación de esfuerzos de flexión mediante ecuaciones de Westergaard. El análisis para losas bajo cargas concentradas está basado en los trabajos citados por el Comité 360 del Instituto Americano del Concreto en el documento ACI360R-10⁵, y realizados por Westergaard^{37 38 39} para tres casos separados, diferenciados por la suposición de la localización de la carga con respecto al eje de la losa.

Caso 1: Carga (vehículo o concentrada) en la esquina de la losa.

Para cargas aplicadas en la esquina de la losa, el esfuerzo crítico en el concreto será la tensión en la superficie. La reacción del suelo tiene poco efecto, luego la losa es considerada como un voladizo. Westergaard planteo la expresión para la tensión crítica ocurrida a una distancia $2\sqrt{aL}$, tal como ilustra la figura 27⁵.

Figura 27. Carga de esquina en losa



Fuente: ACI committee 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010.

⁵ ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

³⁷ WESTERGAARD, H. M. On the Design of Slabs on Elastic Foundation with Special Reference to Stresses in Concrete Pavements. En: Ingeniorem, vol. 12. Copenhagen, 1923.

³⁸ WESTERGAARD, H. M. Theory of Stresses in Road Slabs. En: Proceedings, 4th Annual Meeting. Highway Research Board, Washington D.C. 1925.

³⁹ WESTERGAARD, H. M. Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. En: Public Roads, vol.7. Washington D.C. Abril de 1926.

El esfuerzo crítico a tensión en el concreto (f_t), se calcula siguiendo las expresiones dadas en las ecuaciones (7-2) y (7-3) del ACI360R-10⁵, representadas en el presente documento como EC-27 y EC-28 respectivamente.

$$f_t = \frac{3p}{h^2} * \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{L} \right)^{0.6} \right] \quad (\text{EC} - 27)[5]$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (\text{EC} - 28)[5]$$

donde:

f_t = Esfuerzo de tensión crítico del concreto en la parte superior de la losa (Pa).

a = Radio del área de contacto (m).

P = Carga sobre la losa (N).

h = Espesor de la losa (m).

L = Radio relativo de espesor (m).

E = Módulo de elasticidad del concreto (Pa)

k = Módulo de reacción de la subrasante (Pa/m).

ν = coeficiente de Poissons (0,15).

Caso 2: Carga (vehículo o concentrada) a una distancia considerable de la esquina de la losa.

Cuando la carga es aplicada a una distancia alejada de los bordes mayor a cuatro veces el espesor relativo ($4L$), la tensión crítica se encuentra en la parte inferior de la losa, y es calculada siguiendo la ecuación (7-4) del ACI360R-10⁵ y presentada en el siguiente documento como EC-29. La tensión crece cuando está directamente debajo del centro del área cargada⁵.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

$$f_b = 0,316 \frac{P}{h^2} \left[\log h^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \right) - \log k + 6,48 \right] \quad (\text{EC} - 29)[5]$$

donde:

f_b = Esfuerzo de tensión crítico del concreto en la parte inferior de la losa (lbf/in²).

P = Carga sobre la losa (lbf).

h = Espesor de la losa (in).

a = Radio del área de contacto (in).

k = Módulo de reacción de la subrasante (lbf/in³).

Caso 3: Carga (vehículo o concentrada) en el borde de la losa, pero a una distancia considerable de la esquina.

Cuando la carga es aplicada en un punto a lo largo del borde de la losa, pero alejada de la esquina a una distancia mayor a cuatro veces el espesor relativo (4L), el esfuerzo de tensión crítico estará en la parte inferior de la losa de concreto, directamente debajo de la carga y es calculado siguiendo la ecuación (7-5) del ACI360R-10⁵ y presentada en el siguiente documento como EC-30.

$$f_b = 0,572 \frac{P}{h^2} \left[\log h^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \right) - \log k + 5,77 \right] \quad (\text{EC} - 30)[5]$$

donde:

f_b = Esfuerzo de tensión crítico del concreto en la parte inferior de la losa (lbf/in²).

P = Carga sobre la losa (lbf).

h = Espesor de la losa (in).

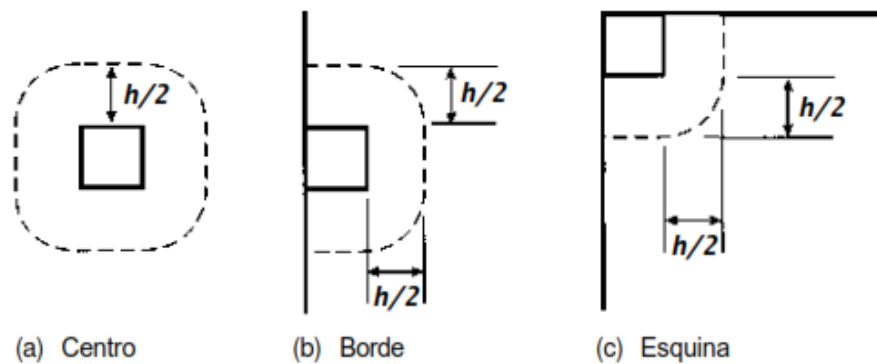
a = Radio del área de contacto (in).

k = Módulo de reacción de la subrasante (lbf/in³).

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

4.3.7.2. Verificación de resistencia al corte en el perímetro crítico. La resistencia al corte es verificada para cargas concentradas (estantería o columnas de carga). El control se realiza en toda la sección localizada a $h/2$ del borde del área cargada. Se verifican esfuerzos para cargas aplicadas en diferentes localizaciones tal como ilustra la Figura 28, en la esquina, el borde y en el centro de la losa¹⁹.

Figura 28. Localización de carga concentrada



Fuente: Adaptado de THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016.

Los esfuerzos de cortante son calculados mediante las ecuaciones EC-31, EC-32 y EC-33 del presente documento, citadas por Cipriano Londoño y Claudia Flórez¹⁹.

Para el apoyo localizado en la esquina de la losa, el esfuerzo cortante en la esquina de la losa (V_e) se calcula como:

$$V_e = \frac{P}{h * (0,5p + h)} \quad (\text{EC} - 31)[19]$$

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

Para el apoyo localizado en el borde de la losa, el esfuerzo cortante en el borde de la losa (V_b) se calcula como:

$$V_b = \frac{P}{h * (0,75p + 2h)} \quad (EC - 32)[19]$$

Para el apoyo localizado en el centro de la losa, el esfuerzo cortante en el centro de la losa (V_c) se calcula como:

$$V_c = \frac{P}{h * (p + 4h)} \quad (EC - 33)[19]$$

donde:

P = Carga actuando en el apoyo (kgf).

h = Espesor de la losa (cm).

p = Perímetro del área de apoyo (cm).

V = Esfuerzo cortante (kgf/cm²).

Para ningún caso, los esfuerzos cortantes V_e , V_b y V_c deben ser mayores que 0,27 veces el módulo de rotura de presfuerzo del concreto (M_{RP})¹⁹.

4.3.7.3. Verificación de esfuerzo de contacto. Según lo citado por Cipriano Londoño y Claudia Flórez, de acuerdo al *Eurocode 2, Part 1-1*, Sección 6.4⁴⁰, independientemente del refuerzo que tenga la losa, el esfuerzo en la superficie del área de contacto no debe exceder el valor dado por la expresión EC-34²⁴.

$$\sigma_{MAX} = 2,10 \times M_{RP} \quad (EC - 34)[19]$$

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

⁴⁰ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Diciembre de 2004.

²⁴ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

donde:

σ_{MAX} = Esfuerzo máximo en la cara de apoyo.

M_{RP} = Módulo de rotura de presfuerzo del concreto.

5. EJEMPLO PRÁCTICO

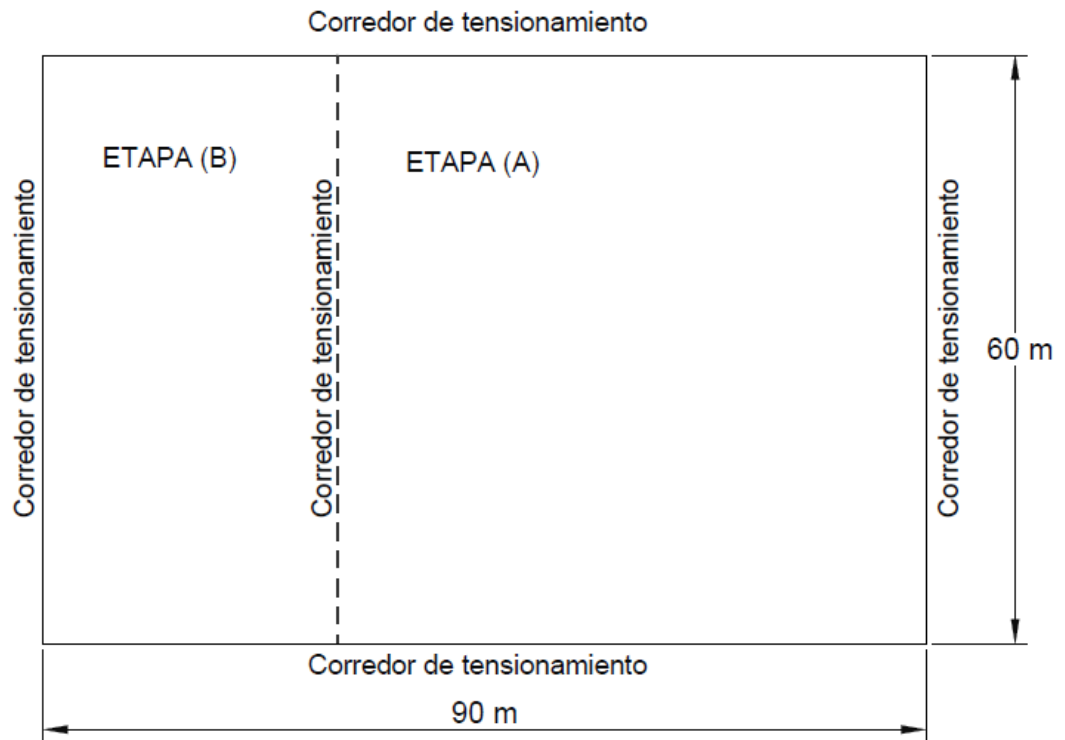
5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO.

A continuación, se plantea un ejemplo de diseño empleando la metodología descrita en el numeral anterior. Consistirá en una bodega de almacenamiento para productos alimenticios en estanterías de gran altura, con circulación de vehículos montacargas. Se requiere una superficie con requerimientos de planicidad y nivelación, con números F por encima de 50, de al menos cinco mil (5.000) metros cuadrados sin juntas. Se requiere concreto con resistencia a la compresión de 32 MPa, en una ciudad con una humedad relativa promedio anual de 80%.

5.1.1. Geometría de la losa. Según el área disponible para la construcción se adopta una losa de 90 metros de largo por 60 metros de ancho, es decir, con una relación de 1,50 entre sus dimensiones principales, las cuales se observan en la Figura 29.

Además, la Figura 29 ilustra los posibles corredores de tensionamiento disponibles, y las etapas de tensionamiento, asumiendo las recomendaciones dadas por el *Post-Tensioning Institute* [26], donde la longitud máxima de tensionamiento por un solo lado, no deberá superar los 100 ft (30 m).

Figura 29. Geometría de losa propuesta y posibles corredores de tensionamiento



Fuente: Autor.

5.1.2. Planteamiento de secuencia constructiva. Con el fin de obtener esfuerzos homogéneos, se propone un vaciado de concreto en dos etapas A y B. En ambas etapas se realizarán vaciados en franjas con anchos de 4.0 y 3.75 metros respectivamente.

Los anchos de franjas son escogidos, de tal forma que el equipo de enrase tenga el ancho suficiente para abarcar el ancho completo de la franja, y brindar la planicidad y nivelación de piso esperada. Se plantea el uso de una enrasadora stream,

distribuida por *PACLITE Equipment*⁴¹, la cual maneja anchos de 3 m, 3,75 m y 4,25 m dependiendo del modelo, ilustrada en la Figura 30.

Figura 30. Ilustración de enrasadora Stream *PACLITE Equipment*



Fuente: Adaptado de http://paclite-equip.com/pdf/catalogue-2014/PACLITE_2014_SPANICH.pdf

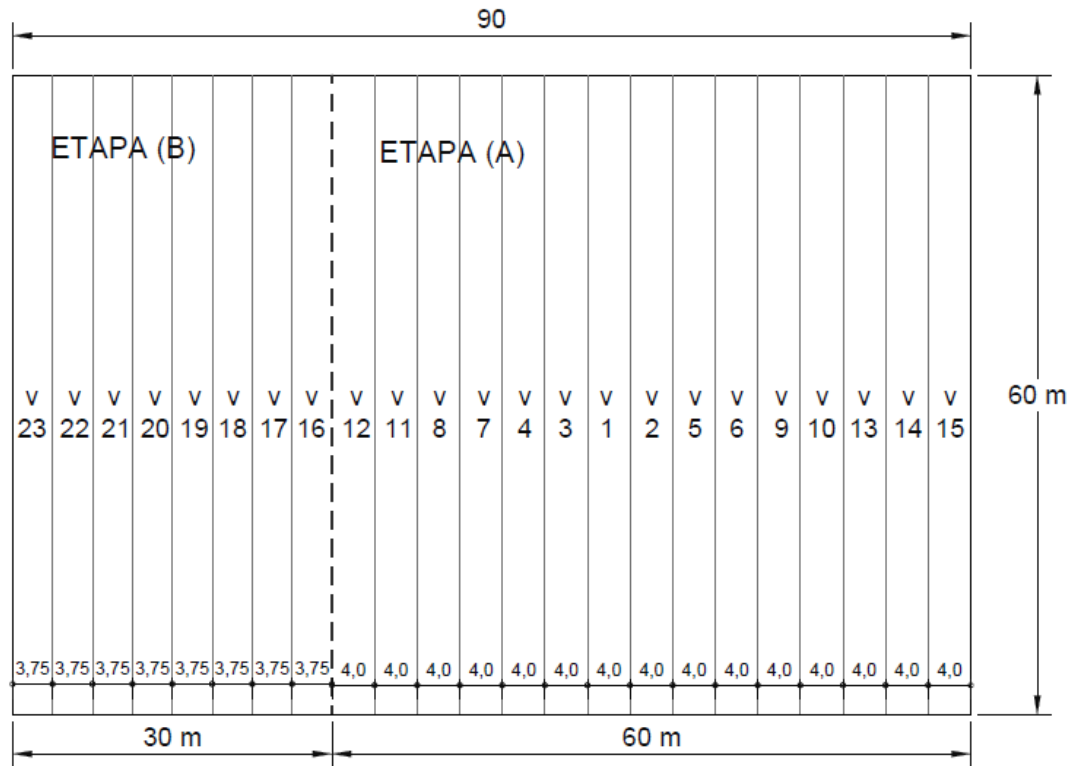
La primera etapa (A) se ejecutará vaciando las franjas según secuencia propuesta en la Figura 31 y realizando el primer tensionamiento en el sentido longitudinal de la franja. Al completar todos los vaciados de la etapa (A), y una vez el concreto de todas las franjas adquieran al menos el 75% de su resistencia, se procede a realizar los tensionamientos finales longitudinales y transversales.

Para la segunda etapa (B), se procederá vaciando franjas según secuencia propuesta en la Figura 31 y realizando el primer tensionamiento longitudinalmente. Al completar en etapa (B) se aplicará fuerza de tensionamiento final en ambas direcciones, teniendo en cuenta que en el sentido transversal solamente existe un costado libre para tensionar. Es importante resaltar, que los vaciados de la etapa

⁴¹ [41]. PACLITE EQUIPMENT. [sitio web]. Catálogo Especialistas en Equipo de Compactación y Concreto. Disponible en: http://paclite-equip.com/pdf/catalogue-2014/PACLITE_2014_SPANICH.pdf.

(B) no deberán iniciar antes de que las labores de tensionamiento de la etapa (A) estén culminadas.

Figura 31. Secuencia constructiva propuesta para la losa



Fuente: Autor.

5.1.3. Módulo de la subrasante. Según estudios geotécnicos, se asume un coeficiente de balastro igual a 3.00 kgf/cm^3 ó 100 lb/in^3 , correspondiente a un suelo de desempeño medio²⁴.

²⁴ LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

5.2. DEFINICIÓN DE CARGAS.

5.2.1. Carga de vehículo. Para la operación de la bodega se define montacarga trilateral eléctrico *Jungheinrich* modelo *EKX 513/515k/515* ⁴², Ideal para almacenes de pasillos estrechos y zonas altas. Sus principales características se presentan en las Tablas 14, 15 y 16.

Tabla 14. Características principales de vehículo montacarga.

Modelo de Montacarga	EKX-513
Peso montacarga (incluye máxima batería)	6.350 (kgf)
Capacidad de carga operacional	1.250 (kgf)
Peso de montacarga con carga máxima	7.600 (kgf)
Tipo de llanta	Trilateral llanta dura.
Presión de inflado de llanta	14 (kgf/cm ²)

Fuente: Adaptado de www.jungheinrich.es.

Tabla 15. Dimensiones y espaciamiento de ruedas de vehículo montacarga.

	Cantidad	Diámetro (mm)	Ancho (mm)	Presión Inflado
Ruedas delanteras	2	380	192	14 (kg/cm ²)
Ruedas traseras	1	400	160	14 (kg/cm ²)
Separación de ruedas (mm)		1.300		
Longitud entre ejes (mm)		1.826		

Fuente: Adaptado de www.jungheinrich.es.

⁴² JUNGHEINRICH. [sitio web]. Especificaciones Carretilla preparadora trilateral eléctrica (1.250/1.500 kg). Disponible en: <https://www.jungheinrich.es/productos/carretillas-nuevas/carretillas-elevadoras/carretillas-elevadoras-el%C3%A9ctricas>.

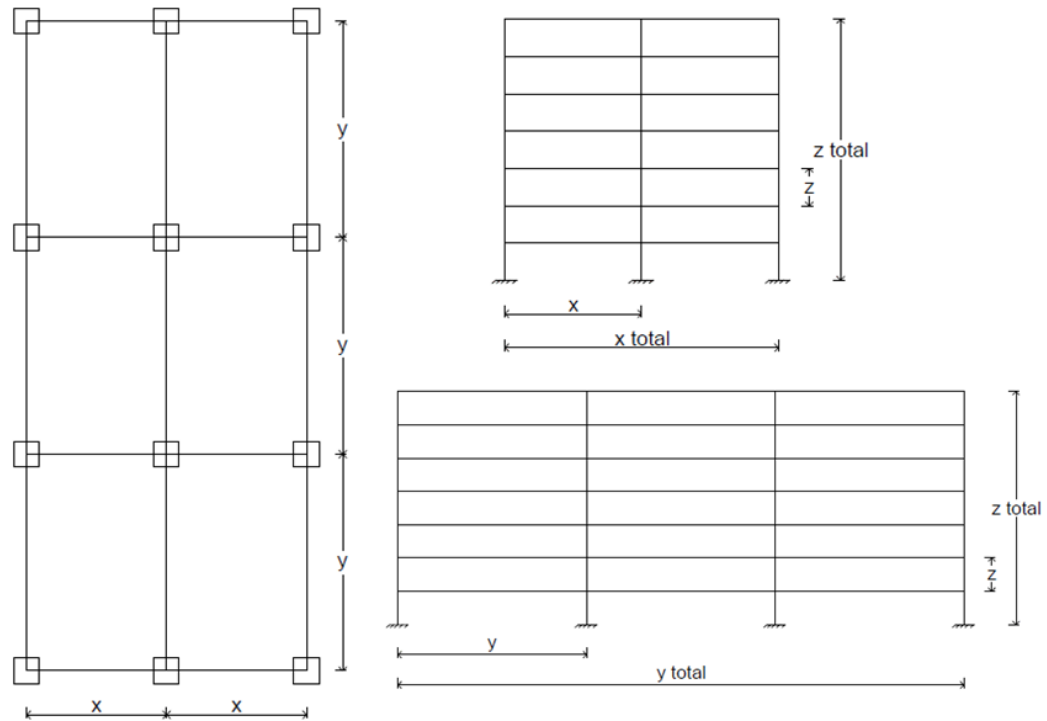
Tabla 16. Resumen de cargas de vehículo montacarga.

	Q delantero/eje (kg)	Q trasero/eje (kgf)	Q total (kgf)
Equipo vacío	3.850	2.500	6.350
Carga extendida	5.720	1.880	7.600

Fuente: Adaptado de www.jungheinrich.es.

5.2.2. Carga de estantería. Las cargas concentradas estarán superpuestas por las estanterías o racks. Las características y cargas planteadas para la estantería se observan en la Figura 32, Tabla 17 y Tabla 18.

Figura 32. Esquema general para geometría de estantería.



Fuente: Autor.

Tabla 17. Gemoetría de estantería propuesta

Ancho del estante (x)	100 (cm)
Número de ejes en x	1
Ancho del estante (y)	210 (cm)
Número de ejes en y	7
Altura por nivel de estantería (z)	210 (cm)
Número de niveles en z	4
Ancho total del estante (cm)	100 (cm)
Largo total del estante (cm)	1.470 (cm)
Alto total del estante (cm)	840 (cm)
Platina de apoyo	
Dimensión L1	20 (cm)
Dimensión L2	20 (cm)
Area de apoyo	400 (cm ²)

Fuente: Autor

Tabla 18. Cargas de estantería

Carga por módulo	2.00 (tnf)
No. de módulo por nivel	7
Carga por nivel	14.0 (tnf)
No. de niveles de carga	5
Carga total	70.0 (tnf)
Carga máxima en apoyo	5.00 (tnf)

Fuente: Autor

Según criterios de la Tabla 9 del presente documento, se emplea un factor de seguridad equivalente a 2.00 para cargas de estantería y vehículos.

5.3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL PREESFUERZO.

Para los pisos postensados es considerado un preesfuerzo con ducto no adherido, debido a las ventajas constructivas al realizar vaciados de concreto por franjas [16]. Las pérdidas calculadas hacen referencia a un sistema monotorón postensado no adherido.

Para el presente ejercicio se utiliza torón grado 270 de baja relajación ($f_{pu} = 1.860$ MPa) con diámetro nominal de 0,50 in (12,70 mm), área de presfuerzo de 98,70 mm² y cuyas características están expuestas en las Tablas 6 y 7 del presente documento.

Siguiendo el procedimiento planteado en la sección 4.3.4 del presente documento, se calcula la fuerza inicial de precompresión inducida por el gato (P_j) y la fuerza de precompresión después de pérdidas iniciales (P_i) expuestas en EC-21, EC22 y desarrolladas como EC-34 y EC-35 respectivamente.

$$P_j = 1488 \text{ (MPa)} * 98,7 \text{ (mm}^2\text{)} = 146,87 \text{ kN} \quad (\text{EC} - 34)$$

$$P_i = 1376 \text{ (MPa)} * 98,7 \text{ (mm}^2\text{)} = 135,81 \text{ kN} \quad (\text{EC} - 35)$$

Las pérdidas a largo plazo, se calculan según las expresiones EC-10, EC-11, EC-12, EC-13, EC-14 y EC-20 del presente documento, y se desarrollan como EC-36, EC-37, EC-38, EC-39, EC-40 y EC-41.

$$\gamma_h = 1,70 - 0,01(80) = 0,90 \quad (\text{EC} - 36)$$

$$\gamma_{st} = \frac{35}{1 + (0,75)32} = 1,40 \quad (\text{EC} - 37)$$

$$\Delta f_{SH} = 83 * 0,90 * 1,40 = 104,6 \text{ (MPa)} \quad (\text{EC} - 38)$$

$$\Delta f_{\text{CREEP}} = 10 * \frac{1488 \text{ (MPa)} * 98,7 \text{ (mm}^2\text{)}}{160 \text{ (mm)} * 400 \text{ (mm)}} * 0,90 * 1,4 = 28,90 \text{ (MPa)} \quad (\text{EC} - 39)$$

$$\Delta f_{\text{RT}} = 16 \text{ (MPa)} \quad (\text{EC} - 40)$$

$$\Delta f_{\text{PL}} = 104,6 + 28,90 + 16 = 149,5 \text{ (MPa)} \quad (\text{EC} - 41)$$

La fuerza efectiva de precompresión incluyendo las pérdidas en el tiempo se calcula mediante la expresión EC-23 del presente documento y se desarrolla como EC-42.

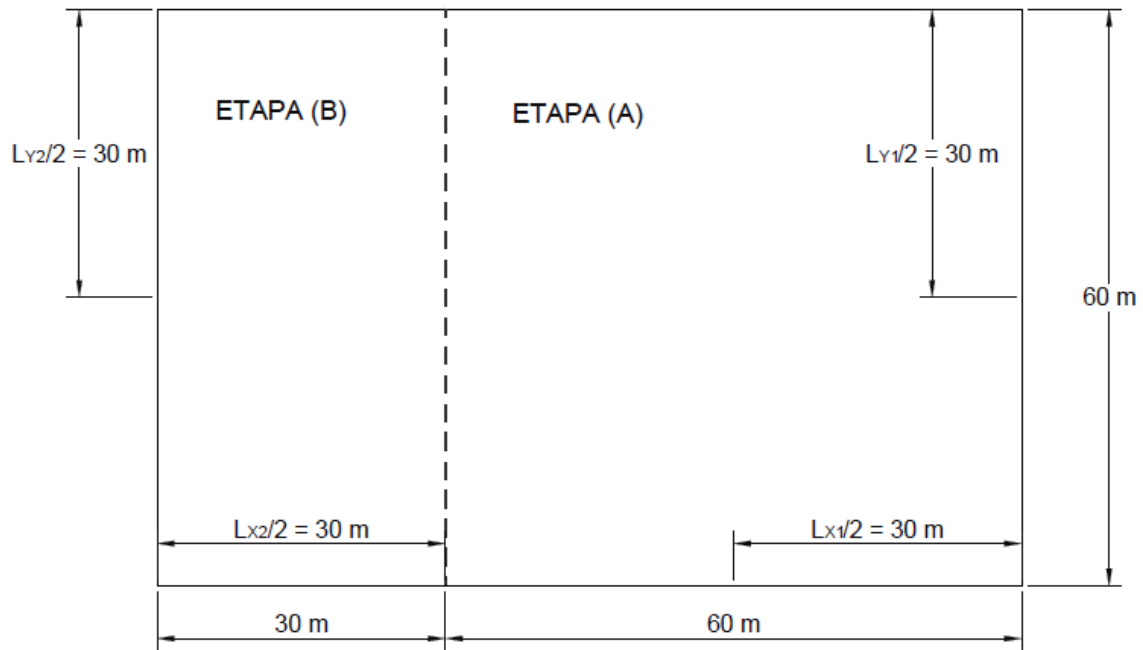
$$P_e = (1376 \text{ (MPa)} - 149,5 \text{ (MPa)}) * 98,7 \text{ (mm}^2\text{)} = 121 \text{ kN} \quad (\text{EC} - 42)$$

5.4. FUERZA REQUERIDA PARA EVITAR FISURACIÓN.

La longitud crítica de arrastre $L/2$ citada en la ecuación EC-24 del presente documento, se calcula según lo ilustrado en la Figura 33, para cada etapa de tensionamiento⁵.

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

Figura 33. Longitud crítica de arrastre ($L/2$) para cada etapa de tensionamiento



Fuente: Adaptado de ACI committee 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010.

Asumiendo una barrera entre la subbase y la losa de dos capas de polietileno se escoge un valor de coeficiente de arrastre $\mu=0.50$, según Tabla 10 del presente documento⁵.

Teniendo en cuenta que la longitud crítica de arrastre es la misma en todas las direcciones, y asumiendo un espesor de losa de 16 centímetros, se calcula la fuerza requerida para evitar fisuración (P_r) expuesta en la ecuación EC-24 del presente documento y desarrollada como EC-43.

$$P_r \text{ (kgf/m)} = 2.400 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \right) * 0,16 \text{ (m)} * 30 \text{ (m)} * 0,50 = 5.760 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}} \right) \quad (\text{EC} - 43)$$

⁵ ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground* (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

5.4. ESPACIAMIENTO DE TORONES Y ESFUERZO RESIDUAL DE PRECOMPRESIÓN.

Con base en el procedimiento descrito en la Sección 4.3.6 del presente documento, se escoge un espesor de losa de 16 cm y un espaciamiento de torones de 43 cm. De la ecuación EC-25 se calcula el esfuerzo residual de precompresión (f_{pr}) como se muestra a continuación.

$$f_{pr} = \frac{\frac{P_e}{T.S} - P_r}{W * h} \quad (EC - 44)$$

$$f_{pr} = \frac{\frac{12.100 \text{ (kgf)}}{0,43 \text{ (m)}} - 5.760 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}} \right)}{100 \left(\frac{\text{cm}}{\text{m}} \right) * 16 \text{ (cm)}} = 13,9 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \quad (EC - 45)$$

El esfuerzo residual de precompresión calculado (f_{pr}) se encuentra dentro de los límites recomendados en la Tabla 11. Es importante que la losa mantenga un esfuerzo residual de precompresión constante en toda su área, con el fin que los esfuerzos tengan una distribución homogénea, para evitar irregularidades indeseadas y un comportamiento estructural óptimo.

5.5. DEFINICIÓN DE MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO.

Para el concreto especificado con resistencia a la compresión de 32 MPa, se calcula el modulo de rotura y módulo de rotura de presfuerzo (esfuerzo capaz de soportar el concreto a tensión incluyendo la fuerza de precompresión) siguiendo las ecuaciones EC-16 y EC-26 del presente documento y desarrolladas a continuación.

$$M_R = 0.78\sqrt{32} = 4,41 \text{ MPa} \quad (EC - 46)$$

$$M_{RP} = 4,41 + 1,39 = 5,80 \text{ MPa} \quad (EC - 47)$$

5.6. REVISIÓN DE ESPESOR POR CARGA DE VEHÍCULO (PCA).

Para la revisión del espesor de losa bajo cargas vehiculares, se emplean los ábacos de diseño elaborados por Robert Packard³¹, citados en las Figuras 16 y 21 del presente documento. En la Tabla 19 se encuentran los datos de entrada a estos ábacos.

Tabla 19. Datos de entrada para ábacos de Figuras 16 y 21 para cargas de vehículo.

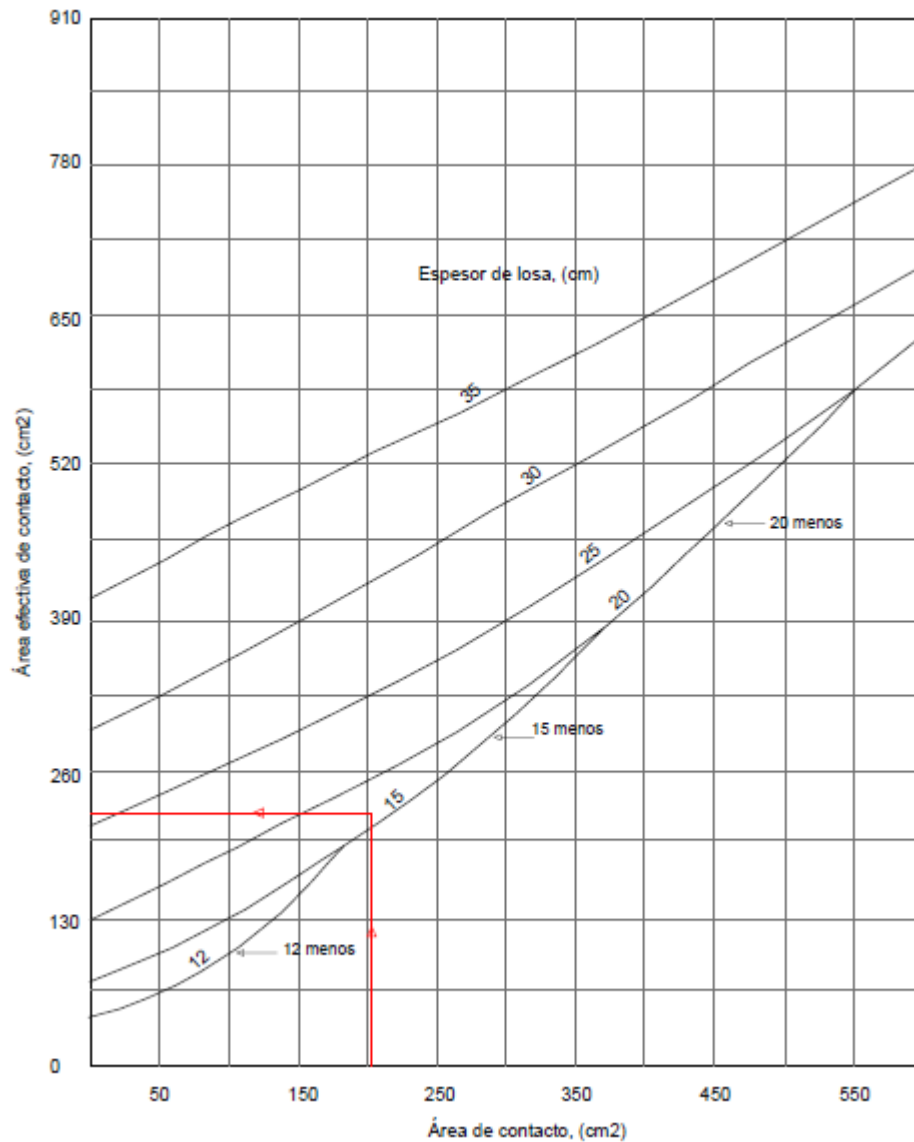
Datos de entrada en ábacos	
Espesor de la losa	16 (cm)
Área de contacto: $Q \text{ eje} / (\# \text{Ruedas} \times \text{Pi})$	204 (cm ²)
M_{RP}	5,80 (MPa)
Q eje	5,70 (tnf)
F.S.	2
Esfuerzo admisible de trabajo: $M_{RP} / (F.S \times Q \text{ eje})$	0,508 (MPa/tnf)
Separación de ruedas	130 (cm)
Coeficiente de balastro K_s	30 (MPa/m)

Fuente: Autor

En la Figura 34 se obtiene gráficamente un área de contacto efectiva de 225 cm², y de la Figura 35 se obtiene gráficamente un espesor de losa de 12,10 cm. Por tanto, la losa escogida inicialmente de 16 cm es adecuada para soportar las cargas vehiculares.

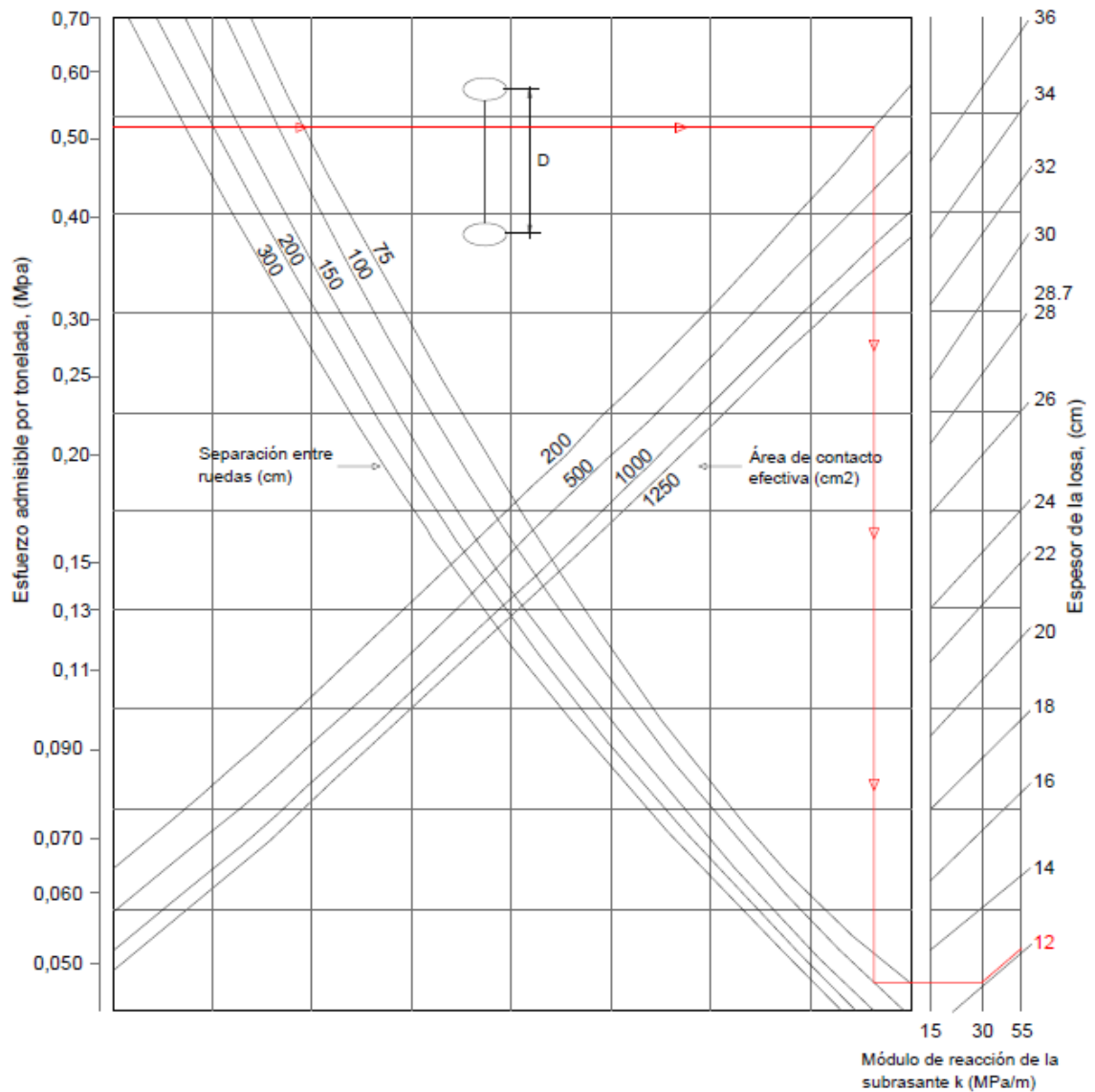
³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

Figura 34. Cálculo gráfico de área de contacto efectiva



Fuente: Adaptado de PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

Figura 35. Cálculo gráfico de espesor requerido para carga de vehículo.



Fuente: Adaptado de PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. Citado y adaptado por LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006.

5.7. REVISIÓN DE ESPESOR POR CARGA DE ESTANTERÍA (PCA).

Se emplea el ábaco de diseño desarrollado por Robert Packard³¹, citado en la Figuras 24 del presente documento para un módulo de reacción de subrasante de 30 MPa/m. En la Tabla 20 se encuentran los datos de entrada a este ábaco.

Tabla 20. Datos de entrada en ábacos de la Figura 24 para carga de estantería.

Datos de entrada en ábacos	
Espesor de la losa	16 centímetros
Área de contacto:	400 cm ²
Mrp	5,80 Mpa
Q máx.	5,00 ton
Esfuerzo admisible de trabajo: Mrp / (F.S x Q máx.)	0,581 Mpa/ton
Distancia X	100 cm
Distancia Y	210 cm
Coeficiente de balastro Ks	30 Mpa/m

Fuente: Autor

De la Figura 36, se obtiene gráficamente un espesor de losa de 15,20 cm. Por tanto, la losa escogida inicialmente de 16 cm es adecuada para carga de estantería.

³¹ PACKARD, Robert G. Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

[illegible]

112

5.8. CARGA MÁXIMA DISTRIBUIDA ADMISIBLE.

De la expresión dada por EC-17 del presente documento, se obtiene la carga máxima que podría soportar la losa, usando un factor de seguridad de 1.00 para el caso de carga distribuida sin distribución definida, tal como se muestra a continuación⁵.

$$W = 0.033 * \frac{58 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)}{1,00} * \sqrt{16(\text{cm}) \times 30 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^3} \right)} = 13,28 \frac{\text{tnf}}{\text{m}^2} \quad (\text{EC} - 48)$$

5.9. VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS ADMISIBLES.

5.9.1. Verificación de esfuerzos mediante ecuaciones de Westergaard. Se realiza verificación de esfuerzos según lo indicado en la Sección 4.3.7.1 del presente documento. La Tabla 21 expone el resumen de cargas impuestas sobre la losa usados para la verificación de esfuerzos.

Tabla 21. Resumen de cargas en la losa

Carga de Vehículo (1)		
P1 =	57.200 (N)	12.858,56 (lbf)
a1 =	0,085 (m)	3,33 (in)
Carga de Estantería (2)		
P2 =	50.000 (N)	11.240,00 (lbf)
a2 =	0,1 (m)	3,94 (in)

Fuente: Autor

⁵ ACI COMMITTEE 360. Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

Se realiza el cálculo del radio relativo de espesor según Ecuación 28, tal como se muestra a continuación.

$$L = \sqrt[4]{\frac{280.000 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} * (16\text{cm})^3}{12(1-0,15^2) * 3(\text{kg/cm}^3)}} = 0,76 \text{ m} \quad (\text{EC} - 48)$$

Para el caso 1, se evalúa el esfuerzo en la parte superior de la losa, para una carga aplicada en la esquina de la losa, usando la Ecuación 27 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$f_{t1} = \frac{3 * 57.200 \text{ (N)}}{(0,16\text{m})^2} * \left[1 - \left(\frac{0,085\text{m} * \sqrt{2}}{0,76 \text{ m}} \right)^{0.6} \right] = 4,48 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 49)$$

$$f_{t2} = \frac{3 * 50.000 \text{ (N)}}{(0,16\text{m})^2} * \left[1 - \left(\frac{0,10\text{m} * \sqrt{2}}{0,76 \text{ m}} \right)^{0.6} \right] = 3,72 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 50)$$

Para el caso 2, se evalúa el esfuerzo en la parte inferior de la losa, para una carga aplicada en el centro de la losa, usando la Ecuación 29 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$f_{b1} = 0,316 \frac{12858 \text{ lbf}}{6,3 \text{ in}^2} \left[\log 6,3^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6(3,3)^2 + 6,3^2} - 0,675(6,3) \right) - \log(100) + 6,48 \right] \quad (\text{EC-51})$$

$$f_{b1} = 487 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 3,40 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 52)$$

$$f_{b2} = 0,316 \frac{11240 \text{ lbf}}{6,3 \text{ in}^2} \left[\log 6,3^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6(3,9)^2 + 6,3^2} - 0,675(6,3) \right) - \log(100) + 6,48 \right] \quad (\text{EC-53})$$

$$f_{b2} = 406 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 2,85 \text{ MPa} \quad (\text{EC-54})$$

Para el caso 3, se evalúa el esfuerzo en la parte inferior de la losa, para una carga aplicada en el borde de la losa, usando la Ecuación 30, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$fb1 = 0,572 \frac{12858}{6,3^2} \left[\log 6,3^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6(3,3)^2 + 6,30^2} - 0,675(6,30) \right) - \log 100 + 5,77 \right] \quad (EC-55)$$

$$fb1 = 749,8 \frac{lbf}{in^2} = 5,25 \text{ MPa} \quad (EC - 56)$$

$$fb2 = 0,572 \frac{11240}{6,3^2} \left[\log 6,3^3 - 4 \log \left(\sqrt{1,6(3,9)^2 + 6,3^2} - 0,675(6,3) \right) - \log 100 + 5,77 \right] \quad (EC-57)$$

$$fb2 = 620 \frac{lbf}{in^2} = 4,35 \text{ MPa} \quad (EC - 58)$$

Para todos los casos, el esfuerzo debe ser menor que el módulo de rotura de preesfuerzo (M_{RP}) calculado de 5,81 MPa. Luego los criterios adoptados de espesor de losa y espaciamiento de torones, son adecuados para controlar los esfuerzos de flexión.

5.9.2. Verificación de resistencia al corte en el perímetro crítico. Las verificaciones de resistencia al corte se realizan según Sección 4.3.7.2 del presente documento. Se evalúa para la estantería, la carga máxima equivalente a 5 (tnf), donde el perímetro (p) del apoyo es equivalente a 80 cm, según Tabla 18.

Para el caso 1, para una carga concentrada ubicada en la esquina de la losa, usando la ecuación 31, se obtiene:

$$V_e = \frac{5 \text{ (tnf)}}{16 \text{ (cm)} * (0,5(80\text{cm}) + 16(\text{cm}))} = 0,56 \text{ MPa} \quad (EC - 59)$$

Para el caso 2, para una carga concentrada ubicada en el borde la losa, usando la ecuación 32, se obtiene:

$$V_b = \frac{5 \text{ (tnf)}}{16(\text{cm}) * (0,75(80\text{cm}) + 2(16(\text{cm})))} = 0,34 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 60)$$

Para el caso 3, para una carga concentrada ubicada en el centro de la losa, usando la ecuación 33, se obtiene:

$$V_c = \frac{5 \text{ (tnf)}}{16(\text{cm}) * (80\text{cm} + 4(16(\text{cm})))} = 0,22 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 61)$$

Según la sección 4.3.7.2 del presente documento, en ningún caso el esfuerzo a cortante debe ser mayor que¹⁹:

$$V_{\max} = 0,27 * M_{\text{RP}} = 0,27 * 5,81 = 1,57 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 62)$$

Luego como se observa en las Ecuaciones 59, 60 y 61, la losa propuesta cumple con los requerimientos de cortante.

5.9.3. Verificación de esfuerzo de contacto. Se verifica para la estantería, esfuerzo de contacto según Ecuación 34, para una carga concentrada de 5 (tnf) y un área de contacto de 400 (cm²).

$$\sigma_{\text{CONTACTO}} = \frac{5.000 \text{ kgf}}{400 \text{ cm}^2} = 1,25 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 63)$$

$$\sigma_{\text{MAX}} = 2.10 * M_{\text{RP}} = 2.10 * 5.80 = 12,20 \text{ MPa} \quad (\text{EC} - 64)$$

Luego la losa cumple con los requerimientos de esfuerzo de contacto.

¹⁹ THE CONCRETE SOCIETY. Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

6. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

La construcción de pisos superplanos representa la metodología de construcción de pisos de hormigón más rigurosa y exigente que se realiza en la actualidad. Si uno sólo de los elementos del proceso se subestima o se efectúa incorrectamente, la superficie resultante no será satisfactoria¹⁶.

Las tolerancias de un piso superplano se deberán inspeccionar dentro de las 24 horas posteriores a la construcción de la losa. Esto elimina la posibilidad de colar áreas grandes antes de cubrir algún problema de tolerancias¹.

6.1. PREPARACIÓN DEL TERRENO.

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/m².

Las formaleas laterales pueden ser de madera o metal. Se deben colocar a la elevación apropiada con estacas y el soporte necesario para mantenerlas derechas, alineadas y firmes durante el procedimiento completo de la colocación y el acabado tal como ilustra la Figura 37¹.

¹⁶ DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

Figura 37. Armado de formaleta lateral para franjas de vaciado y armado de cables de presfuerzo



Fuente: GÓMEZ S., Tomás E. Curso de concreto presfuerzo. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, 2019.

6.2. COLOCACIÓN DEL CONCRETO Y SECUENCIA CONSTRUCTIVA.

La reducción de la cantidad de juntas se logra al construir largas franjas de un ancho tal que logre ubicar las juntas debajo de las estanterías y de esta forma no afecten el tránsito de las máquinas a través de los pasillos de la bodega, además de asegurar que el ancho de la franja no supere el ancho de trabajo de la herramienta de enrase, para pisos superplanos varía entre 3 a 5 metros¹⁶.

Las instalaciones de losa de piso se deberán hacer en un ambiente controlado cuando sea posible. La protección contra el sol y el viento es crucial para el proceso

¹⁶ DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

de colocación y acabado. Todas las operaciones de manejo de concreto deberán reducir al mínimo la segregación¹.

La secuencia de construcción se realiza de acuerdo a las posibilidades que presente cada proyecto. En la mayoría de los trabajos se programa una secuencia desde adentro hacia afuera, por lo que primero se hace la pista central y luego se construyen las pistas que van a los lados de ésta¹⁶.

El comité 302 del Instituto Americano del Concreto, recomienda que¹:

- a) Las losas se construyan en franjas largas de menos de 6 m de ancho.
- b) El asentamiento del concreto se ajuste en el sitio de obra en no más de 13 mm del asentamiento programado.
- c) El suministro de concreto emplee suficientes camiones para asegurar un abastecimiento ininterrumpido de concreto.
- d) El concreto se deberá depositar tan cerca como sea posible de su posición final.

6.3. OPERACIONES DE EXTENDIDO Y COMPACTADO.

El extendido es la primera operación para generar una superficie plana, se deberá ejecutar con la meta de evitar la segregación. Para extensión manual usar palas de puente cuadrada o herramientas semejantes a los azadones tal como ilustra la Figura 38¹.

La compactación inicial del concreto en pisos, con la excepción de losas altamente reforzadas, se realiza generalmente en las primeras operaciones de extendido, vibrado, enrasado, aplanado y nivelado con regla¹.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

¹⁶ DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

La compactación apropiada alrededor de los anclajes de postensado y los elementos embebidos requiere vibración interna, pero se deberá tener cuidado de no emplear la vibración para extender el concreto, especialmente en las secciones más gruesas. La cabeza del vibrador deberá estar completamente sumergido durante la vibración, es apropiado insertar el vibrador verticalmente. Se debe evitar que el vibrador haga contacto con la subbase, puesto que podría contaminar el concreto con materiales extraños. En el caso estudiado de pisos postensados, al usar doble capa de polietileno entre la base y la losa, no se incurre a problemas de contaminación con materiales de subbase¹.

Figura 38. Extensión y compactado de concreto para losa con pala de puente cuadrada y regla vibratoria portátil.



Fuente: GÓMEZ S., Tomás E. Curso de concreto presforzado. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, 2019.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

6.4. OPERACIONES DE ENRASADO.

El enrasado debe hacerse inmediatamente después de la colocación. La exactitud de la operación de enrase es influida directamente por la estabilidad y el grado de nivelación de las cimbras o guías².

El ancho de guías, generalmente es de 3 a 5 m, será influido por la separación entre columnas además de hacer coincidir el sistema de cimbras y el método de enrasado con la tolerancia especificada para la planicidad. Cuando se aplican tolerancias estrictas de nivel, es acertado limitar el ancho de las franjas de enrasado. La longitud del dispositivo no debe ser mayor de 5 m para este caso¹.

La Figura 39 ilustra el proceso de enrasado de concreto para una losa sobre terreno por medio de una regla de enrase manual, sin requerimientos estrictos de planicidad.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

Figura 39. Enrasado de la superficie de la losa con regla manual de enrase.



Fuente: Fuente: CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. Guide to Industrial Floors and Pavements: design, construction and specification (CCAA T48). 3 ed. Sydney, Australia. Cement Concrete & Aggregates Australia, 2009.

6.5. OPERACIONES DE ACABADO.

Los pisos industriales que emplean endurecedores minerales o metálicos embebidos se destinan usualmente para tránsito fuerte y moderado. Estos endurecedores deber ser embebidos cerca de la superficie de la losa para proveer la dureza requerida, tenacidad y resistencia al impacto¹.

Se recomienda inicialmente distribuir uniformemente dos tercios aproximadamente de la cantidad especificada de endurecedor. El método más recomendado para distribuir el endurecedor es con esparcidor mecánico. Esperar a que el concreto fragüe lo suficiente para soportar el peso de una allanadora (helicópteros). Los

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

primeros pasos deberán ser en la dirección corta para asegurar que las irregularidades puedan identificarse fácilmente¹.

Posteriormente aplicar el tercio faltante del agregado mineral y extender a mano sobre la superficie de la losa. Enrasar la superficie empleando una llana. Eliminar las irregularidades y desplazar el exceso de material a los puntos bajos. Terminar el acabado con allanadora mecánica hasta producir una superficie lisa, densa y resistente al desgaste¹.

6.6. CURADO DEL CONCRETO.

El propósito fundamental es retardar la pérdida de humedad de la losa y reducir la carbonatación temprana de la superficie. La retención de humedad se puede emplear mediante varios métodos: inclusión de humedad, cubiertas para retención de la humedad y compuestos líquidos de curado que forman una membrana².

El curado con agua formando una lámina en forma de riegos o saturación, es práctico solo en áreas de losa sin juntas o donde el agua esté realmente confinada por retenedores para impedir humedecer la capa de subbase o saturar la subrasante¹.

El yute ha sido la cubierta húmeda más común, provee un abastecimiento continuo de humedad distribuido uniformemente sobre la superficie. Las cubiertas húmedas se deberán tender apenas se terminen las operaciones de acabado y se pueda producir daños a la superficie¹.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

² SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

Los compuestos de curado que forman membranas líquidas constituyen el método más socorrido para curar concreto. Las ventajas son el costo relativamente más bajo en el lugar, su aplicación inmediata al piso, la eliminación de la vigilancia durante el proceso y la oportunidad de un curado más largo sin interrupción. La Figura 40 ilustra el proceso de curado con una membrana líquida de aplicación en spray¹.

Figura 40. Aplicación de membrana líquida en spray para curado de losa



Fuente: CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. Guide to Industrial Floors and Pavements: design, construction and specification (CCAA T48). 3 ed. Sydney, Australia. Cement Concrete & Aggregates Australia, 2009.

Sin importar el método seguido, el proceso de curado se deberá comenzar tan pronto como se terminen las operaciones de acabado. Con cualquier tipo de cemento, se recomiendan normalmente siete días sin interrupción para curado con agua o con cubierta de retención de humedad¹.

¹ ACI COMMITTEE 302. Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15). Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

6.7. TENSIONAMIENTO DEL PRESFUERZO.

El tensionamiento se realiza en dos etapas según recomienda el *Post-Tensioning Institute*²⁶. Para la primera etapa cada franja debe adquirir un mínimo de 25-33% de resistencia nominal a compresión y se tensionará hasta un máximo del 50% de la elongación calculada. Esta resistencia se obtendrá en un rango de 24 a 73 horas, y deberá aplicarse lo antes posible con el fin de evitar agrietamientos en la losa²⁶.

Para la segunda etapa, se tensionarán los cables una vez el concreto de cada franja adquiera como mínimo el 75% de su resistencia nominal y se tensionará hasta obtener el 100% de la elongación calculada²⁶. La Figura 41 ilustra el proceso de tensionamiento de un sistema monotorón no adheridos en una losa de concreto sobre terreno.

Figura 41. Tensionamiento de cables no adheridos



Fuente: GÓMEZ S., Tomás E. Curso de concreto presforzado. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, 2019.

²⁶ COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006. 96 p.

7. CONCLUSIONES

En la actualidad, la normativa colombiana no provee un documento técnico para el diseño y construcción de losas sobre terreno para usos industriales, lo cual ha generado desconocimiento para los profesionales sobre las diversas tecnologías posibles para solucionar problemas de almacenamiento en grandes superficies. Debido a ellos, la normativa guía ha sido el ACI360R-10.

Para lograr una superficie catalogada como piso superplano, se requiere cumplir con valor de números F altos (sobre 50), para ello se deben cumplir operaciones especiales de enrasado y acabado, las cuales deber ser supervisadas y monitoreadas constantemente mediante medidores de nivelación y planicidad precisos.

Se siguió y enunció una metodología de diseño práctica para pisos industriales en concreto postensado, para uso de los profesionales en ingeniería civil, basada en el documento ACI360R-10. Donde se verifica el adecuado comportamiento del espesor de la losa por medio de ábacos de diseño elaborados por la organización *Portland Cement Association* frente a las cargas vehiculares, concentradas y distribuidas definidas, teniendo en cuenta la ganancia del esfuerzo a tensión del concreto al inducir fuerzas de presfuerzo en cables no adheridos. Así mismo se verifica el cumplimiento de esfuerzos mediante ecuaciones desarrolladas por Westergaard.

Los principales factores a revisar para el diseño de un piso postensado son, las cargas actuantes de vehículos y estanterías, área efectiva de apoyo de las cargas, fuerza residual de preesfuerzo inducida en el concreto, separación de torones, perdidas por tensionamiento y espesor de losa.

La implementación de acero de preesfuerzo en pisos industriales brinda grandes superficies planas, sin la necesidad de generar juntas de retracción ni losas con grandes espesores, caso contrario a otros tipos de losas, como, por ejemplo: losas reforzadas, donde es recomendable que la relación entre la longitud entre juntas y el espesor de la losa no sea superior a 23. Luego para ejemplo de diseño citado en el presente documento, si se hubiese diseñado para una losa reforzada, el espesor de la losa estaría cerca a los 20 cm y requeriría paneles con juntas espaciadas a 4,60 m aproximadamente.

El no requerimiento de juntas de retracción en pisos postensados beneficia los costos de operación, facilitando las actividades logísticas de equipos especiales para almacenamiento en grandes alturas y circulación de vehículos. A largo plazo reduce costos de mantenimiento inherentes al deterioro de las juntas.

BIBLIOGRAFÍA

ACI-ASCE COMMITTEE 423. *Specification for Unbonded Single-Strand Tendon Materials (ACI 423.7-14)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2014. 8 p.

ACI COMMITTEE 302. *Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2015. 75 p.

ACI COMMITTEE 360. *Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)*. Farmington Hills, MI. American Concrete Institute, 2010. 72 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. *Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements AASHTO T 222*. Enero de 2017. 10p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. *Standard Method of Test for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements AASHTO T 221*. Enero de 2017. 5 p.

ARIAS L., Germán Darío. Irregularidades superficiales de pisos y losas: Mantenimiento y reparación. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C. 2014.

ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DE PRETENSADO. Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Losas Postensadas con Tendones no Adherentes. Editorial Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1996. 164 p. ISBN: 978-84-380-0118-9.

ASTM International. *ASTM A416/A416M-18 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.

ASTM International. ASTM A421/A421M-15 *Standard Specification for Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2015.

ASTM International. ASTM A722/A722M-18 *Standard Specification for High-Strength Steel Bars for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2018.

ASTM International. ASTM C157/C157M-17 *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2017.

ASTM International. ASTM C78/C78M-18 *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2018.

ASTM International. ASTM E1155-14 *Standard Test Method for Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2014.

ASTM International. ASTM A706/A706M-16 *Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2016.

AVENDAÑO, A. Radier Postensado. En: Boletín de Información Tecnológica, Cámara Chilena de la Construcción. Julio de 1999. Nro. 14, pp.27-28.

AZZI, Victor D.; LAIRD, Ralph H. *Load-Carrying Capacity: Concrete Slabs-On-Grade Subject To Concentrated Loads*. En: Structural Magazine, discussions on design issues for structural engineers. Abril de 2008, pp. 18-21.

BRADBURY, R. D. *Reinforced Concrete Pavements*. Washington D.C. Wire Reinforcement Insitute, 1983. 190 p.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. *Guide to Industrial Floors and Pavements: design, construction and specification (CCAA T48)*. 3 ed. Sydney, Australia. Cement Concrete & Aggregates Australia, 2009. 117 p.

COLOMBIA. COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., enero de 2010.

COMITÉ DE ENTRENAMIENTO Y CAPACITACIÓN PTI DE PERSONAL DE CAMPO PARA POSTENSADO SIN TENDONES ADHERENTES. Manual Instructivo para el Entrenamiento y Certificación de Personal de campo para Postensado sin tendones adherentes. Farmington Hills, MI. Post-Tensioning Institute, 2006. 96 p.

COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. (CSI). *Software SAFE*. California, US.

DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE. *Concrete Floor Slabs-on-Ground Subjected to Heavy Loads, Chapter 15*. Washington D.C. 1987.

DIAZ, Daniel; VIDELA, Carlos. Tecnología de construcción de grandes pisos superplanos postensados. En: Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. Vol. 18, pp. 133-145.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Par 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Diciembre de 2004.

GARZÓN, Jaime E. Curso de Diseño de Puentes. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2019.

GÓMEZ S., Tomás E. Curso de concreto presforzado. Especialización en Estructuras, Cohorte VIII. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, 2019.

GONZÁLES CUENCA, Alberto; PALOS JOVANI, Eric. Grandes Distancias con Cero Fisuras: Postensado en Pavimentos y Pisos Industriales. En: Noticreto No. 63, Pisos sin Juntas. Junio de 2002, pp. 36-40.

GUNALAN, Kancheepuram N. Analysis of Industrial Floor Slabs-on-Ground for Design Purposes. Doctor of Philosophy, Civil Engineering. Lubbock, Texas: Texas Tech University, 1986. 262 p.

HEYMANN, Paul; STRUCTURAL SYSTEMS AFRICA. *Post-tensioning: the right solution*. En: Civil Engineering, South African Institution of Civil Engineering. Agosto de 2011, pp. 47-49.

INDUSTRIAL TRUCK ASSOCIATION. *Recommended Practices Manual*. Pittsburgh, Pa. 1985.

JUNGHEINRICH. [sitio web]. Especificaciones Carretilla preparadora trilateral eléctrica (1.250/1.500 kg). Disponible en: <https://www.jungheinrich.es/productos/carretillas-nuevas/carretillas-elevadoras/carretillas-elevadoras-el%C3%A9ctricas>.

KEITH, F.R.; HOLLAND, J.A. *And the Owner Said, "Let There Be Light...and no floor joints or cracks"*. En: Concrete Internacional Magazine, 1996. pp. 32-37.

LIN, T.Y. *Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado*. 1 ed. 4 imp. México, Compañía Editorial Continental, 1976. 701 p.

LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; ÁLVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. *Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008. 114 p.

LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto; FLÓREZ ZAPATA, Claudia Lucía. *Manual de diseño, Construcción y mantenimiento de pisos industriales*. Medellín. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2006. 70 p.

MONTOYA, Esneyder. *Curso de Estructuras Postensadas, Módulo 1: Principios Básicos del Postensado*, ciudad de Panamá.

NAWY, Edward G. *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. 5 ed. Prentice Hall, 2010. 949 p. ISBN: 0-13-608150-9.

NILSON, Arthur H. *Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado*. Editorial Limusa, 1997. 604 p. ISBN: 968-18-1304-9

PACLITE EQUIPMENT. [sitio web]. Catálogo Especialistas en Equipo de Compactación y Concreto. Disponible en: http://paclite-equip.com/pdf/catalogue-2014/PACLITE_2014_SPANICH.pdf.

PACKARD, Robert G. *Slab thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade*. Skokie, ILL. Portland Cement Association, 1996. 16 p.

SALSILLI MURÚA, Ricardo A. Manual de diseño de pisos industriales. 1 ed. Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013. 84 p.

SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Claves en construcción de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

SÁNCHEZ A., Iván Ricardo. Diseño de pisos industriales. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

THE CONCRETE SOCIETY. *Concrete Industrial Ground Floors: A guide to design and construction. Technical Report 34*. 4 ed. Camberley, UK. The Concrete Society, 2016. 92 p.

THE STRUCTURAL COMMITTEE OF THE FOUNDATION PERFORMANCE ASSOCIATION. *Comments on the Post-Tensioning Institute's: Design of Post-Tensioned Slabs-on-Ground"* (FPA-SC-14-0). 3 ed. Huston, Texas. The Foundation Performance Association, 2006. 48 p.

VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Puentes en Concreto Postensado: Teoría y Práctica. 2 ed. Bogotá, Editorial Bauen, 2011. 520 p. ISBN: 978-958-4450-48-7.

VSL Internacional. Aplicación del Postensado: Construcción de pisos industriales y pavimentos. En: Seminario Diseño y Construcción de Pisos Industriales. Memorias. Asocreto. Bogotá D.C. Julio de 2012.

WESTERGAARD, H. M. *On the Design of Slabs on Elastic Foundation with Special Reference to Stresses in Concrete Pavements*. En: *Ingenioem*, vol. 12. Copenhagen, 1923.

WESTERGAARD, H. M. *Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*. En: *Public Roads*, vol.7. Washington D.C. Abril de 1926.

WESTERGAARD, H. M. *Theory of Stresses in Road Slabs*. En: *Proceedings, 4th Annual Meeting*. Highway Research Board, Washington D.C. 1925.