

ESTUDIO EN LA FASE DE DISEÑO, DE LA AFECTACIÓN DEL FENÓMENO DE
ALABEO, EN UNA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO, DE UNA VÍA LOCAL DE LA
CIUDAD DE BOGOTÁ

LENIN ERNESTO DORADO VILLARREAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2022

ESTUDIO EN LA FASE DE DISEÑO, DE LA AFECTACIÓN DEL FENÓMENO DE
ALABEO, EN UNA LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO, DE UNA VÍA LOCAL DE LA
CIUDAD DE BOGOTÁ

LENIN ERNESTO DORADO VILLARREAL

Tesis presentada para obtener el título de
Magister en Infraestructura Vial

Dirigido por: Ing. Álvaro Enrique Rodríguez Páez
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2022

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 20 de mayo de 2022

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | 6 |
| LISTA DE TABLAS..... | 9 |
| RESUMEN..... | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 14 |
| 3. OBJETIVOS | 16 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL | 16 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 16 |
| 4. ALCANCE | 17 |
| 4.1. Metodología..... | 17 |
| 5. ESTADO DEL ARTE | 22 |
| 6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL..... | 26 |
| 6.1. Fenómeno de alabeo | 26 |
| 6.2. Factores que influyen en el alabeo..... | 27 |
| 6.2.1. Gradiente de temperatura..... | 27 |
| 6.2.2. Retracción o Contracción..... | 28 |
| 6.2.3. Curvatura incorporada | 28 |
| 6.2.4. Fluencia o arrastre | 28 |
| 6.2.5. Geometría de la losa..... | 29 |
| 6.2.6. Características de los materiales del concreto | 29 |
| 6.2.7. Capa Subyacente..... | 30 |
| 7. FASE EXPERIMENTAL..... | 32 |
| 7.1. Fase 1. Toma de temperaturas de la superficie y fondo de la losa de 20 cms de espesor | 32 |
| 7.1.1. Losa de concreto hidráulico | 32 |
| 7.2. Fase 2. Cálculo de temperatura de fondo de la losa de 10 y 30 cm y cálculo de gradiente térmico..... | 42 |
| 7.3. Fase 3. Identificación y selección de módulos de reacción k del suelo de soporte. | 47 |
| 7.4. Fase 4. Evaluación de máximas tensiones y deformación de la losa, por gradiente térmico, para espesores de losa de 10, 20 y 30 cm y (k) de suelo de soporte de 100,220 y 700 lb/pulg ³ | 49 |
| 7.5. Fase 5. Evaluación de máximas tensiones y deformación de la losa, por gradiente térmico, carga puntual en el centro de la losa, para espesores de losa de 10 y 30 cm y (k) de suelo de soporte de 100 y 700 lb/pulg ³ | 72 |
| 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 81 |
| 8.1. Fase 6. Análisis de resultados y alternativa seleccionada | 81 |
| 8.1.1. Alternativa de losa de concreto hidráulico sin restricciones y suelo de soporte de módulo de reacción K de 700 Lb/pulg ³ | 94 |
| 8.1.2. Alternativa de losa de concreto hidráulico con restricción y suelo de soporte de módulo de reacción K de 700 Lb/pulg ³ , más carga puntual de 13228 Libras. 94 | |
| 9. CONCLUSIONES..... | 96 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 10. | RECOMENDACIONES | 98 |
| 11. | REFERENCIAS | 101 |
| 12. | ANEXOS | 103 |
| 12.1. | Anexo 1. Toma temperatura de losa de 20 cm de espesor, 11:30 am, 3:30 pm, 5:30 pm, 7:30 pm, 11:30 pm, y 1:30 am..... | 103 |
| 12.2. | Anexo 2. Cálculo diferencial de temperatura losa de 20 cm 11:30 am, 3:30 pm, 5:30 pm, 7:30 pm, 11:30 pm, 1:30 am..... | 107 |
| 12.3. | Anexo 3. Cálculo de temperatura fondo de losa de 10 y 30 cm de espesor, 7:30 am, 9:30 am, 11:30 am, 3:30 pm, 5:30 pm, 7:30 pm, 11:30 pm, y 1:30 am. 109 | |
| 12.4. | Anexo 4. gráficas, evaluaciones y deformación losa de a.)20, b.)10, y c.)30 cm de espesor, 7.30 am, 9:30 am, 11:30 am, 3:30 pm, 5:30 pm: 7:30pm, 11:30pm, 1:30 am. | 120 |
| 12.5. | Ficha técnica presión de inflado neumáticos..... | 133 |
| 12.6. | Valores k especificaciones generales de carreteras Invias 2015 | 134 |
| 12.7. | Material granular especificaciones generales de carreteras Invias 2015 135 | |
| 12.8. | Anexo 5 correos electrónicos software islab2000 | 136 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ruta metodológica de investigación | 18 |
| Figura 2. Modelos estructurales de pavimentos rígidos a, b y c. | 20 |
| Figura 3. Modelos estructurales de pavimentos rígidos a y b más carga puntual | 21 |
| Figura 4. Diagrama de esfuerzos | 23 |
| Figura 5. Tomografía ultrasónica de la sección de pavimento rígido Illinois | 24 |
| Figura 6. Esfuerzos por cambio uniforme de temperatura | 27 |
| Figura 7. Losa PCC en condición de apoyo en capa subyacente | 30 |
| Figura 8. (a) longitud de losa, (b) ancho de losa | 32 |
| Figura 9. Geometría de la losa | 33 |
| Figura 10. Termómetro infrarrojo de materiales modelo pm6530a..... | 34 |
| Figura 11. Registro de la temperatura. Bogotá en grados celsius | 35 |
| Figura 12. Elevación solar | 35 |
| Figura 13. Losa 20 cm, espesor | 36 |
| Figura 14. Toma temperatura cara superior e inferior losa de 20 cm, 7:30 am | 37 |
| Figura 15. a) Registro temperatura. Bogotá y b) temperatura cara superior e inferior losa, 1:30 pm..... | 39 |
| Figura 16. a) Registro temperatura. Bogotá y b) temperatura cara superior e inferior losa, 9:30 pm..... | 40 |
| Figura 17. Módulos de reacción k, (mpa/m) | 48 |
| Figura 18. Presentación software islab2000 a) imagen corporativa islab2000. b) paneles de entrada de geometría, y decisión mallado de losa. c) paneles de información de capas y evaluación de esfuerzos y deformaciones | 50 |
| Figura 19. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm. | 52 |
| Figura 20. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm..... | 54 |
| Figura 21. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm..... | 56 |
| Figura 22. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm..... | 57 |
| Figura 23. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm. | 58 |
| Figura 24. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 30 cm, 9:30 pm..... | 60 |
| Figura 25. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm..... | 63 |
| Figura 27. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm..... | 64 |
| Figura 28. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm..... | 65 |
| Figura 29. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm..... | 65 |
| Figura 30. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 30 cm, 9:30 pm..... | 66 |
| Figura 31. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm..... | 68 |
| Figura 32. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm..... | 68 |
| Figura 33. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm..... | 69 |
| Figura 34. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm..... | 69 |
| Figura 35. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm..... | 70 |
| Figura 36. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior de la losa. b). deflexión máxima cara superior de la losa. espesor de 30 cm, a las 9:30 pm..... | 70 |
| Figura 37. Panel islab2000 conFiguración evaluación esfuerzos y deformación, caga puntual centro losa..... | 73 |
| Figura 38. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. d). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 10 cm, 1:30 pm..... | 74 |
| Figura 39. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 10 cm, 9:30 pm..... | 74 |
| Figura 40. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 30 cm, 1:30 pm..... | 75 |
| Figura 41. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 30 cm, 9:30 pm..... | 76 |
| Figura 42. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 10 cm, 1:30 pm..... | 77 |
| Figura 43. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 10 cm, 9:30 pm..... | 78 |
| Figura 44. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 30 cm, 1:30 pm..... | 79 |
| Figura 45. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 30 cm, 9:30 pm..... | 80 |
| Figura 46. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesores c) 10, d) 20 y e) 30 (cm), k: 100, Lb/pulg ³ , 1:30 pm..... | 81 |
| Figura 47. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesores c) 10, d) 20 y e) 30 (cm), k: 100, Lb/pulg ³ , 9:30 pm..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 48. Datos de resultados tensiones máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . a la 1:30 pm..... | 85 |
| Figura 49. Datos de resultados tensiones máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . a las 9:30 pm..... | 86 |
| Figura 50. Datos de deformación máxima, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . a la 1:30 pm..... | 87 |
| Figura 51. Datos de deformación máxima, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . a la 1:30 pm..... | 88 |
| Figura 52. Datos de tensiones máximas, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . más carga puntual p= 13228 Libras, a la 1:30 pm. | 90 |
| Figura 53. Datos de tensiones máximas, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ . más carga puntual p= 13228 Libras, a las 9:30 pm..... | 91 |
| Figura 54. Datos de deformación máxima, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg ³ y puntual p= 13228 Libras, a) 1:30 y b) 9:30 pm. | 92 |
| Figura 55. Graficas. a) losa sin restricción diurna, a1) losa con restricción diurna, b) losa sin restricción diurna, b1) losa con restricción nocturno. 30 cm de espesor. | 93 |
| Figura 56. Graficas. a) alternativa de losa sin restricciones, b) deflexión máxima diurna, c) deflexión máxima nocturna. | 94 |
| Figura 57. Graficas. a) alternativa de losa con restricción, b) deflexión máxima diurna, c) deflexión máxima nocturna..... | 95 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Inputs de entrada al software islab2000 | 33 |
| Tabla 2. Cálculo del gradiente de temperatura a las 7:30 am, losa de 20 cm de espesor | 38 |
| Tabla 3. Cálculo gradiente temperatura 1:30 pm, losa 20 cm, espesor | 40 |
| Tabla 4. Cálculo gradiente temperatura 9:30 pm, losa 20 cm de espesor | 41 |
| Tabla 5. Matriz de cálculo variación de temperatura para e_2 | 43 |
| Tabla 6. Cálculo temperatura cara inferior losa $e_2 = 10$ cm, 7:30 am | 44 |
| Tabla 7. Cálculo gradiente temperatura losa $e_2 = 10$ cm, 7:30 am | 45 |
| Tabla 8. Cálculo temperatura cara inferior losa $e_2 = 10$ cm, 1:30 pm | 45 |
| Tabla 9. Cálculo gradiente temperatura losa $e_2 = 10$ cm, 1:30 pm | 46 |
| Tabla 10. Cálculo temperatura cara inferior losa $e_2 = 10$ cm, 9:30 pm | 46 |
| Tabla 11. Cálculo gradiente temperatura losa $e_2 = 10$ cm, 9:30 pm | 46 |
| Tabla 12. Comparación métodos de cálculo diferencial de temperatura asstho vs Idust21 | 47 |
| Tabla 13. Valores módulo reacción k en unidades de ingeniería inglesa | 49 |
| Tabla 14. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 20$ cm con módulo de reacción $k = 100$ Lb/pulg ³ | 51 |
| Tabla 15. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 10$ cm con módulo de reacción $k = 100$ Lb/pulg ³ | 55 |
| Tabla 16. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 30$ cm con módulo de reacción $k = 100$ Lb/pulg ³ | 58 |
| Tabla 17. a) inputs entrada losa $e = 10$ cm. b) inputs entrada losa $e = 20$ cm. c) inputs entrada losa $e = 30$ cm. | 61 |
| Tabla 18. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 10$ cm con módulo de reacción $k = 220$ Lb/pulg ³ | 62 |
| Tabla 19. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 20$ cm con módulo de reacción $k = 220$ Lb/pulg ³ | 64 |
| Tabla 20. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 30$ cm con módulo de reacción $k = 220$ Lb/pulg ³ | 65 |
| Tabla 21. a) Inputs entrada losa $e = 10$ cm. b) Inputs entrada losa $e = 20$ cm. c) Inputs entrada losa $e = 30$ cm. | 66 |
| Tabla 22. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 10$ cm con módulo de reacción $k = 700$ Lb/pulg ³ | 67 |
| Tabla 23. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 20$ cm con módulo de reacción $k = 700$ Lb/pulg ³ | 68 |
| Tabla 24. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 30$ cm con módulo de reacción $k = 700$ Lb/pulg ³ | 69 |
| Tabla 25. Evaluación esfuerzos y deformación losas 10,20 y 30 cm, espesor módulo reacción $K = 100$ Lb/pulg ³ | 71 |
| Tabla 26. Evaluación esfuerzos y deformación losas 10,20 y 30 cm espesor módulo reacción $k = 220$ Lb/pulg ³ | 71 |

| | |
|--|----|
| Tabla 27. Evaluación esfuerzos y deformación losas de 10,20 y 30 cm espesor módulo reacción $k = 700 \text{ Lb/pulg}^3$. | 72 |
| Tabla 28. Inputs entrada evaluación esfuerzos y deformación losas 10 y 30 cm, espesor | 72 |
| Tabla 29. Evaluación esfuerzo, deformación losa $e = 10 \text{ cm}$ módulo reacción $k = 100 \text{ Lb/pulg}^3$ | 73 |
| Tabla 30. Evaluación esfuerzo, deformación losa $e = 30 \text{ cm}$ módulo reacción $k = 100 \text{ Lb/pulg}^3$ | 75 |
| Tabla 31. Evaluación esfuerzo, deformación losa $e = 10 \text{ cm}$ módulo reacción $k = 700 \text{ Lb/pulg}^3$ | 77 |
| Tabla 32. Evaluación esfuerzo, deformación losa $e = 30 \text{ cm}$ módulo reacción $k = 700 \text{ Lb/pulg}^3$ | 79 |
| Tabla 33. Datos de resultados tensiones y deformación máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción $k 100,220$ y 700 Lb/pulg^3 . a la 1:30 y 9:30 pm. | 84 |
| Tabla 34. Datos de resultados tensiones y deformación máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción $k 100$ y 700 Lb/pulg^3 . más carga puntual $p = 13228$ libras, a la 1:30 y 9:30 pm. | 89 |

RESUMEN

Las características del alabeo, llevan a constituirse en uno de los fenómenos con mayores efectos sobre las losas de concreto hidráulico, empleadas en las construcciones viales en las zonas urbanas, debido a que, produce un deterioro prematuro y progresivo en dichas estructuras cuando son expuestas a grandes presiones como las que se observan en el servicio de tráfico. Por ende, para el campo de la ingeniería es importante identificar, definir, implementar y evaluar procesos que permitan disminuir el impacto negativo en dichas estructuras a causa de la acción de la temperatura *in situ*, en ese sentido, es fundamental conocer el gradiente térmico de cada lugar en el que se proyecta la construcción de vías con pavimento rígido, esto con el propósito de generar las condiciones apropiadas para una mayor durabilidad y confort de los materiales empleados, teniendo en cuenta las reflexiones que pueden producirse sobre este tipo de losas de concreto hidráulico.

En este orden de ideas, el cumplimiento de los objetivos trazados para la investigación, se llevó a cabo mediante el empleo del método alternativo de cálculo de correlación de temperatura LDUST21, además de la usanza del software libre de elementos finitos ISLAB2000, creado por la Universidad de Illinois para el análisis de estos procesos. Ahora bien, la aplicación de estos métodos de estudio sobre del comportamiento de las losas de pavimento rígido de una vía de la ciudad de Bogotá, permitió conocer el comportamiento del esfuerzo generado por la temperatura de estas superficies. Los resultados, llevaron a comprender cómo las tensiones máximas transversales, longitudinales y la deformación máxima sobre las losas, presentan cambios físicos durante los días en lo que hay una mayor luminosidad. Por otra parte, el estudio también contribuyó a reconocer medio que ayudaran a minimizar los efectos del fenómeno del alabeo diurno y nocturno, ya sea por modificación del espesor de la losa o la rigidez del suelo de soporte.

1. INTRODUCCIÓN

Según los criterios propuestos por Loaiza et ál. (2015) los efectos causados por el cambio de temperatura durante el día y la noche, pueden ser considerados como uno de los principales responsables del agrietamiento prematuro que ocurre en las losas de concreto hidráulico dispuesto al servicio del tráfico en las ciudades. Dicho fenómeno conocido como alabeo, al aunarse a factores como el aumento de la atenuación de curvatura a causa de la relación de la temperatura y la combinación de la carga vehicular son los que desencadenan de forma temprana efectos de agrietamiento por fatiga.

Por su parte, autores como Imad (2020) reconoce que el alabeo provoca un desequilibrio y perturbación en el desempeño de los pavimentos rígidos, puesto que, el comportamiento de las losas de concreto hidráulico puede asociarse a la estabilidad de la estructura del pavimento, se relaciona con la durabilidad y confort del material empleado. En la actualidad los países en vías de desarrollo tienen poco interés en la formulación de estrategias y estudios que busquen mejorar las condiciones de confort de los usuarios, pues una de las problemáticas emergentes en esta discusión, está en que, la creación del pavimento no se fundamenta en las necesidades de los usuarios sino desde los intereses particulares. En contraste con la realidad mencionada, Imad admite que en países desarrollados si se habla de las bases conceptuales que permiten mejorar la calidad y cumplimiento de las necesidades de los usuarios a partir de soluciones de ingeniería que ofrecen perspectivas hacia la maximización de los estándares de seguridad y confort.

Desde otras miradas, los efectos provocados por el alabeo en vías con pavimento rígido, tanto en los sectores urbanos como rurales, conducen a la necesidad de proponer estudios que resalten la importancia de comprender los fenómenos asociados a los cambios de temperaturas entre zonas, la rigidez del suelo de soporte natural, subbases o bases, además de las características de diseño y construcción con pavimento rígido, a fin de minimizar los efectos del alabeo, mediante investigaciones de campo y modelación computacional que faciliten el mejoramiento de las técnicas de construcción, reduciendo al máximo los efectos del alabeo a partir del aprovechamiento de una mejor interacción del gradiente térmico, en cada uno de los sitios en los que se proponen estos proyectos viales (By et ál., 2021).

En este orden de ideas, los conocimientos adquiridos alrededor de estos procesos de investigación, facilitaron una mayor caracterización de los materiales de construcción, así como, los procesos de mejoramiento de subrasante, la preparación de subbases y bases, los cuales deben asociarse a las propiedades mecánicas, pues mediante estos procesos de caracterización se permite determinar los parámetros para conformar la elección de materiales favorables hacia una mejor empleabilidad del pavimento rígido, en relación con las condiciones del espesor de la losa y el módulo de reacción K del suelo de soporte, todo esto en aras de determinar estructuras de pavimento que mitiguen los efectos del alabeo diurno y nocturno sin la necesidad de desmejorar las condiciones del pavimento.

Por ende, la selección de estos materiales deberá suplir a cabalidad las demandas y exigencias presentadas por el impacto de las cargas de tráfico (Imad, 2020).

Como puede verse, bajo los intereses propuestos por esta investigación, la búsqueda de soluciones desde el campo de la ingeniería, estuvieron orientadas a mitigar el impacto del alabeo en las losas de concreto hidráulico, teniendo en cuenta las condiciones de la ciudad de Bogotá. En este caso, considerando las particularidades de la vía local seleccionada en Bogotá, se contemplaron los cambios de temperatura según las evaluaciones del software ISLAB2000, así mismo, este proceso de investigación se apoyó en los resultados encontrados por Ballou et ál. (2012) quienes evaluaron los efectos desde los esfuerzos de temperatura, las cargas de rueda, así como el análisis de las tensiones físicas y los comportamientos de reflexión de las losas empleadas, esto con el propósito de conocer la deformación máxima de dichos materiales en su condición libre y conforme se especifica en la metodología racional del cálculo de esfuerzos y deformaciones del modelo de Westergaard (1926) bajo condiciones críticas.

Finalmente, teniendo como referencia los conocimientos dispuestos por como subbase, bases, concreto hidráulico (2000) los resultados emergentes con esta investigación, condujeron al surgimiento de interrogantes como, ¿cuál debe ser la rigidez del suelo de soporte, y el espesor de losa para dar respuesta al objetivo planteado? Para lo cual, se hizo fundamental escoger, acoger, armonizar y unificar una variabilidad de conocimientos relacionados con el cálculo del gradiente térmico, el máximo positivo y negativo, así como, la capacidad portante de los suelos, la mecánica de los materiales como subbase, bases, concreto hidráulico y los modelos racionales de esfuerzo y deformaciones, mediante los cuales se ofrezca una respuesta satisfactoria ante la interrogante realizada.

2. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, se ha identificado que uno de los factores comunes relacionados con la creación y generalización de un pavimento rígido, se encuentra fundamentada en el desconocimiento de las características propias del diseño de estos materiales, así como, el ignorar las posibles consideraciones antes del inicio de las obras viales. De este modo, el incremento de un impacto negativo asociado al alabeo, está vinculado de forma directa con la falta de especificaciones sobre los gradientes térmicos máximos positivos y negativos de cada lugar, además de la sobredimensión de las estructuras y la carencia de análisis reales sobre la interacción de la temperatura in situ y la influencia que ésta ejerce sobre la elección del espesor de la losa y la rigidez del suelo de soporte; todo esto no permite definir una propuesta adecuada frente al diseño de un pavimento rígido que se ajuste a las necesidades y demandas que requiere cada proyecto de acuerdo con las particularidades del contexto.

Desde esta perspectiva, hablar sobre la reducción de los costos en el diseño y construcción de un pavimento rígido, que se ajuste a las condiciones de espesor de la losa y la rigidez del suelo de soporte, y, además, tenga en cuenta la maximización de la vida útil de estos materiales, son aspectos que deben abordarse en la fase de diseño, pues en este punto del proyecto, en donde se tienen en cuenta los requisitos indispensables para formular de estos proyectos viales. En el caso específico de una área local ubicada en la ciudad de Bogotá, en el que circulan vehículos tipo liviano, debe cumplirse con los requerimientos de consumo por fatiga, propuestos por Ballou et ál. (2012) y que buscan evitar el sobredimensionamiento de la estructura del pavimento, de ahí la importancia de considerar y conocer las variables de diseño, el clima, los materiales, además del nivel vehículos que transitan por dicha vía, pues esta información permitirá escoger un mejor tipo de pavimento que cumpla con una vida útil de servicio.

De este modo, los resultados de la presente investigación, viabilizaron conocimientos útiles que sirve para reducir el impacto del alabeo en la losas de concreto hidráulico, puesto que, gracias a estos resultados se facilitó establecer las características del pavimento acorde a cada uno de los escenarios en los que se empleará dicho producto, para ello, es fundamental debe considerarse aspectos como los espesores de la losa y el grado de rigidez del suelo de soporte, dado que, la profundización y conocimientos acerca de la importancia de estos parámetros tendrán una connotación especial que contribuyan al desarrollo, transformación y evolución de la ingeniería de carreteras.

Considerando los aspectos aludidos, uno de los aportes que se dieron con el desarrollo de esta investigación; por una parte, estuvo en estudiar y dar a conocer que existe una respuesta específica por parte de la losa de concreto hidráulico, la cual se vincula con los cambios de temperatura de la superficie tanto en las condiciones diurnas como nocturnas de un día luminoso. Gracias a estos aportes, pudo ofrecerse una solución viable a las problemáticas de fisuras prematuras que se derivan del fenómeno del alabeo. Así mismo, otra de las contribuciones realizadas se enfocó en describir la relación de la losa de

concreto hidráulico al gradiente térmico máximo positivo y negativo frente a los cambios de temperatura y su impacto sobre el espesor rigidez del suelo de soporte.

Finalmente, es oportuno reconocer que de acuerdo con la guía de diseño propuesta por Ballou et ál. (2012) los parámetros a considerar sobre el gradiente de temperatura en el día están entre los 0.055 a 0.077 °C/mm y durante la noche la mitad de los valores señalados. De igual manera, la mirada de Stiegel y Swanson (2006) se concibe que el diseño por fatiga, resulta impráctico a la hora de combinar los efectos de tránsito y temperatura, debido a que, mientras durante la vida útil del pavimento, pueden transitar millones de ejes, lo cual demuestra que los movimientos en la losa por temperatura están limitados, de esta manera, se ignora los efectos de ondulación debido a que, la temperatura puede variar dependiendo de la hora en la que se considere realizar estas evaluaciones, de ahí que, puede adicionarse o sustraerse información específica de tránsito que circula por la vía (Akin, 2020). Así mismo, no puede ignorarse la información suministrada por Zhou et ál. (2019) en la que define los parámetros del gradiente térmico de la siguiente manera: Día: Esfzo Tto + Esfzo Temp y Noche: Esfzo Tto – Esfzo Temp, con lo cual se parte que, la vida útil del pavimento depende de la puesta en servicio de la vía y no de los efectos del alabeo previo al inicio de la apertura del tráfico.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Prever el fenómeno de alabeo en una losa de concreto hidráulico utilizando el software ISLAB2000 en su condición previa a su puesta en servicio al tráfico, para de esta manera analizar las tensiones y deflexión máximas que ocurren en la losa de pavimento rígido por acción del gradiente térmico máximo positivo y negativo, en su condición previa a su puesta en servicio al tráfico, según la hora del día y noche en un día soleado, en la vía local de la ciudad de Bogotá y escoger la alternativa de espesor de losa y rigidez del suelo de soporte que mejor mitiguen los efectos del alabeo diurno y nocturno en su condición de losa sin restricción y con restricción.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar el gradiente térmico máximo positivo y negativo para distintos espesores de pavimento rígido, con base a la toma de temperatura in situ de la cara superior e inferior de losa de concreto hidráulico de 20 cm de espesor.
- Simular el fenómeno del alabeo que ocurre en una losa de concreto hidráulico previo a su puesta en servicio al tráfico, con base al cálculo de la variación de temperatura presente a distintas horas del día en la vía local de la ciudad de Bogotá.
- Comparar las tensiones máximas y deflexión máxima que se presentan para distintas combinaciones de espesores de losa de concreto hidráulico y distintos módulos de reacción K del suelo de soporte, de acuerdo con el esfuerzo generado por la temperatura y carga puntual en el centro de la losa.
- Escoger el espesor de losa y módulo de reacción K del suelo de soporte que, mitiguen los efectos del alabeo diurno y nocturno en su condición de losa con restricción y sin restricción.

4. ALCANCE

Debido a las características de alta densidad de los centros urbanos, se observa como las vías locales, en su mayoría de los casos están configuradas con una tipología de pavimento rígido que, no cumple con los estándares requeridos para ofrecer una calidad proporcional frente a las demandas del contexto, ya que en la mayoría de los casos, las estructuras viales de estas zonas, no cuentan con el mantenimiento periódico y oportuno que requiere, de ahí que, no se puedan mitigar oportunamente las problemáticas que surgen a lo largo del tiempo.

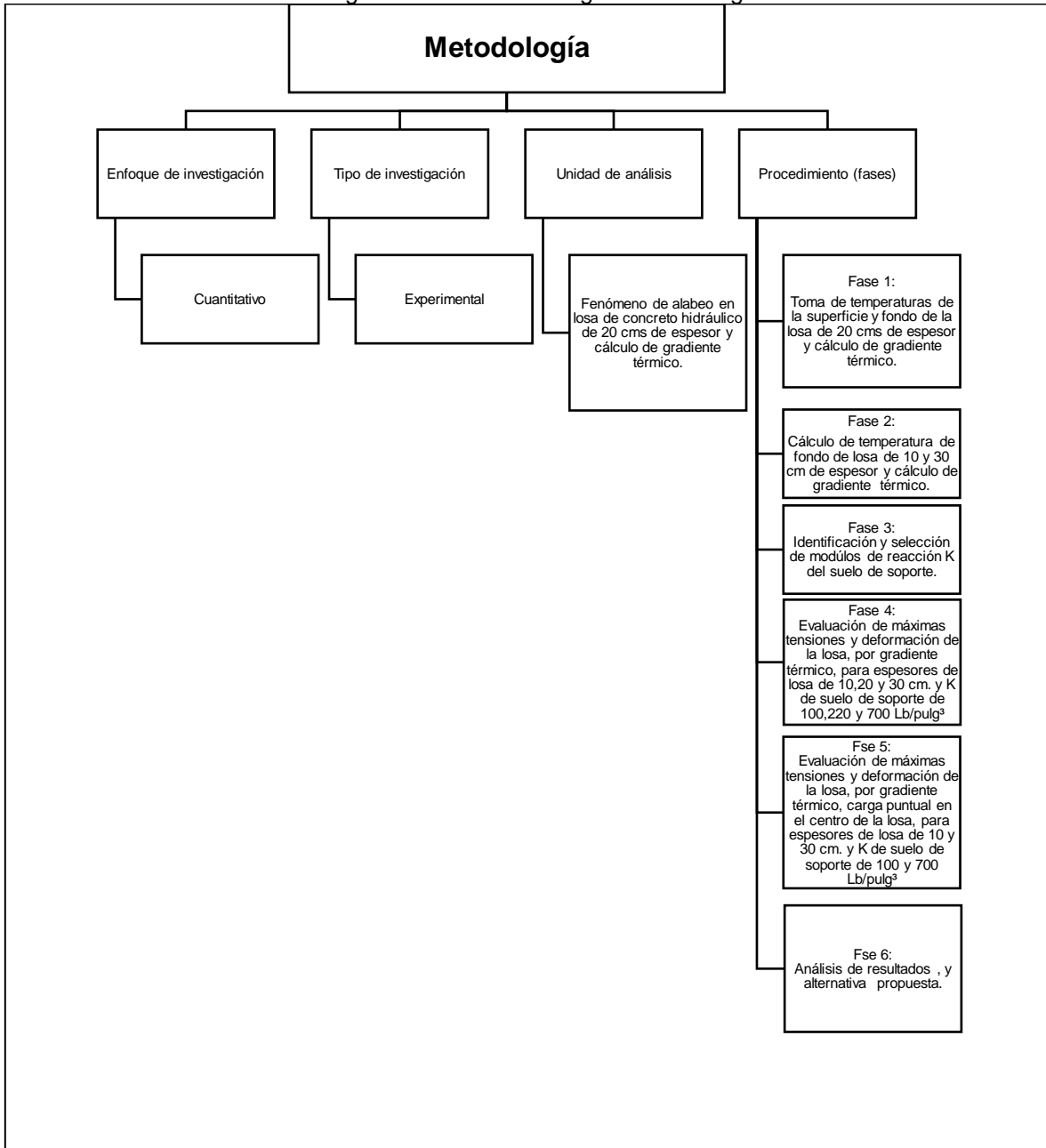
Por ende, el uso de estas tecnologías afianzadas en modelos matemáticos computacionales de elementos finitos, contribuye a realizar una adecuada estimación de los esfuerzos y deformaciones que pueden experimentar los pavimentos rígidos como consecuencia del fenómeno del alabeo. No obstante, la aplicación de estas herramientas se encuentra limitada a la evaluación de las vías que conforman las arterias secundarias de los centros urbanos, como la que se encuentra en la localidad de San Cristóbal en Bogotá, la cual se caracteriza por mostrar una alta densidad de población y donde se hace necesario la implementación de sistemas que contribuyan a mejorar las alternativas de diseño, en aras de ofrecer una mayor vida útil de pavimento, reduciendo así los procesos de mantenimiento y/o arreglo debido a daños funcionales o estructurales que ocurran en estas estructuras viales.

Acorde con las particularidades de la situación afrontada por la infraestructura vial ubicada en San Cristóbal, cabe resaltar que, presenta altos niveles de vulnerabilidad y poca inversión por parte de la alcaldía local y el distrito capital, de ahí que, la implementación de esta investigación, posibilitó ofrecer un control en el diseño y creación de un tipo de pavimento rígido que se ajuste a las necesidades de la zona, optimizando así, un equilibrio sustentable entre el espesor de la losa y el tipo de suelo de soporte, así como, una relación con las características socio-ambientales tales como: la temperatura, la humedad, las condiciones materiales y el tráfico.

4.1. METODOLOGÍA

En la Figura 1, se da a conocer la ruta metodológica empleada como parte de los lineamientos requeridos para dar cumplimiento a los objetivos trazados al inicio del estudio:

Figura 1. Ruta metodológica de investigación



Fuente: Elaboración propia

Los procesos de análisis de los esfuerzos y deformación de la losa de concreto hidráulico, se ha constituido en un tema de interés para diversos estudios que buscan evaluar los cambios uniformes que se presentan en estos materiales debido a Las temperaturas por gradiente térmico y las acciones de las cargas, por ejemplo, desde los aportes realizados por Ballou et ál. (2012), puede resaltarse el empleo de la siguiente ecuación $\Delta T = \delta t * H$

para calcular el gradiente térmico máximo positivo de temperatura asumiendo valores de 2.5 A 3.5 °F/Pulg en función del espesor de losa (Tran & Roesler, 2022).

Sin embargo, cabe resaltar lo mencionado por Stiegel y Swanson (2006), quienes resaltan que en las simulaciones realizadas con programas de elementos finitos, no se utiliza los gradientes de temperatura del proyecto, obteniendo de este modo resultados que inducen a conceptualizar erróneamente la salida de información del software utilizado.

Por lo tanto, para esta investigación se consideró conveniente la toma de temperaturas de la superficie de una losa de concreto hidráulico de 20 cm de espesor, proceso que inició a las 7:30 a.m. con intervalos de posturas hasta la 1:30 a.m., para ello se empleó un termómetro infrarrojo de materiales, a fin de no emplear la ecuación normalizada por Ballou et ál., para el cálculo del gradiente de temperatura máximo positivo y negativo, la cual posibilitaba obtener información imprecisa. De este modo, el análisis del esfuerzo y deformación de la losa de concreto hidráulico se estudió desde la respuesta al gradiente térmico calculado con base a las temperaturas de la superficie y fondo de la losa, por ende, se posibilitó caracterizar de forma directa el fenómeno del alabeo y sus efectos sobre la geometría la losa durante el día y la noche de un día luminoso en una vía local de la ciudad de Bogotá.

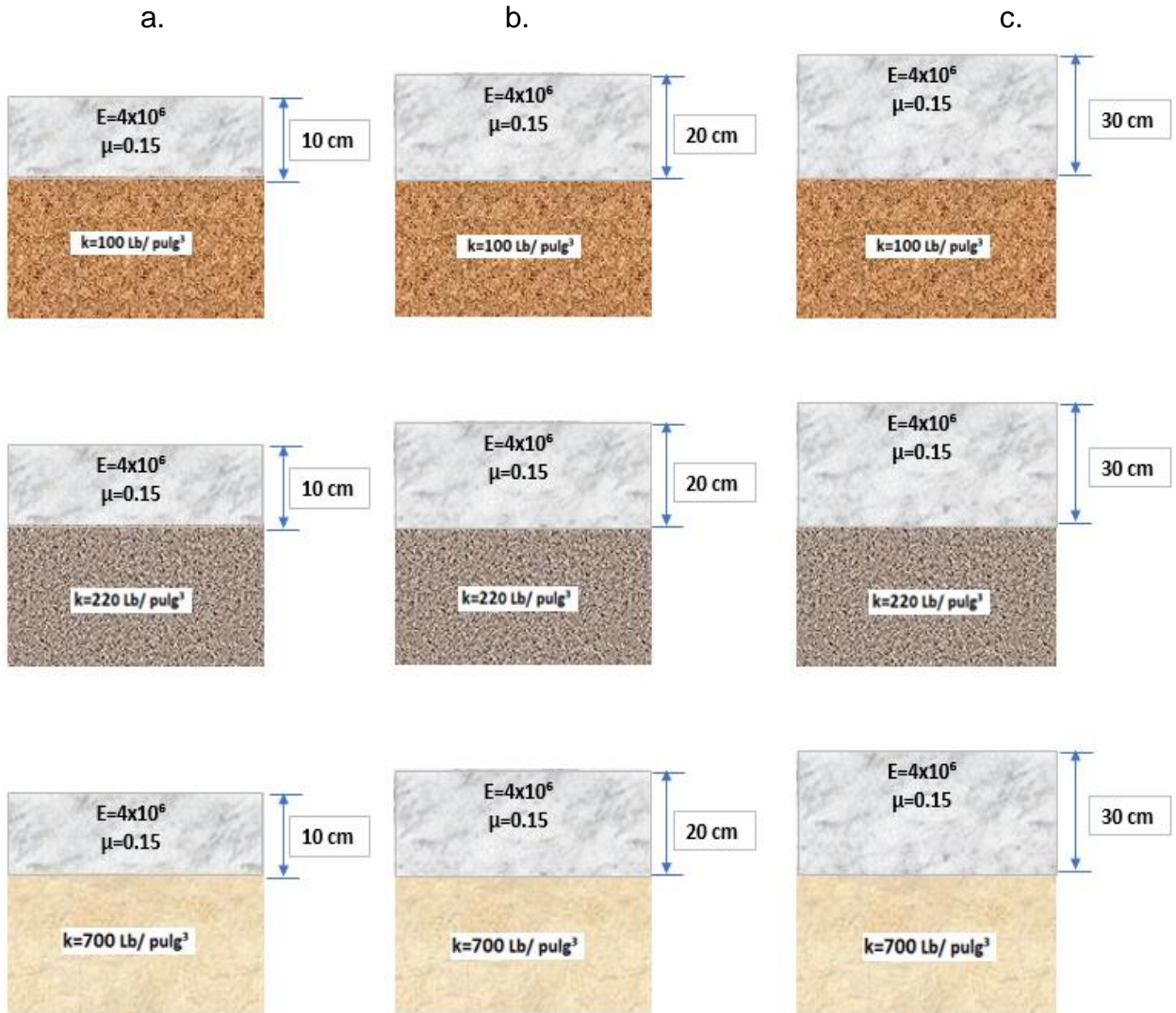
Por otra parte, para identificar la respuesta a los esfuerzos por temperatura y carga puntual en el centro de la losa, se tomó como referencia el cálculo correlacional de las temperaturas del fondo de la losa de espesores entre los 10 a 30 cm, asumiendo que se encuentran en la misma zona de estudio, pues en función de las temperaturas de la superficie de la losa, se calcula el gradiente térmico máximo positivo y negativo, a fin de modelar en el software de elementos finitos ISLAB2000 la interacción de las variables de gradiente térmico, espesor de losa, y módulo de reacción K del suelo de soporte, como parte del cálculo matemático computacional de las máximas tensiones y deformación de las losas en mención.

Posteriormente se analizó los cambios físicos de la losa bajo combinaciones de espesores de la misma, así como de los módulos de reacción K del suelo soporte, considerando los gradientes térmicos calculados en el día y la noche los cuales se obtuvieron como parte del trabajo de campo en la vía local de la ciudad de Bogotá.

En este punto, cabe señalar que el trabajo realizado se llevó a cabo mediante la usanza de los modelos estructurales relacionados en la Figura 2, los cuales muestran las características del pavimento rígido a, b y c, con los valores asociados a los módulos de reacción K del suelo de soporte y los espesores de losa. De igual manera, para la obtención de información relevante para esta investigación, vinculada con el cambio tensional, la deformación que sufre la losa al someterse a los gradientes máximos del día y noche, se obtuvo como respuesta que la combinación de los espesores de losa y los cambios de rigidez del suelo de soporte, según el módulo de reacción K de subrasante, el cual se trabajó de acuerdo a los valores K suministrados por Invias (2013). Una vez evaluados los modelos de la Figura 2 que muestra las estructuras de pavimento rígido: a, b y c. De igual manera, se analizó las estructuras a y c incorporando al modelo anterior

una carga puntual en el centro de la losa a fin de obtener la mayor incidencia al fenómeno de alabeo, con relación a su proporcionalidad de espesor de 3:1.

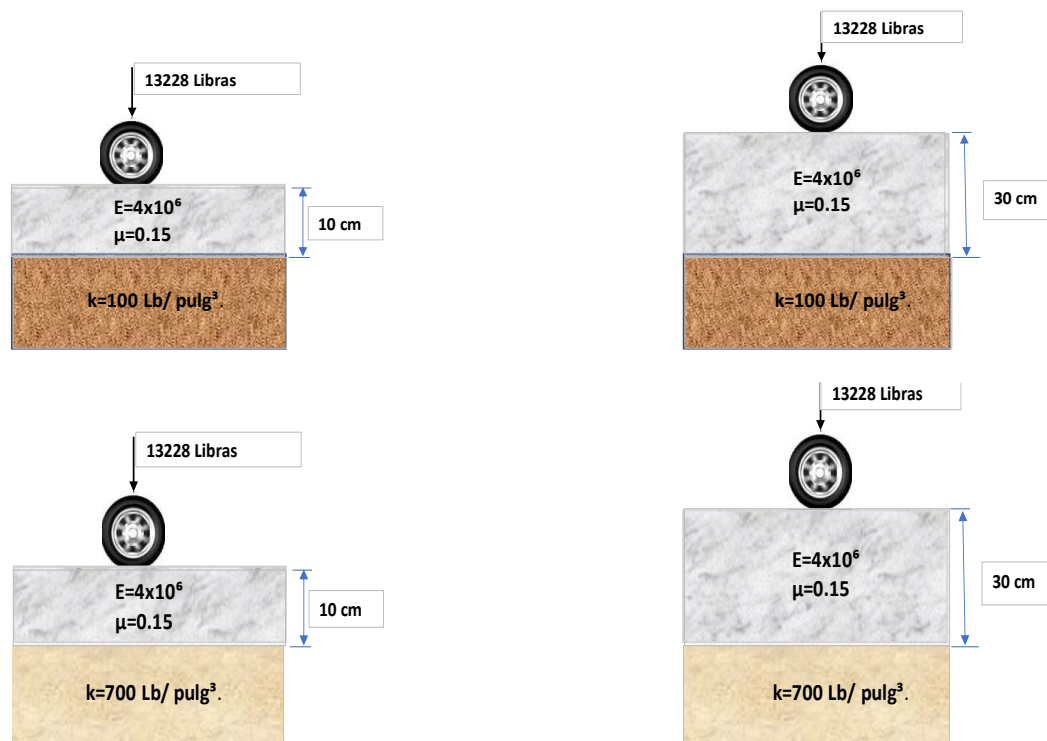
Figura 2. Modelos estructurales de pavimentos rígidos a, b y c.



Fuente: Elaboración propia

De este modo, tal como se observa en la Figura 3, se llevó a cabo el análisis de las estructuras a y c, incorporando una carga puntual que actuó en el centro de las losas seleccionadas para el análisis.

Figura 3. Modelos estructurales de pavimentos rígidos a y b más carga puntual



Fuente: Elaboración propia.

Al identificar cada uno de los modelos empleados para este análisis, se prosiguió a realizar la evaluación computacional en el software libre de elementos finitos ISLAB2000 inteligencia artificial desarrollada por ((*Una Evaluación Mecanicista Preliminar de Las Secciones Transversales de PCC Uso de ISLAB2000 – Un Estudio Paramétrico*, n.d.), University of Minnesota and University of Illinois)) cedido a través de su distribuidor mundial (Chan Becker-Cbecker-ara.(2019)), mediante el empleo de este software se posibilitó ofrecer un aporte fundamental a la presente investigación, el cual se orientó a afianzar un desarrollo de análisis mecanicista, que se fundamenta en los modelos estructurales planteados para obtener las tensiones y deformaciones unitarias, que se evaluarán posteriormente.

Una vez valorado y analizado el cambio tensional entre la losa y el suelo de soporte, como respuesta a los esfuerzos del gradiente térmico máximo positivo y negativo, amplificado desde la diferencial de temperatura lineal encontrada, con base a la condición de losa sin restricción se procedió a incluir para la evaluación de esfuerzos y deformación, aspectos como la carga puntual en el centro de losa, de tal manera que, la condición de la losa estuvo mediada por una restricción a fin de que, el momento flector de losa sea representativo para su análisis.

5. ESTADO DEL ARTE

Son diversos los estudios que han abordado el tema del fenómeno del alabeo y el desempeño de las losas de concreto bajo la acción de la temperatura, la humedad, las presiones externas y otros elementos del contexto.

Por ejemplo, el trabajo realizado por Dong et ál. (2020), se enfocó en estudiar los avances en la deformación y el fallo del pavimento en concreto hidráulico, bajo la acción del conjunto de la humedad, la temperatura y la carga de las ruedas de los vehículos que ejercen de una u otra manera deterioro en las carreteras. Los autores establecieron que la deformación y el agrietamiento del concreto hidráulico, puede constituirse como responsables de diversos procesos de deterioro que reducen la durabilidad y la vida útil del pavimento. De esta manera, los resultados presentados por los autores revelaron que la acción conjunta de la temperatura ambiental, la humedad y la carga de las ruedas causan grietas y afectan seriamente al servicio normal y a la durabilidad de los pavimentos rígidos.

Las principales conclusiones presentadas por Dong et al (2020), fueron las siguientes: en primer lugar, evidenciaron que el concreto es un material típicamente poroso, información que puede contrastante con la teoría de la transferencia de humedad y calor, desde el cual se ha obtenido información suficiente que permite simular las propiedades higrotérmicas del concreto, y la relación entre la humedad y el calor manera clara. En segundo lugar, se determinó que el pavimento de concreto hidráulico regularmente está sometido a la acción de acoplamiento higrotérmico-mecánico en servicio, lo cual le ofrece características de un periodo similar y su posible efecto de fatiga. Finalmente, los autores dieron a conocer que el software COMSOL tiene ciertas ventajas para resolver el acoplamiento higrotérmico-mecánico del concreto hidráulico.

Asimismo, Higuera (2012 citado en González, 2012) a través de su estudio pudo evidenciar cómo ha evolucionado la aplicación de elementos finitos para el chequeo de losas de concreto hidráulico. En este orden de ideas, la modelización por elementos finitos de estructuras rígidas de pavimentos ha cobrado mayor importancia en los últimos años debido al gran avance tecnológico, pues permite conocer con mayor precisión el comportamiento real de una estructura vial bajo condiciones de carga y efectos ambientales. Desde esta perspectiva, el método se basa en el análisis numérico para la determinación de tensiones y deflexiones utilizando la discretización del elemento conectado a través de nodos y arcos, donde la precisión de los resultados es directamente proporcional al tamaño de la malla con la que se trabaja; es decir, cuanto menor sea la discretización o división del elemento, más precisos serán los resultados.

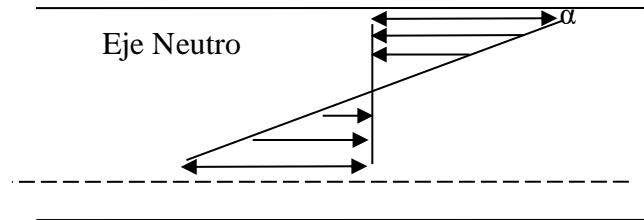
Por lo tanto, desde las descripciones realizadas por González (2012) la porosidad del pavimento de concreto hidráulico, presenta una textura porosa del 20 al 25%, lo cual implicaría que se dé la transferencia de humedad y calor desde la superficie de la losa hasta el fondo de la misma.

Por otro lado, desde las observaciones realizadas por Young et ál. (2014) puede establecer que los esfuerzos por alabeo están definidos como el doblamiento de un plato infinito teniendo una losa libre al movimiento, donde la temperatura en la cara superior sea mayor que en la inferior, la parte superior se expandirá con una deformación de $\alpha \Delta t/2$ y la cara inferior se contraerá con una deformación similar como la que se muestra en la Figura 4:

Figura 4. Diagrama de esfuerzos

Esfuerzo total por alabeo

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \alpha t \cdot \Delta t}{2 (1 - \mu)}$$



Fuente: Elaboración propia con base a lo descrito por (Yang et al.,2016):

σ_x : Es el esfuerzo total por alabeo en libras/pulgada ²

E: Es el módulo elástico del concreto en libras /pulgada ²

αt : Es el coeficiente de expansión térmico del concreto en pulgadas/pulgadas/°F

Δt : La diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior de la losa

μ : Es la relación de Poisson del concreto. (La cual según González (2012) puede definirse como el parámetro del material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo).

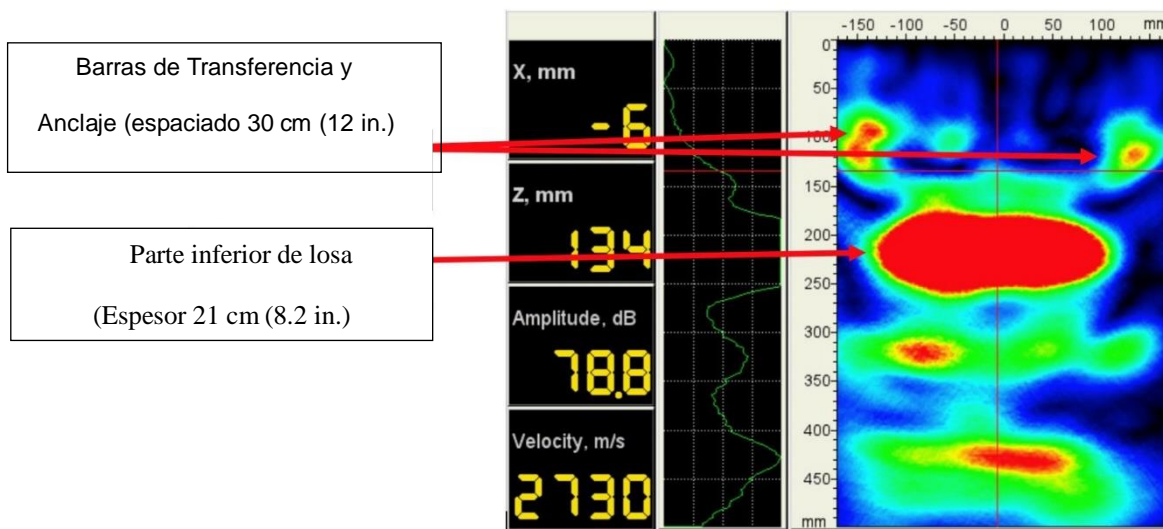
Otro de los trabajos que se identificaron en relación con el tema de la presente investigación, lo llevó a cabo el Centro de Transporte de Illinois (2020) alrededor del proyecto TIC R27-193-4, el cual se enfocó en estudiar las causas por grietas prematuras, transversales y longitudinales en pavimentos de concreto hidráulico en vías urbanas, por lo cual se hizo necesario un trabajo de campo en 67 secciones de la infraestructura vial de Illinois, mediante la evaluación ultrasónica para sintetizar el alcance del agrietamiento prematuro en la JPCP urbana.

El estudio visual mostró que algunas grietas transversales y longitudinales eran el resultado de una geometría incorrecta (longitud excesiva de la losa y ancho). De la misma manera, los análisis tridimensionales de elementos finitos confirmaron que el agrietamiento no se desarrollaría como resultado de factores ambientales normales y la restricción de fricción de la base de la losa, confirmando de este modo que, la mezcla de concreto hidráulico tampoco pareciera ser un factor que contribuyera a los agrietamientos prematuros. Sin embargo, se determinó que, la falta de lubricación en los pasadores de transferencia de carga era uno de los causantes en producir tensiones excesivas de

tracción en la losa, lo cual implicó el desarrollo de grietas transversales prematuras (By et al., 2021).

Por otra parte, el registro de las imágenes ultrasónicas registradas durante el proceso de estudio, contribuyeron a detectar aspectos como: el grosor de la losa, la colocación de la barra de transferencia de carga y la barra de amarre (profundidad y espaciado), y si se activa una junta de contracción como la observada en la Figura 5, en la cual se indica una imagen tomográfica tomada de un proyecto específico y su interpretación desarrollado en las vías urbanas de Illinois (By et al., 2021).

Figura 5. Tomografía ultrasónica de la sección de pavimento rígido Illinois



Fuente: Jeffery Roesler (<https://orcid.org/0000-0001-6194-269X>), John DeSantis (<https://orcid.org/0000-0002-3391-025X>),

De acuerdo con los elementos aludidos hasta ahora, puede señalarse que existen pocos estudios que se han centrado en analizar los efectos del alabeo y su impacto sobre la capacidad de evaluar la dinámica que se ejerce por la carga vehicular en la deformación de la losa de concreto hidráulico. No obstante, autores como la Autoridad Estatal de Autopistas de Illinois (2020) llevaron a cabo su estudio de análisis de 16 losas de concreto hidráulico de 1.8 x1.8 m y 15 cm de espesor, arrojando como resultado que la capacidad de carga de dichas losas está supeditada por acciones como la resistencia a la flexión, lo cual se corroboró mediante el empleo del software de elementos finitos ISLAB2000, desde el cual se encontró que la relación entre la capacidad de flexión de la losa y su resistencia, se rigen más por las propiedades de fractura del concreto hidráulico y la geometría de la losa que de los criterios de resistencia convencionales, aspectos que pueden corroborarse gracias a los resultados propuestos por Brand y Roesler (2014).

En este orden de ideas, el informe suministrado por la American Concrete Pavement Association, deja entrever la necesidad e importancia de profundizar en estudios

científicos que permitan abordar la realidad de este tema a partir de fundamentos desde los cuales puedan instituirse los mecanismos y estrategias de atención frente a las necesidades que se presenta en la infraestructura vial. En este sentido, puntos de referencia recolectados durante el 2003 a 2019 por la Administración Federal de Carreteras en colaboración con Terry Murphy, Meyer Material Company, Stark Excavating and Randell Rieley, permitieron corroborar que en las losas de concreto hidráulico la criticidad de sus daños prematuros están asociados a que, en lugares donde la temperatura ambiente son muy altas, y la mezcla es transportada para su fundición afectan las propiedades plásticas de la misma, lo cual aumenta la demanda de agua y por consiguiente un incremento en la pérdida de humedad debido al proceso exotérmico, conllevando así, una tendencia al agrietamiento por contracción que sumado al menor control que se ejerce por el contenido de aire arrastrado ocasiona daños sobre la infraestructura vial.

Desde los lineamientos planteados por By et ál. (2021) cabe señalar que las altas temperaturas de la mezcla también afectan las propiedades importantes del concreto hidráulico endurecido, lo cual representa una disminución en la resistencia final, aumentando de manera directa la tendencia a la humedad y las grietas de contracción térmica, así como, la disminución de la durabilidad del material y la disminución de la uniformidad de la apariencia de la superficie.

De esta manera, tal como lo alude en Tran y Roesler (2022) es importante considerar que las investigaciones realizadas en Estados Unidos en relación con el estudio de pavimento rígido, llevan a ofrecer una información documentada, la cual se le atribuye a organizaciones y entidades como la Universidad de Illinois, en acuerdo interadministrativo con el Departamento de Transporte de Illinois y la Administración Federal de Carreteras, las cuales han desarrollado con éxito investigaciones sobre la construcción de carreteras de concreto hidráulico en climas cálidos, cuyo objetivo principal fue desarrollar especificaciones y procedimientos mejorados con respecto al monitoreo y mantenimiento de la calidad del concreto a corto plazo y largo plazo, esto con el fin de desarrollar una mejor comprensión de los efectos de las temperaturas más altas en las propiedades de concreto hidráulico fresco y endurecido en carretera.

De acuerdo con lo anterior, cabe destacar que, para lograr avances en la ingeniería de pavimentos en Colombia, es necesario ejecutar trabajos de campo que se sienten en reconocer el impacto e incidencia del fenómeno de alabeo, por lo que se requiere de esfuerzos mancomunados de la academia, el Estado y la empresa privada, para obtener información verídica acerca del comportamiento de las losas de concreto hidráulico de cada ciudad de nuestro país. En este sentido, vale la pena reconocer la perspectiva de Popovics et ál. (2013) para quienes los pedimentos rígidos deben adecuarse a la estructura local que conforman todas sus variables, que influyen en su desempeño durante su vida útil.

6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

6.1. FENÓMENO DE ALABEO

En esta fase del estudio se exponen las conceptualizaciones y teorías relacionadas con las variables involucradas en el problema de investigación abordado, siendo la principal el fenómeno de alabeo, así como sus correspondientes dimensiones e indicadores.

Para Mccullough y Rasmussen (1999), es importante resaltar que el alabeo del pavimento (PCC), se encuentra vinculado a los cambios en las condiciones ambientales, los cuales pueden dar lugar a casos como la deformación hacia arriba (cóncava) o hacia abajo (convexa). De este modo, la temperatura y la humedad son dos de los factores con mayor influencia en los cambios volumétricos del PCC, puesto que, esto provoca una deformación inducida por el gradiente de temperatura no uniforme, el cual es conocido como curvatura.

Normalmente, cuando la parte superior de una losa de PCC tiene una temperatura más alta que la parte inferior, se inducirá un gradiente positivo, por lo que, la parte superior de la losa de PCC experimentará una mayor expansión que la parte inferior, dando lugar a una curvatura o alabeo de la losa hacia abajo. Por el contrario, si la losa de PCC tiene una temperatura más alta en la parte inferior, se producirá un gradiente negativo, provocando que la parte inferior de la losa experimenten de una mayor expansión que la parte superior, desencadenando de este modo, una curvatura o alabeo de la losa hacia arriba (Issa, 2017).

En este orden de ideas, tal como lo plantean Tran y Roesler (2022) el gradiente de temperatura positivo suele producirse durante el día y un gradiente de temperatura negativo suele producirse durante la noche. Por tanto, tal como lo señalan Popovics et ál. (2013) es común observar que los efectos de curvatura relacionados con las inversiones de temperatura en la deflexión de la losa son diurnos, dado que, en este periodo ocurre una mayor variación estacional.

Además, el efecto diurno de la temperatura tiene un mayor impacto durante la noche y en la mañana del día siguiente. Sin embargo, hay que señalar que los cambios diurnos de la temperatura ambiente sólo afectan al perfil de temperatura de la mitad superior de una losa PCC mientras que los cambios estacionales de temperatura ambiente pueden afectar al perfil de temperatura de toda la profundidad de una losa PCC. La diferencia de temperatura entre la mitad de la profundidad y el fondo de una losa debido a los efectos diurnos es casi insignificante (Akin, 2020).

En este orden de ideas, de acuerdo con lo señalado por Akin (2020) el alabeo de la losa de PCC puede causar tensiones, pues una vez desencadenado este fenómeno en la losa de concreto, las restricciones de la misma tenderán a ejercer tensiones de tracción en la losa que resiste la respuesta de deformación diferencial en toda la profundidad de la

misma. Por lo tanto, las magnitudes de las tensiones críticas de tracción suelen estar determinadas por cambios repentinos y drásticos en la temperatura ambiente.

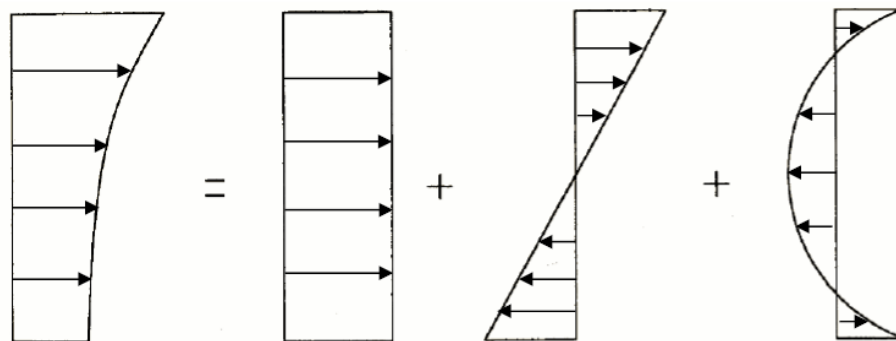
6.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ALABEO

A continuación, se presenta los factores que influyen en el fenómeno de alabeo de las losas de concreto.

6.2.1. Gradiente de temperatura

Según By et ál. (2021) El gradiente de temperatura dentro en la profundidad de la losa de concreto puede calcularse, restando el total de la temperatura en el fondo de la losa, al total de la temperatura en la superficie de la misma, en este caso, debe suponerse una distribución lineal de la temperatura, tal como se observa en la Figura 6, los esfuerzos por un gradiente de temperatura positivo pueden ser inducidos por temperaturas más altas en la superficie de la losa que el fondo, condición dada durante las horas del día, mientras que, un gradiente de temperatura negativo puede ser inducido por temperaturas más altas en el fondo de la losa que en la superficie durante la noche.

Figura 6. Esfuerzos por cambio uniforme de temperatura



Fuente: Ruiz et al.,2005

De acuerdo con las concepciones del siglo XX acerca de la tributación línea de temperatura, ésta puede determinarse como el menor tiempo y esfuerzo computacional visualizado de forma clara en los gradientes de temperatura. En este sentido, Janssen y Snyder (2000 citados en Imad, 2020) propusieron el concepto de “temperatura-momento” para cuantificar los perfiles de temperatura del pavimento y demostraron un método de cálculo de la temperatura-momento, mediante el cual se cuantificó los gradientes de temperatura para el posterior análisis de las tensiones. De este modo, para Imad (2020) el gradiente de temperatura puede tener una influencia más significativa en la deflexión del pavimento que el gradiente de humedad. Por lo tanto, se ha dado más importancia al efecto del gradiente de temperatura en los procedimientos de diseño de pavimentos de concreto, ya que las tensiones de curvatura relacionados con la temperatura pueden

magnificarse cuando se combinan con la carga de las ruedas y pueden iniciar el agrietamiento por fatiga, aunque las tensiones de curvatura no superen las tensiones admisibles (Louiza et al., 2015).

6.2.2. Retracción o Contracción

La retracción es uno de los factores con mayor influencia en el alabeo de las losas de concreto, pues se produce cuando el concreto sufre una disminución de longitud o de volumen (Kosmatka et al. 2002). De este modo, para Issa (2017) la contracción puede verse afectada por aspectos como: el diseño de la mezcla de concreto, el contenido de humedad ambiental, el nivel de saturación de las capas subyacentes y las condiciones de curado. Finalmente, los retracción diferencial por causa de la humedad pueden ser el principal factor que contribuya al alabeo de la losa; pues tal como lo señalan Hansen y Nieboer (2015) la pérdida total de humedad puede verse como resultado de la contracción por secado y la contracción autógena.

6.2.3. Curvatura incorporada

Kim et al. (2011) aluden que, los cambios ambientales diarios y estacionales influyen en la deflexión de las losas de PCC relacionadas con el curvado y el alabeo transitorio, en este caso, la misma es repetible y reversible a través de los cambios de temperatura y/o gradiente de humedad. Sin embargo, Issa (2017) reconoce que lo más probable es que una losa de PCC se enrosque o deforme durante su vida útil incluso sin cambios de gradiente de temperatura y/o humedad.

Generalmente, la curvatura incorporada se ve afectada por la temperatura ambiente, el fraguado del concreto y los factores de diseño del pavimento, incluyendo la separación de las juntas, las barras de espiga, el tipo de subcapa y los coeficientes térmicos de los materiales utilizados (Zhou et al., 2019).

6.2.4. Fluencia o arrastre

La fluencia o arrastre es una propiedad fundamental de los materiales que describen el comportamiento de la deformación en función del tiempo de un pavimento de concreto sometido a una carga o tensión sostenida. La deformación por fluencia inducida dentro de la parte superior del pavimento es capaz de generar un cambio en el movimiento de la losa de concreto bajo ciclos de deformación con respecto al tiempo (Issa, 2017).

En este caso, tal como lo alude Imad (2020) sí la construcción del pavimento en concreto hidráulico se realiza durante las horas del día, el potencial de contracción en seco aumenta debido al rápido secado de la superficie a causa de la temperatura ambiente relativamente más alta. Por ende, la fluencia inducida durante el secado del concreto es propensa a reducir el rizado hacia arriba y el alabeo, el grado de curvatura incorporada hacia arriba en las esquinas de la losa disminuirá con el tiempo debido a los efectos viscosos de la fluencia.

6.2.5. Geometría de la losa

Para Popovics et ál. (2013) la geometría de la losa se concibe como el grosor y la longitud de ésta, lo cual influye en las tensiones de curvatura y alabeo. Por lo general, un aumento del grosor de la losa puede reducir las tensiones de curvatura, por lo tanto, las losas de concreto más delgadas son más susceptibles de curvarse y alabearse debido al menor peso de su concreto y a la mayor contracción por secado. Sin embargo, todos los métodos de diseño de espesores de pavimentos de PCC anteriores al MPEDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide), no consideraban los efectos del rizado resultante de los gradientes de temperatura (Tran & Roesler, 2022).

Por su parte, Zhou et al. (2019) observaron que la deflexión por curvatura disminuía en un 50% cuando el espesor de la losa se cambiaba de 6 a 8 pulgadas. Así mismo, Stiegel & Swanson (2006) basaron sus investigaciones sobre las tensiones de JPCP (Jointed Plain Concrete Pavement) en trabajos de campo con instrumentos en los que se encontró que las losas más delgadas, presentaban mayor tensión que las losas gruesas bajo la misma separación. Por ende, en comparación con las losas de concreto hidráulico más gruesas, las losas más delgadas presentan un menor momento de inercia, lo cual les vuelve propensas a la flexión.

De acuerdo con Akin (2020) la disminución de la longitud de la losa también puede conducir a menores tensiones de curvatura, sin embargo, a pesar de que en principio gracias a los resultados de la ecuación de Westergaard y la tabla de Bradury, se pensó que la longitud de la losa tenía poca importancia sobre el tema de tensiones en las curvatura, hoy en día gracias a los aportes realizados por McCullough y Rasmussen (1999) es posible reconocer que la longitud de estos elementos no afecte a las tensiones de curvatura del pavimento de PCC sin pasadores de transferencia de carga, debido a que, en las juntas transversales éstos pueden doblarse para resistir la contracción de las losas de hormigón. Asimismo, Stiegel y Swanson (2006) reconocen que, procesos como la contracción debido al cambio de temperatura, se ven inducidas por tensiones de tracción adicionales.

6.2.6. Características de los materiales del concreto

De acuerdo como lo señalan Tran y Roesler (2022) el módulo de elasticidad del concreto, puede definirse como la relación entre las tensiones y la deformación correspondiente. Por ende, este módulo puede influir en el curvado y el alabeo, porque está relacionado con el comportamiento de fluencia y relajación de tensiones referidas al concreto. De este modo, cuando se habla de mayores valores de elasticidad, puede señalarse que el concreto se muestra más rizado, lo cual se deba a una mayor auto desecación, así como una menor fluencia y relajación hacia abajo de la losa curvada con el tiempo. Consecuentemente, los autores en mención refieren que el módulo de elasticidad del concreto depende de la rigidez del árido grueso, por tanto, entre más altos a los valores de rigidez, se producirán concretos con mayores valores de elasticidad.

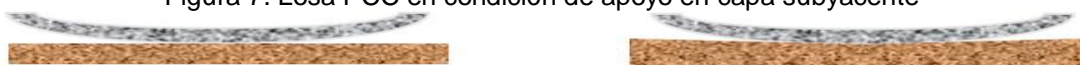
Desde los aspectos aludidos, se hace oportuno reconocer que, además del módulo elástico, debe tenerse en cuenta una de las medidas de contracción o expansión del volumen del concreto en respuesta a las variaciones de temperatura, el cual se asocia al CTE, pues como lo determinan Popovics et ál. (2013) este tipo de factores de medición permite establecer que el pavimento de PCC con valores CTE más altos, esto puede provocar mayores cambios de volumen cuando se someten a gradientes de temperatura similares. En consecuencia, se produce una mayor deflexión de curvatura. En este sentido, puede hablarse de que una diferencia drástica en los valores de CTE entre la capa de PCC y la capa subsiguiente, esto puede provocar tensiones de curvatura significativas, lo cual se debe a que las magnitudes de la deformación son diferentes para las dos capas adyacentes, lo cual desencadena grandes extensiones de fricción, conduciendo a tensiones de curvatura significativas. En este sentido, los valores arrojados por el CTE en el concreto, dependen del tipo de árido y el grado de saturación. Por ejemplo, el concreto con piedra caliza tiene un valor de CTE relativamente menor en comparación del concreto con otro tipo de áridos.

Finalmente, los aportes realizados por Zhou et ál. (2019), conducen a establecer que, durante los últimos años, las propiedades térmicas del concreto o de los áridos, así como los valores del CTE o la conductividad térmica (TC) y la capacidad calorífica (CH), han recibido una mayor atención como propiedades importantes del material, dado que, esto permite controlar el curvado de los pavimentos de PCC.

6.2.7. Capa Subyacente

En este caso, autores como Mccullough y Rasmussen (1999) dieron a conocer que, una alta fricción entre la capa superior de PCC y la capa subsiguiente, se constituían en uno de los principales factores que afectaban la propagación de las grietas en el concreto. Para descubrir estos aspectos los autores utilizaron un modelo de EF en 3D y los elementos de interfaz, mediante los cuales modelaron la interacción entre la losa de PCC y su capa subsiguiente. Entre los hallazgos logrados, Mccullough y Rasmussen dieron a conocer que el coeficiente de fricción era mayor en las losas más cortas que en las más largas y que las tensiones máximas se generaban en el centro de la losa. Este hallazgo representó coincidencias con las evidencias mostradas por Ruíz et ál. (2005), quienes determinaron que la fricción es proporcional a la longitud de la losa, pero independientes del espesor de la misma. En este caso, como se observa en la Figura 7, la losa de PCC no refleja el estado de la capa de soporte subyacente, porque ésta no es plana. Es así como en la Figura se da a conocer las condiciones de apoyo bajo losas de PCC, suponiendo una cimentación plana idealista (izquierda) y una representación realista en la que se incluyen efectos del asentamiento (derecha).

Figura 7. Losa PCC en condición de apoyo en capa subyacente



Fuente: Elaboración propia con información de Ruiz et al.,2005

En este caso, según lo mencionan Popovics et ál. (2013) la producción de la curvatura en una capa subyacente rígida, resiste el asentamiento de la losa en la capa subsiguiente. No obstante, debe considerarse lo planteado por By et ál. (2021) quienes aluden que una capa subsiguiente blanda, puede generar menos tensiones de curvatura debido al efecto de "lecho", el cual reduce el efecto de la restricción de las subyacente. Sin embargo, desde la visión de Issa (2017) puede reconocerse que, si se tiene en cuenta las cargas de tráfico vehicular en, las tensiones críticas de tracción pueden ser mayores en un pavimento de PCC con una base blanda, debido a que las cargas de tráfico tienden a causar mayores reflexiones, ya que existe una menor resistencia de la capa subyacente en comparación con la de reflexiones causadas por las gradientes de temperatura y humedad.

7. FASE EXPERIMENTAL

Esta fase investigativa permitió tratar los aspectos metodológicos asociados al cumplimiento de los objetivos del estudio, de esta manera, se tuvo en cuenta el tipo de investigación, materiales, métodos y procedimiento utilizado.

De este modo, los resultados obtenidos se fundamentaron en la toma de tres temperaturas de la superficie y fondo de la losa de concreto hidráulico de 20 cm de espesor de la fía local en la ciudad de Bogotá. En un primer registro de temperatura el primer registro de temperatura se realizó a las 7:30 a.m., con intervalos de dos horas hasta la siguiente toma de temperatura, dicho proceso finalizó a la 1:30 a.m., para el registro de la información obtenida, se realizó el diseño de una matriz de cálculo en la que se encontró el gradiente térmico de cada obra diurna y nocturna. No obstante, debido a que el software ISLAB2000 opera en unidades de ingeniería inglesa, se hizo necesario convertir la temperatura de grados Celsius °C a Fahrenheit °F.

De este modo, los datos obtenidos sobre la información del gradiente térmico de la losa, posteriormente se empleó como parte de análisis del gradiente térmico máximo positivo y negativo. Por otra parte, es importante señalar que en adelante los aspectos relacionados con la losa de concreto hidráulico, únicamente se conocerán como losa y los gradientes del día y de la noche como gradiente positivo y negativo.

7.1. FASE 1. TOMA DE TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE Y FONDO DE LA LOSA DE 20 CMS DE ESPESOR

7.1.1. Losa de concreto hidráulico

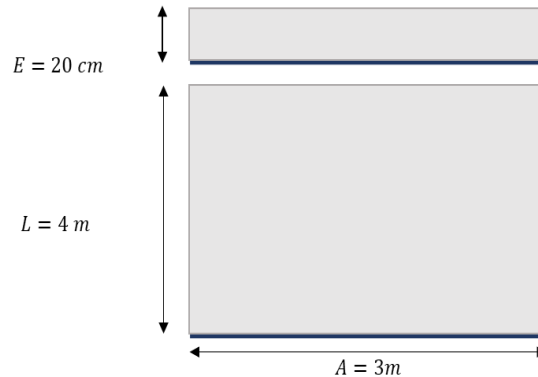
Descripción. Losa de 20 cm de espesor con una longitud de 4 m y un ancho de 3 m. Las dimensiones de la losa se indican en la Figura 8 (a) y (b), en la que se muestra la losa evaluada in situ, por otra parte, en la Figura 9, se da a conocer los aspectos referidos a la geometría de la losa.

Figura 8. (a) longitud de losa, (b) ancho de losa



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Geometría de la losa



Fuente: Elaboración propia

Concreto para pavimento rígido. Reconociendo los aspectos señalados por la AASHTO (2003) es importante que el reconocimiento de la resistencia mecánica especificada para los pavimentos de concreto rígido, debe asociarse a elementos como la tracción por fricción, la cual es adoptada por los métodos de diseño de esta tipología de pavimentos según lo establecen entidades u organismos como la AASHTO-93, PCA, INVIAS e IDU para periodos de diseño de 20 años, de acuerdo con el módulo de elasticidad del concreto de 4×10^6 . Como se observa en la tabla 1, se muestran los valores utilizados como inputs de entrada para el software ISLAB2000, los cuales se ubican en unidades de acuerdo con los parámetros de la ingeniería inglesa. Ahora bien, al considerar la evaluación de esfuerzo y de formación de las losas en estudio, esto se fundamentará en función del valor del espesor de la losa y el valor del módulo de reacción K, manteniéndolo como un valor constante para los casos según las características del concreto hidráulico y las dimensiones de la losa.

Tabla 1. Inputs de entrada al software islab2000

| | | | |
|--|---|----------------------|----------------------|
| Módulo elástico del Concreto | = | 4×10^6 | Psi |
| Relación de Poisson Concreto | = | 0.15 | |
| Espesor de losa | = | Variable | Pulg. |
| Dimensión de la losa | = | 118.11 x 157.48 | Pulg2 |
| Tamaño de la malla | = | 12 x 12 | Pulg2(medio) |
| Módulo k | = | Variable | Lb/pulg ³ |
| Coefficiente de exp. térmico, α | = | $4,4 \times 10^{-6}$ | Pulg./Pulg./°F |

Fuente: Elaboración propia, con información de American Association Of State Highway And Transportation Officials (Transporte, 2003) y Thomas Van Dam, PhD., P.E Universidad tecnológica de

Michigan. Paquete de talleres de transferencia de tecnología PCC ISLAB2000.

Toma de temperatura de la superficie y fondo de la losa. Para llevar a cabo este proceso de recolección de temperatura, se utilizó un termómetro infrarrojo de materiales, el cual permite registrar el valor de temperatura sin entrar en contacto con el material. De acuerdo con las características de este instrumento, se posibilitó una consistencia en la toma de temperatura del concreto hidráulico, de ahí que, se procede a realizar el respectivo registro de la emisividad del material en grados Celsius °C, el cual está estandarizado en un nivel de $\epsilon = 0.95$, según lo registra el manual de usuario del termómetro elegido (ver anexo 1). En la Figura 10, se presenta el termómetro manual de referencia Redline modelo PM6530A, asimismo, se puede observar que este instrumento cuenta con una pantalla digital luminosa que facilita la lectura de manera clara, además de poseer un procesador de datos que contiene información de emisividad para distintos materiales.

Figura 10. Termómetro infrarrojo de materiales modelo pm6530a

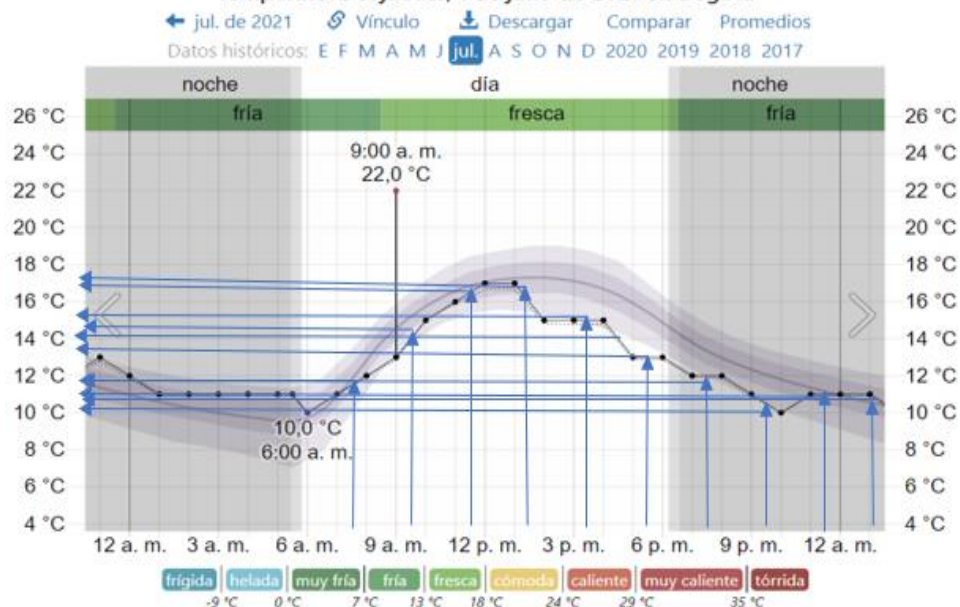


Fuente: Elaboración propia

Día seleccionado para la toma de temperatura en la superficie y fondo de la losa. Para la evaluación del comportamiento de la losa en relación con la acción de la temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá, fue oportuno considerar un día de luminosidad que cumpliera con las condiciones básicas medio ambientales de baja nubosidad y sin precipitaciones, a fin de no afectar la toma de temperaturas en los

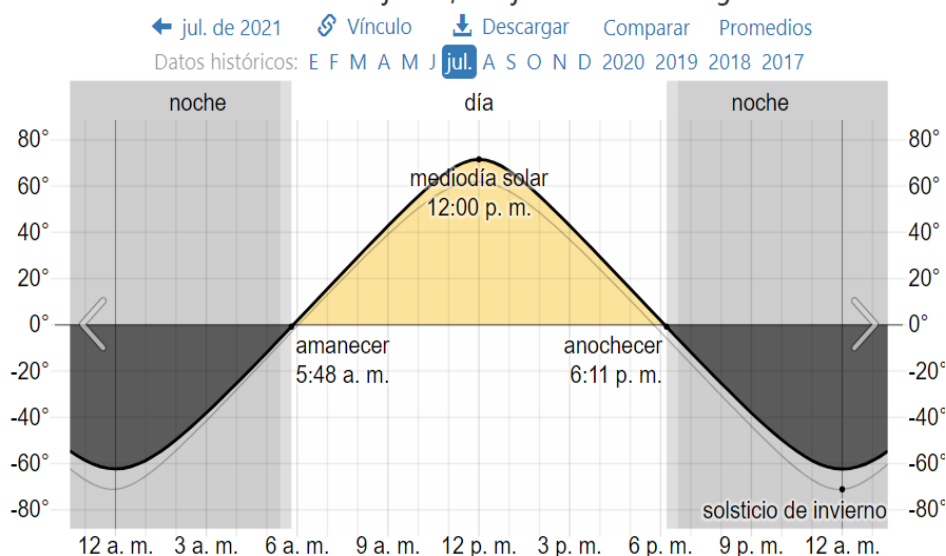
intervalos de tiempo programados para el día y noche. En la Figura 11 y 12 se observa la temperatura ambiente que se presentó durante el día de toma de temperaturas en la superficie superior e inferior de la losa, en la ciudad de Bogotá.

Figura 11. Registro de la temperatura. Bogotá en grados Celsius
Temperatura el jueves, 1 de julio de 2021 en Bogotá



Fuente: <https://es.weatherspark.com/h/d/23324/2021/7/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-el-jueves-1-de-julio-de-2021-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Figures-Temperature>.

Figura 12. Elevación solar
Elevación solar el jueves, 1 de julio de 2021 en Bogotá



Fuente: <https://es.weatherspark.com/h/d/23324/2021/7/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-el-jueves-1-de-julio-de-2021-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Figures-Temperature>

Recolección de datos de campo. El procedimiento realizado para toma de temperaturas en la superficie superior e inferior de la losa. Fue el siguiente:

Una vez seleccionado el día luminoso y escogida la losa de la vía local de la ciudad de Bogotá, se procede a identificar el espesor de losa de acuerdo con lo indicado en la Figura 13, la cual muestra la medición del espesor de la losa, utilizando un flexómetro.

Figura 13. Losa 20 cm, espesor.



Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el espesor de la losa, se procedió a tomar las respectivas temperaturas en su cara superior e inferior, obteniendo con ello la información sobre la emisividad del concreto en la misma superficie, a fin de calcular el promedio aritmético de la temperatura tomada a las 7:30 am y las tomadas en los intervalos de tiempo de dos horas, hasta llegar a la última toma de temperatura de la 1:30 am.

En la Figura 14, se especifican cómo se llevó a cabo la distribución en la toma de temperatura a partir de las 7:30 a.m. y de acuerdo con la cara superior e inferior de la losa.

Figura 14. Toma temperatura cara superior e inferior losa de 20 cm, 7:30 am

Superior



Inferior



Fuente: Elaboración propia

Registrada la toma de temperatura se procedió a transcribir los datos del trabajo de campo en la tabla 2, en la cual se realizó el cálculo de conversión de los valores de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) a Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), de acuerdo con los parámetros del software ISLAB2000, el cual se fundamenta desde la ingeniería inglés. Unificada esta información de entrada, se evaluó los esfuerzos y deformaciones máximas de la losa ocasionada por el fenómeno del alabeo diurno y nocturno.

Tabla 2. Cálculo del gradiente de temperatura a las 7:30 am, losa de 20 cm de espesor

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 7:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 12 ° C | |
| Registro de temperaturas en la cara superior e inferior de la Losa de concreto en ° C | | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 23.5 | 21.9 |
| 2 | 23.2 | 22.6 |
| 3 | 24.0 | 22.9 |
| Temp-promedio ° C | 23.57 | 22.47 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C × 9/5) + 32 = 32 ° F | 74.43 | 72.45 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 1.98 | |

Fuente: Elaboración propia

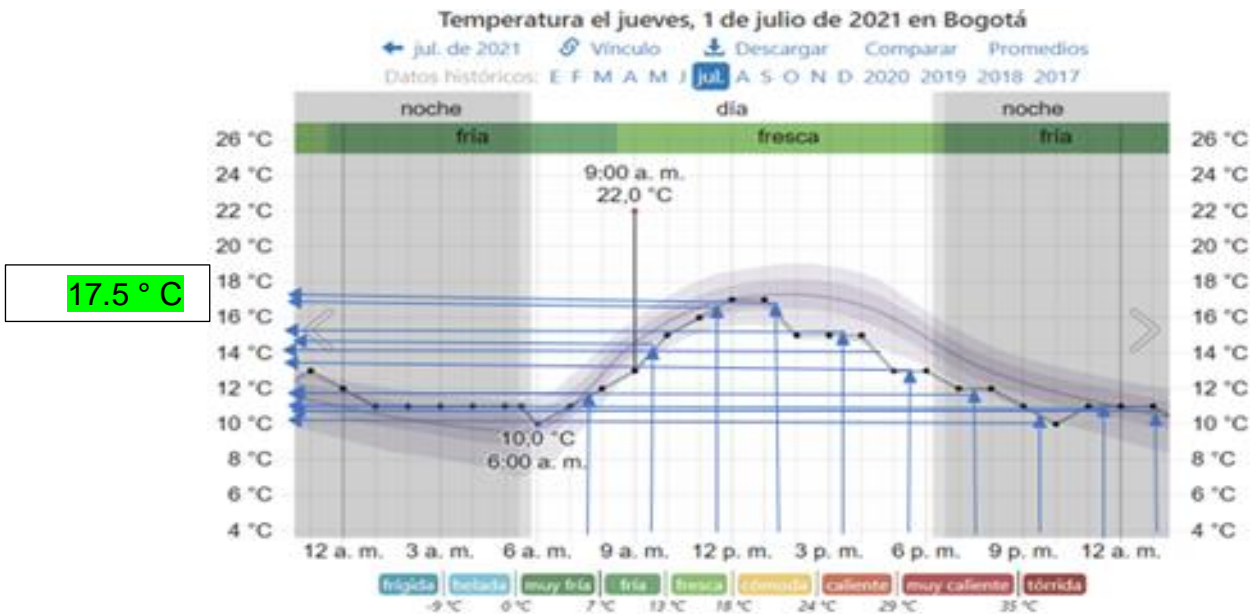
Teniendo en cuenta los lineamientos de la investigación, este procedimiento se llevó a cabo con intervalos de dos horas hasta finalizar el proceso a la 1:30 a.m., Llevando a cabo el mismo análisis observado en la tabla 2 (ver anexo 2).

De esta manera, se logró obtener el gradiente positivo máximo de la losa, puesto que, a la 1:30 pm, se presentó el pico máximo de temperatura ambiente en la ciudad de Bogotá,

como se indica en la Figura 15 a) que muestra la temperatura ambiente de 17.5 ° C. y b) muestra la temperatura de la superficie y fondo de la losa a esa misma hora del día. Como respuesta a esta condición climática registrada en la localidad de San Cristóbal barrio la victoria, se procedió a realizar las respectivas anotaciones de las temperaturas en la superficie de la losa de 20 cm.

Figura 15. a) Registro temperatura. Bogotá y b) temperatura cara superior e inferior losa, 1:30 pm.

a)



Fuente: <https://es.weatherspark.com/h/d/23324/2021/7/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-el-juevesdejulio-de-2021-en-Bogot%C3%A1-1-Colombia#Figures-Temperature>.

b.



Fuente: Elaboración propia

Desde los aspectos mencionados, se procedió a realizar el respectivo registro de la información en la tabla 3, esto con el fin de calcular el gradiente térmico máximo positivo encontrado entre las 7:30 a.m. y la 5:30 p.m.

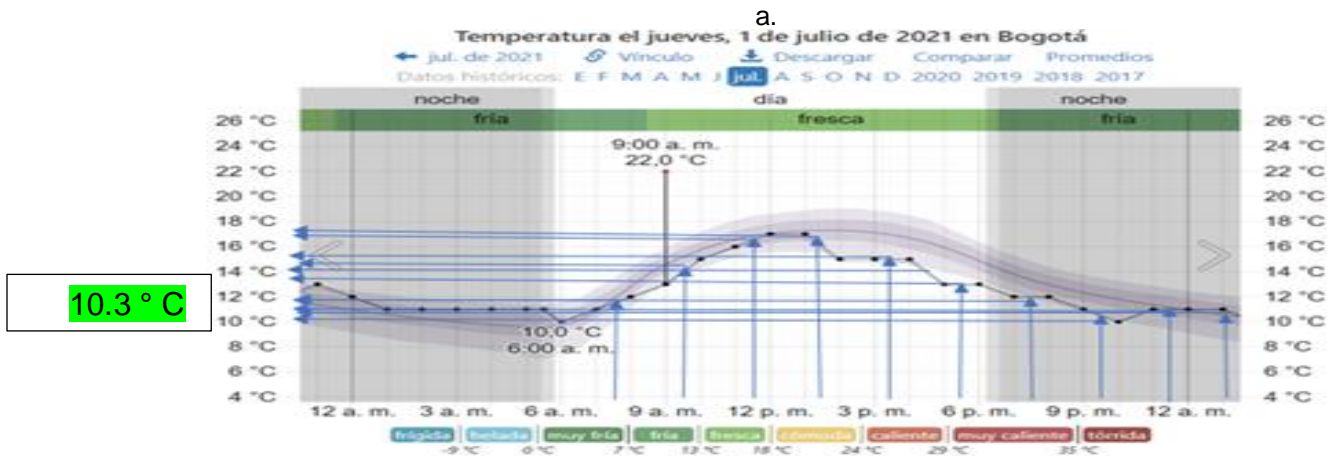
Tabla 3. Cálculo gradiente temperatura 1:30 pm, losa 20 cm, espesor

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 1:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 17.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 44.0 | 28.7 |
| 2 | 45.3 | 29.2 |
| 3 | 43.8 | 28.6 |
| Temp-promedio ° C | 44.37 | 28.83 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C × 9/5) + 32 = 32 ° F | 111.87 | 83.89 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 27.98 | |

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, se procedió a la identificación del gradiente máximo negativo el cual se obtuvo a partir de la información suministrada a las 9:30 p.m. tal como se indica en la Figura 16, a) Registro de temperatura ambiente del 1 de julio de 2021 en Bogotá y b) Toma de temperatura en la cara superior e inferior de la losa a las 9:30 pm.

Figura 16. a) Registro temperatura. Bogotá y b) temperatura cara superior e inferior losa, 9:30 pm.



Fuente: <https://es.weatherspark.com/h/d/23324/2021/7/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-el-jueves-1-de-julio-de>

2021-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Figures-Temperature.

b.



Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se realiza el respectivo registro de la información tomada en campo en la Tabla 4, a fin de calcular el gradiente máximo negativo encontrado entre las 7:30 pm y la 1:30 am.

Tabla 4. Cálculo gradiente temperatura 9:30 pm, losa 20 cm de espesor

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 9:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 10.3 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 18.3 | 20.4 |
| 2 | 18.2 | 20.1 |
| 3 | 18.2 | 20.2 |
| Temp-promedio ° C | 18.23 | 20.23 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C × 9/5) + 32 = 32 ° F | 64.81 | 68.41 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | -3.60 | |

Fuente: Elaboración propia

7.2. FASE 2. CÁLCULO DE TEMPERATURA DE FONDO DE LA LOSA DE 10 Y 30 CM Y CÁLCULO DE GRADIENTE TÉRMICO.

Concluida la toma de temperatura de la cara superior e inferior de la losa de 20 cm de espesor, se necesita crear un método de cálculo que permitiera encontrar la temperatura del fondo de una losa para distintos espesores, independientemente de que se encuentre construida o que sea de difícil acceso a la cara inferior o requiera de conocer la temperatura del fondo de la losa para espesores determinados; así como, se posibilite calcular el gradiente térmico máximo negativo y la posterior evaluación de esfuerzos y deformaciones con la temperatura o a partir de la evaluación de la losa con una carga estática.

Por ende, la temperatura superior de la losa se puede asumir como una constante partiendo del hecho de que se está trabajando con concreto hidráulico de similares características técnicas como lo mencionado en el numeral 8.1.1, referido al concreto hidráulico. Asimismo, en caso de buscar evaluar pavimentos aledaños y/o conocer el comportamiento de un nuevo pavimento a construir, se propone fundamentar el estudio bajo el método de cálculo de correlación diferencial de temperatura LDUST21, realizado como aporte de la presente investigación, pues según los experimentos realizados para el cálculo de las variaciones térmicas de los espesores propuestos de 10:30 centímetros, bajo las mismas condiciones de la zona, se permitió el cálculo de temperatura del fondo de la losa, permitiendo calcular el gradiente positivo y negativo de acuerdo con las especificaciones encontradas.

En este orden, se puede describir el procedimiento de cálculo para encontrar el valor de la temperatura de la cara inferior de una losa de espesor (e_2) mediante un recurso lógico matemático que permitió calcular la variable de temperatura desconocida y al mismo tiempo, posibilita evidenciar la matriz de cálculo, cada vez que se cuente con la información primaria como los datos de entrada de la temperatura de espesor (e_1). Consecuentemente, conocer el dato del espesor de la losa, permitirá calcular el valor de la temperatura de la cara inferior de la misma si el espesor se ubica entre los 10:30 centímetros, valores que se toman como referentes para el análisis del presente trabajo investigativo. Desde esta perspectiva, el conocimiento de los datos como el valor in situ y la temperatura de las caras superior e inferior de la losa de 20 cm, permite encontrar la variable de temperatura de la cara inferior de la losa de espesor (32). De esta manera, se hace necesario identificar en fases, la información que valide el método de correlación de diferencial de temperatura LDUST21 de la siguiente manera:

Fase 1, información in situ, conocer $T_{cS}(e_1)$, temperatura de la cara superior de losa, donde (e_1), es el espesor de losa de la muestra patrón de campo, de igual manera se debe contar con la información $T_{cI}(e_1)$, que representa a la temperatura de la cara inferior de losa patrón, de modo que, conociendo estos datos se procede a calcular la variación de temperatura con la siguiente expresión algebraica: $\Delta T^0_c(e_1) = T_{cS}(e_1) - T_{cI}(e_1)$, siendo, $\Delta T^0_c(e_1)$, la variación de temperatura en función de (e_1), siendo la

expresión $T_c S(e1) - T_{c,i}(e1)$, representación diferencial de temperatura en función de $(e1)$, consecuentemente se procede a realizar el cálculo del porcentaje descendente de temperatura para $(e1)$, con la siguiente expresión algebraica ${}^0/0 \Delta T^0 C (e1) = \frac{(\Delta T^0 c(e1) \times 100\%)}{T_c S(e1)}$, conocido dicho porcentaje, se procede a dar paso al:

Fase 2, cálculo de porcentaje descendente y variación de temperatura para cierto espesor de losa $(e2)$, para calcular este porcentaje de temperatura para $(e2)$, siendo este el espesor de losa del que se desconoce la temperatura de la cara inferior, por tanto, el porcentaje descendente de temperatura para $(e2)$, se representa con la expresión algebraica ${}^0/0 \Delta T^0 C (e2) = \frac{(\% \Delta T^0 c (e1) \times (e2))}{(e1)}$, la cual está dada en función del ${}^0/0 \Delta T^0 C (e1)$, y de $(e1)$, respecto a $(e2)$, de esta manera se conocerá el valor de la variación de temperatura para $(e2)$, y como resultado se tiene la siguiente expresión algebraica así: $\Delta T^0 C (e2) = (\% \Delta T^0 C (e2) \times T_c S(e1))$, por lo tanto el ${}^0/0 \Delta T^0 C (e1)$, que es factor de $T_c S(e1)$, se tiene que la ecuación general para el cálculo de la variación de temperatura de un espesor $(e2)$, es, $\Delta T^0 c (e2) = T_c S(e2) - T_{c,i}(e2)$. Por consiguiente, se procede a despejar la variable $T_{c,i}(e2)$, siendo la temperatura de la cara inferior de la losa para un espesor $(e2)$, de ahí que, $T_{c,i}(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^0 C (e2)$, es la ecuación para conocer el valor de la temperatura de la cara inferior de una losa con espesor $(e2)$, siguiendo el procedimiento del **Fase 1 y 2** es posible hallar la temperatura de la cara inferior de cierto espesor de losa $(e2)$. En la tabla cinco se realiza el respectivo resumen de la información que se ha suministrado hasta momento en torno a las ecuaciones y variables que sirven para el cálculo de temperatura de la cara inferior de la losa para $(e2)$.

Tabla 5. Matriz de cálculo variación de temperatura para un (e2)

| Cálculo de variación de temperatura para un (e2) | |
|---|---|
| Cálculo de variación de temperatura para (e1) | |
| $\Delta T^0 c (e1) = T_{cS}(e1) - T_{cI}(e1)$ | |
| $\Delta T^0 c (e1)$ | Variación de temperatura |
| (e1) | Espesor de la losa de la que se toma la temperatura de la cara superior e inferior de esta. |
| $T_{cS}(e1)$ | Temperatura cara superior de la losa |
| $T_{cI}(e1)$ | Temperatura cara inferior de la losa |
| Cálculo del porcentaje descendente de temperatura para (e1) | |
| $0/0 \Delta T^0 C (e1) = \frac{(\Delta T^0 c (e1) \times 100\%)}{T_{cS}(e1)}$ | |
| Cálculo del porcentaje descendente de temperatura para (e2) | |
| (e2) | Espesor de losa de la que se requiere conocer la temperatura de la cara inferior de esta. |
| $0/0 \Delta T^0 C (e2) = \frac{(\% \Delta T^0 c (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | |
| Cálculo de variación de temperatura para (e2) | |
| $\Delta T^0 C (e2) = (\% \Delta T^0 C (e2) \times T_{cS}(e1))$ | |
| Cálculo de la temperatura de la cara inferior de la losa para (e2) | |
| $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^0 C (e2)$ | |

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, se procede con el cálculo de la temperatura de la cara inferior de una losa de espesor (e2) = 10 cm, y luego con un (e2) = 30 cm, como se presenta en la tabla 6, la cual muestra el cálculo de la cara inferior de la losa para cuando (e2) = 10 cm.

Tabla 6. Cálculo temperatura cara inferior losa (e2) = 10 cm, 7:30 am

| hr 7:30 a. m. | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|---|--|---|
| e1 en Cm | | 20 | | | | |
| e2 en Cm | | 10 | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^0 c (e1) = T_{cS}(e1) - T_{cI}(e1)$ | $0/0 \Delta T^0 C (e1) = \frac{(\Delta T^0 c \times 100\%)}{T_{cS}(e1)}$ | $0/0 \Delta T^0 C (e2) = \frac{(\% \Delta T^0 c (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^0 C (e2) = (\% \Delta T^0 C (e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^0 C (e2)$ |
| 23.5 | 21.9 | 1.60 | 7.0% | 3.5% | 0.82 | 22.7 |
| 23.2 | 22.6 | 0.60 | 3.0% | 1.5% | 0.35 | 22.9 |
| 24.0 | 22.9 | 1.10 | 5.0% | 2.5% | 0.60 | 23.4 |

Fuente: Elaboración propia

Habiendo calculado la temperatura de la cara inferior de la losa de acuerdo a lo indicado en la tabla 5, para una losa de (e2) = 10 cm, siendo estos datos utilizados como inputs de entrada para calcular la variación y/o diferencial de temperatura del espesor de losa en mención, tal como se indica en la tabla 7, la cual muestra el cálculo algebraico del gradiente de temperatura positivo de las 7:30 am, cuando (e2) = 10 cm.

Tabla 7. Cálculo gradiente temperatura losa (e2) = 10 cm, 7:30 am

| ΔT | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|---|------|
| Hora | | 7:30 a. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 12 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa | |
| 1 | 23.5 | 22.7 | |
| 2 | 23.2 | 22.9 | |
| 3 | 24.0 | 23.4 | |
| Temp-promedio ° C | 23.57 | 23.00 | |
| Temp-promedio ° F (0 °C × 9/5) + 32 = 32 °F | 74.43 | 73.40 | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | | | 1.03 |

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, se procedió a calcular la temperatura del fondo de la losa para los siguientes intervalos de tiempo programados (ver anexo 3), siendo más visible para la presente investigación los valores que resulten del cálculo del gradiente máximo positivo y negativo, que se presentan en la tabla 8, la cual muestra el cálculo de la temperatura de la cara inferior de la losa de 10 cm de espesor, basados en el método de correlación propuesto LDUST21.

Tabla 8. Cálculo temperatura cara inferior losa (e2) = 10 cm, 1:30 pm

| hr | 1:30 p.m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|---|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{CS}(e1)$ | $T_{CI}(e1)$ | $\Delta T^0 C (e1) = T_{CS}(e1) - T_{CI}(e1)$ | $\frac{0}{100} \Delta T^0 C (e1) = \frac{(\Delta T^0 C \times 100\%)}{T_{CS}(e1)}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^0 C (e2) = \frac{(\% \Delta T^0 C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^0 C (e2) = (\% \Delta T^0 C (e2) \times T_{CS}(e1))$ | $T_{CI}(e2) = T_{CS}(e1) - \Delta T^0 C (e2)$ |
| 44.0 | 28.7 | 15.30 | 35.0% | 17.5% | 7.70 | 36.3 |
| 45.3 | 29.2 | 16.10 | 36.0% | 18.0% | 8.15 | 37.2 |
| 43.8 | 28.6 | 15.20 | 35.0% | 17.5% | 7.67 | 36.1 |

FUENTE: Elaboración propia

En este sentido, con base a la información de la Tabla 8 se procede a realizar el cálculo del gradiente térmico máximo positivo de la losa de 10 cm de espesor, como se indica en la Tabla 9, en la que se muestra el gradiente de temperatura máximo que sucede a la 1:30 pm, en función de la temperatura ambiente que se presentó a esa hora del día, como se observa en la Figura 15 a). De esta manera, se realizó el mismo procedimiento para encontrar el gradiente máximo negativo, el cual sucede a las 9:30 pm de acuerdo al

registro de temperatura en la superficie de la losa, como se observó en la Figura 16 b). en ese sentido se indica en la tabla 10, mostrando la temperatura del fondo de la losa de 10 cm de espesor a las 9:30 pm y seguidamente se indica la tabla 11, la cual muestra el cálculo del gradiente de temperatura máximo negativo a las 9:30 pm.

Tabla 9. Cálculo gradiente temperatura losa (e2) = 10 cm, 1:30 pm

| ΔT | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|---|--|
| Hora | | 1:30 p. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 17.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa | |
| 1 | 44.0 | 36.3 | |
| 2 | 45.3 | 37.2 | |
| 3 | 43.8 | 36.1 | |
| Temp-promedio ° C | 44.37 | 36.53 | |
| Temp-promedio ° F (0 °C × 9/5) + 32 = 32 °F | 111.87 | 97.75 | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 14.12 | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Cálculo temperatura cara inferior losa (e2) = 10 cm, 9:30 pm

| hr | 9:30 p. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{CS}(e1)$ | $T_{CI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{CS}(e1) - T_{CI}(e1)$ | $\% \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \times 100\%)}{T_{CS}(e1)}$ | $\% \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{CS}(e1))$ | $T_{CI}(e2) = T_{CS}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 18.3 | 20.4 | -2.10 | -11.0% | -5.5% | -1.01 | 19.3 |
| 18.2 | 20.1 | -1.90 | -10.0% | -5.0% | -0.91 | 19.1 |
| 18.2 | 20.2 | -2.00 | -11.0% | -5.5% | -1.00 | 19.2 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Cálculo gradiente temperatura losa (e2) = 10 cm, 9:30 pm

| ΔT | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|----------------------|--|---|--|
| Hora | | 9:30 p. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 10.3 ° C | |

| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
|--|---|--------------------------|
| 1 | 18.3 | 19.3 |
| 2 | 18.2 | 19.1 |
| 3 | 18.2 | 19.2 |
| Temp-promedio ° C | 18.23 | 19.20 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 64.81 | 66.56 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -1.75 | |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, la importancia del empleo del método LDUST21, desarrollado con el fin de identificar la temperatura de la cara inferior de cierto espesor de una losa, teniendo como base los datos de temperatura de la losa in situ, gracias a este procedimiento, se permitirá el cálculo a partir de la correlación de temperatura y porcentajes diferenciales reales, teniendo como referencia el cálculo de los valores de la temperatura de la cara inferior de la losa de 10 cm de espesor, según se describió en el numeral 8.1, del mismo modo, estos elementos contribuyen a realizar un proceso en el que se calcula el gradiente térmico máximo positivo y el negativo, comparándolo con la ecuación establecida por la AASHTO, la cual es empleada actualmente en el país para el cálculo del gradiente de temperatura máximo durante el día y la noche. De este modo, a continuación, en la tabla 12, se da una muestra comparativa de los métodos de cálculo del diferencial de temperatura máximo positivo y negativo.

Tabla 12. Comparación métodos de cálculo diferencial de temperatura aashto vs ldust21

| DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | Cálculo Método AASHTO | Cálculo Método LDUST21 |
|---|--|---|
| ΔT °F gradiente térmico Máximo positivo 1: 30 pm | | Temperatura in situ cara superior (e1) 111.87(°F) Tabla 9 Cálculo temperatura cara inferior (e2) 97.75(°F) Tabla 9 |
| ΔT = Diferencia de temperatura δt = Gradiente de temperatura durante el día H = Espesor de losa $\Delta T = \delta t \times H$ | (2.5 A 3.5 (°F/Pulg)) (3.94 Pulg) 13.79 | ΔT °F gradiente térmico de temperatura Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) ΔT °F gradiente térmico de temper: 14.12 Tabla 9 |
| ΔT °F gradiente térmico Máximo negativo 9:30 pm | | Temperatura in situ cara superior (e1) 64.81(°F) Tabla 11 Cálculo temperatura cara inferior (e2) 66.56(°F) Tabla 11 |
| $\Delta T = \delta t \times H$ | Para la noche el método indica que es la mitad de estos valores (2.5 A 3.5 (°F/Pulg)), se asume la mitad de 2.5 -4.93 | ΔT °F gradiente térmico de temperatura Temp-promedio ° F (S)-Temp-promedio ° F (I) ΔT °F gradiente térmico de temper: -1.75 Tabla 11 |

Fuente: Elaboración propia con base a la información del método (AASHTO, 2003) y LDUST21.

7.3. FASE 3. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE MÓDULOS DE REACCIÓN K DEL SUELO DE SOPORTE.

Para la determinación de las tensiones máximas y la deflexión máxima en una losa, es necesario que la evaluación se lleve a cabo considerando la interacción que tiene la losa

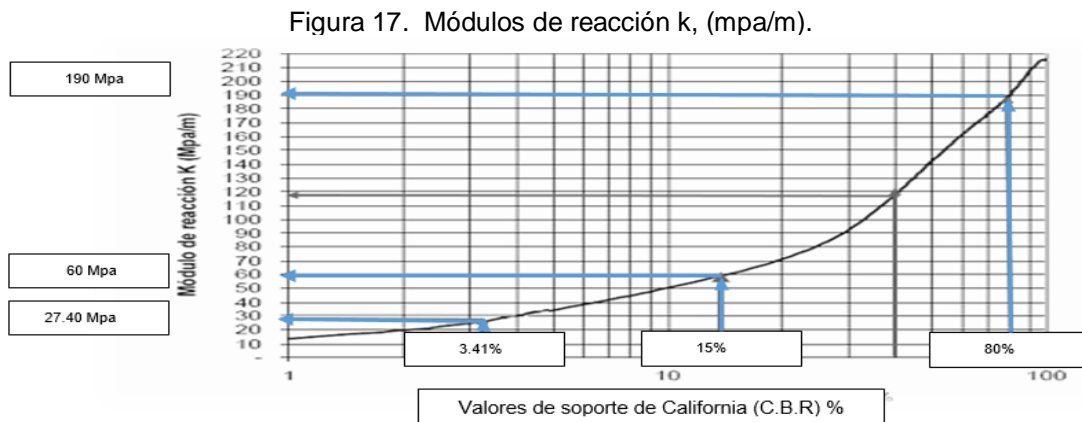
con el suelo de soporte, en función de la temperatura y el tipo de carga a considerar para su posterior evaluación de esfuerzos y deformación debido al cambio tensional entre capas.

De esta manera, se ha asumido los posibles valores de módulo de reacción K, a fin de evaluar la combinación de espesores de losa y rigidez del suelo de soporte en función del gradiente térmico máximo positivo y negativo, en aras de encontrar la mejor respuesta al control del alabeo en el pavimento rígido de la vía local de la ciudad de Bogotá.

Por eso, se ha seleccionado tres tipos de suelos de soporte los cuales cumplen las condiciones de especificadas por el Invias (2018). De acuerdo con los tres aspectos de módulos de reacción K así:

- La primera que sea con un suelo de capacidad portante mínimo exigido con el fin de no considerar un material de reemplazo para su mejoramiento, es decir, con un CBR igual o mayor al 3% de acuerdo a las especificaciones de carreteras INVIAS (2015) en su artículo 231-15.
- La segunda condición sería que la subrasante in situ sea un afirmado con un CBR que cuya capacidad portante cumpla con el valor igual o mayor al 15% conforme a lo exigido en la especificación de materiales IDU en su capítulo 4 ET-1C-01 y lo descrito en el artículo 311 numeral 311.5.2.2 y norma de ensayo de material E-148 INVIAS (2015).
- La tercera consideración con un material tipo Base con un CBR del 80% de acuerdo al artículo 330 norma de ensayo de materiales E142-13 (AASTHO T180) y las especificaciones de carreteras INVIAS (2015).

En la Figura 17, se muestra la gráfica que relaciona los porcentajes de C.B.R adoptados en una escala de 1 a 100, ubicados en el eje de las abscisas Vs los valores de módulos de reacción K en Mpa/m ubicados en el eje de las ordenadas.



Fuente: PCAWinkler, http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/02_pavement_types/.htm

De acuerdo con las lecturas de módulos de reacción K obtenidas a partir de los C.B.R propuestos, como se observa en la Figura 17, que posteriormente se registraron en la tabla 13, que muestra los valores equivalentes en unidades de ingeniería inglesa, con el fin de que se puedan operar en el software ISLAB2000.

Tabla 13. Valores módulo reacción k en unidades de ingeniería inglesa

| C.B.R (%) | Módulo de reacción K (Mpa) | Factor de conversión a unidades de ingeniería inglesa | Módulo de reacción K (Lb/pulg ³) |
|-----------|----------------------------|---|--|
| 3.41 | 27.40 | 3.66 | 100 |
| 15 | 60 | 3.66 | 220 |
| 80 | 190 | 3.66 | 700 |

Fuente: Elaboración propia, con información de American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO, 2003) y Thomas Van Dam, PhD., P.E Universidad tecnológica de Michigan. Paquete de talleres de transferencia de tecnología PCC ISLAB2000 (Tran & Roesler, 2022)

Los módulos de reacción K del suelo de soporte propuesto, tiene la finalidad de hacer parte de la evaluación combinada de esfuerzos junto a la losa, con el objetivo de simular el reemplazo de la porción de masa del suelo in situ por la equivalencia de resortes elásticos, que actúan en función de una constante K, por unidad de área, en vista de la necesidad de realizar una serie de interacciones unitarias con base al concepto de Winkler, se da utilidad al uso del software ISLAB2000, a fin de facilitar la evaluación de esfuerzos y deformación que se ejercen directamente en la proporcionalidad de unidad de masa de suelo de soporte de la losa (Tran & Roesler, 2022).

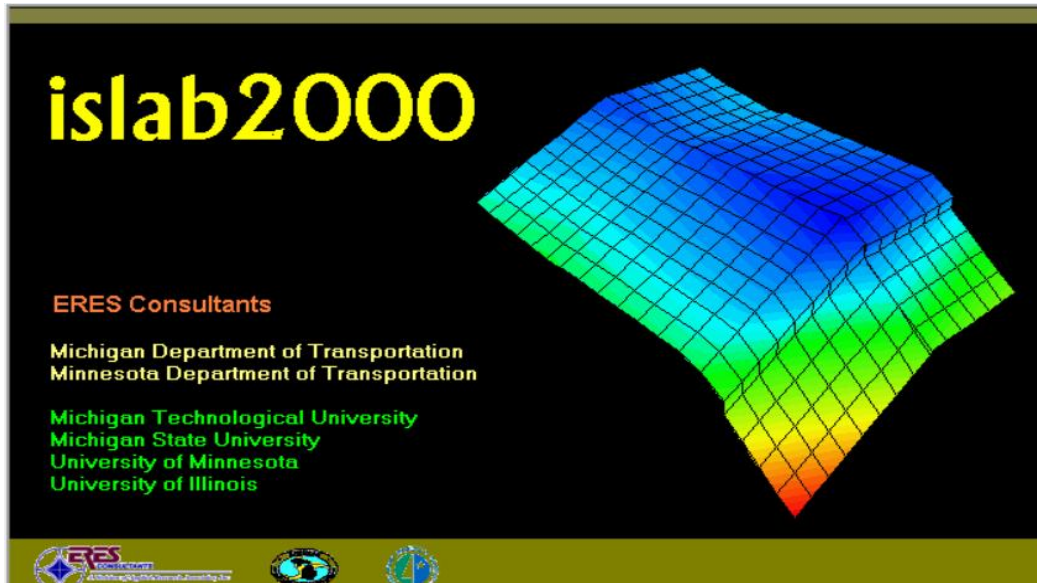
7.4. FASE 4. EVALUACIÓN DE MÁXIMAS TENSIONES Y DEFORMACIÓN DE LA LOSA, POR GRADIENTE TÉRMICO, PARA ESPESORES DE LOSA DE 10, 20 Y 30 CM Y (K) DE SUELO DE SOPORTE DE 100,220 Y 700 LB/PULG³

Con base a la información de la tabla 1, donde se indican los inputs de entrada al software ISLAB2000, esto permitió la evaluación computacional de los esfuerzos y la deformación que sufre la losa al ser sometida por gradientes máximos positivo y negativo de acuerdo con los espesores propuestos para la evaluación y su posterior análisis de resultados. En este sentido, las respuestas obtenidas por gradientes positivos y negativos calculados en una jornada de toma de temperatura en los que se evalúa la losa de 20 cm de espesor, en base a los cálculos del método de correlación LDUST21 para las losas de espesor desde 10 y 30 cm (ver anexo 4).

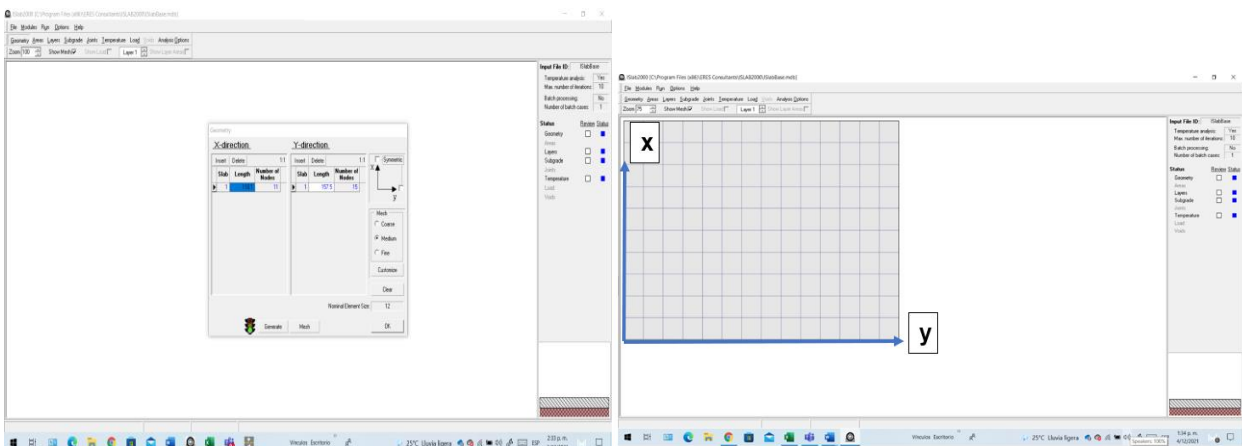
En la Figura 18, se visualizan algunas características del software ISLAB2000, las cuales se indican en el anexo 5, evidenciando la cooperación y colaboración de la Universidad de Illinois para el presente trabajo de investigación. Un

Figura 18. Presentación software islab2000 a) imagen corporativa islab2000. b) paneles de entrada de geometría, y decisión mallada de losa. c) paneles de información de capas y evaluación de esfuerzos y deformaciones

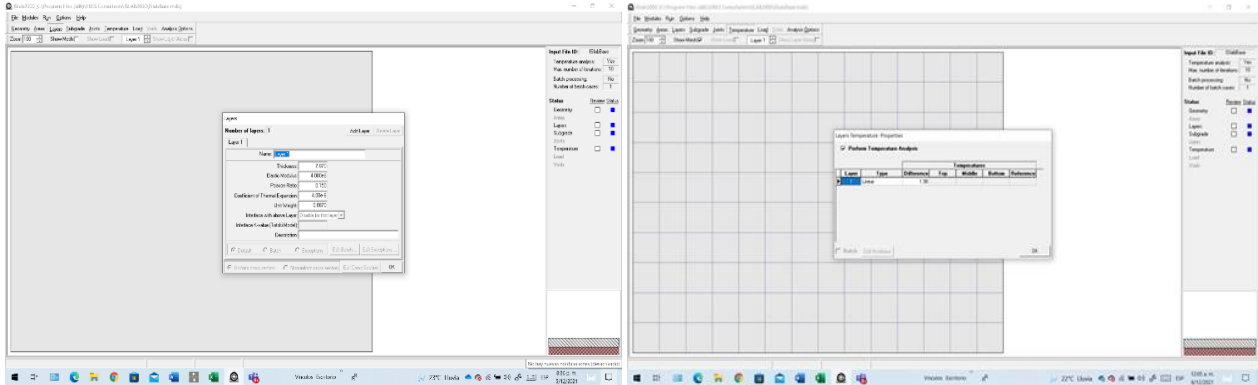
a) Imagen corporativa islab2000



b) Paneles de entrada de geometría, y decisión de mallado de losa



c) Paneles de información de capas y evaluación de esfuerzos y deformaciones



Fuente: Elaboración propia con base a la información de software ISLAB2000, (Galasova, 2000)-Cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

En este orden de ideas y teniendo como referencia la información suministrada por Galasova (2000), es posible comprender que el software ISLAB2000, al operar bajo unidades de la ingeniería inglesa, conlleva a realizar evaluaciones espaciales de la losa, de acuerdo con el sistema de coordenadas rectangulares y distribución de malla para valoraciones unitarias de esfuerzos y deformaciones multicapa de elementos finitos.

Por ende, al ingresar los impulsos de entrada, se obtuvieron los resultados esperados de la evaluación de los esfuerzos y deformación por temperatura de la losa de 20 cm de espesor y su relación con el suelo de soporte que presentó un módulo de reacción K de de 100 Lb/pulg³, de acuerdo con las horas indicadas en la tabla 14, en las que se muestran los valores de las tensiones transversales máximas, las tensiones longitudinales máximas y la reflexión máxima tanto en la superficie como en el fondo de la losa, consecuentes con el diferencial de temperatura calculado para las horas en las que se tomó la temperatura de las caras superior e inferior de la luz en este estudio.

Tabla 14. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 20 cm con módulo de reacción k = 100 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzo deformación losa e= 20 cm con Módulo de reacción K = 100 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|-------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MÁXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MÁXIMA | | DEFLEXION MÁXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MÁXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | | |
| | | | Psí | Psí | Psí | Psí | | |
| ESPESOR DE LOSA 20 CM | AM | °F | | | | | | |
| | 7:30 | 1.98 | 0.22 | 4.81 | 0.18 | 9.34 | 0.009155 | |
| | 9:30 | 5.84 | 0.65 | 14.18 | 0.54 | 27.54 | 0.01365 | |
| | 11:30 | 7.38 | 0.83 | 17.92 | 0.68 | 34.8 | 0.01545 | |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 27.98 | 2.9 | 43 | 2.5 | 107.2 | 0.0393 | |
| | 3:30 | 23.58 | 2.5 | 41.7 | 2.1 | 95.7 | 0.0343 | |
| | 5:30 | 4.73 | 0.53 | 11.49 | 0.44 | 22.31 | 0.0118 | |
| | 7:30 | -0.26 | 0.631 | 0.029 | 1.226 | 0.024 | | 0.006986 |
| | 9:30 | -3.6 | 8.74 | 0.4 | 16.98 | 0.33 | | 0.00877 |
| | 11:30 | -2.11 | 5.12 | 0.24 | 9.95 | 0.2 | | 0.007975 |
| | AM | | | | | | | |
| | 1:30 | -1.98 | 4.81 | 0.22 | 9.34 | 0.18 | | 0.007906 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

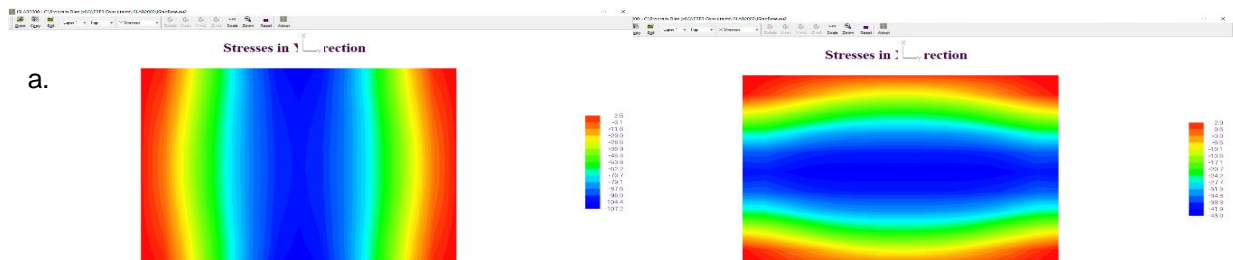
La información resaltada de color gris en la tabla 14, corresponde a los valores de diferencial de temperatura máximo, tensión transversal máxima, tensión longitudinal máxima y deflexión máxima en la cara inferior y superior de la losa, para un gradiente máximo positivo y negativo, calculados con base a la variable de temperatura tomada en la superficie de la losa a la 1:30 y 9:30 pm.

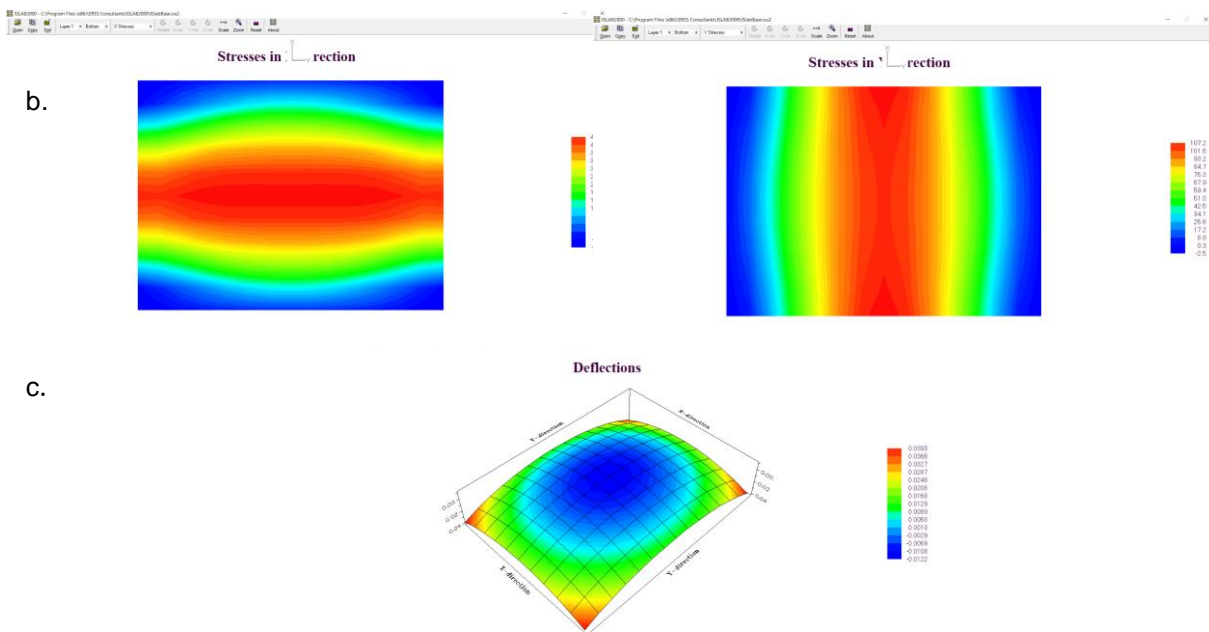
A continuación, se muestra la Figura 19 en la que se presentan las gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima cara inferior de losa. Espesor de losa de 20 cm, a la 1:30 pm.

En ese sentido, según la información suministrada en la tabla 14, se dan a conocer los valores calculados del diferencial de temperatura en unidades de ingeniería inglesa, de acuerdo con el registro de cada hora del día, asimismo, se ofrecen los valores de las tensiones transversales, y longitudinales máximas, así como las deflexiones máximas de la cara inferior y superior de la losa.

Por otra parte, en la Figura 19, se dan a conocer las gráficas relacionadas con: a) se observa los cambios tensionales de la losa, en sus bordes sentido transversal y longitudinal, lo cual indica que se está generando tracción en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) en la que se observa que los cambios tensionales de la losa se presentan en el centro, por tanto, las fibras inferiores están trabajando a compresión, permitiendo concluir con la gráfica, lo que se observa en la parte c) donde se cumple la condición del momento flector positivo, es decir, se observa los efectos del alabeo diurno en la losa sin restricciones, en respuesta se forma una deformación o levantamiento de la losa que va de abajo hacia arriba tanto transversal como longitudinal, debido a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez, de manera que el módulo de reacción K de 100Lb/pulg^3 , actúa en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico positivo encontrado en el presente trabajo de investigación, para la losa de 20 cm de espesor. En consecuencia, con lo anterior se observa que el círculo en color azul representa el área de losa que pierde contacto con el suelo de soporte.

Figura 19. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm.



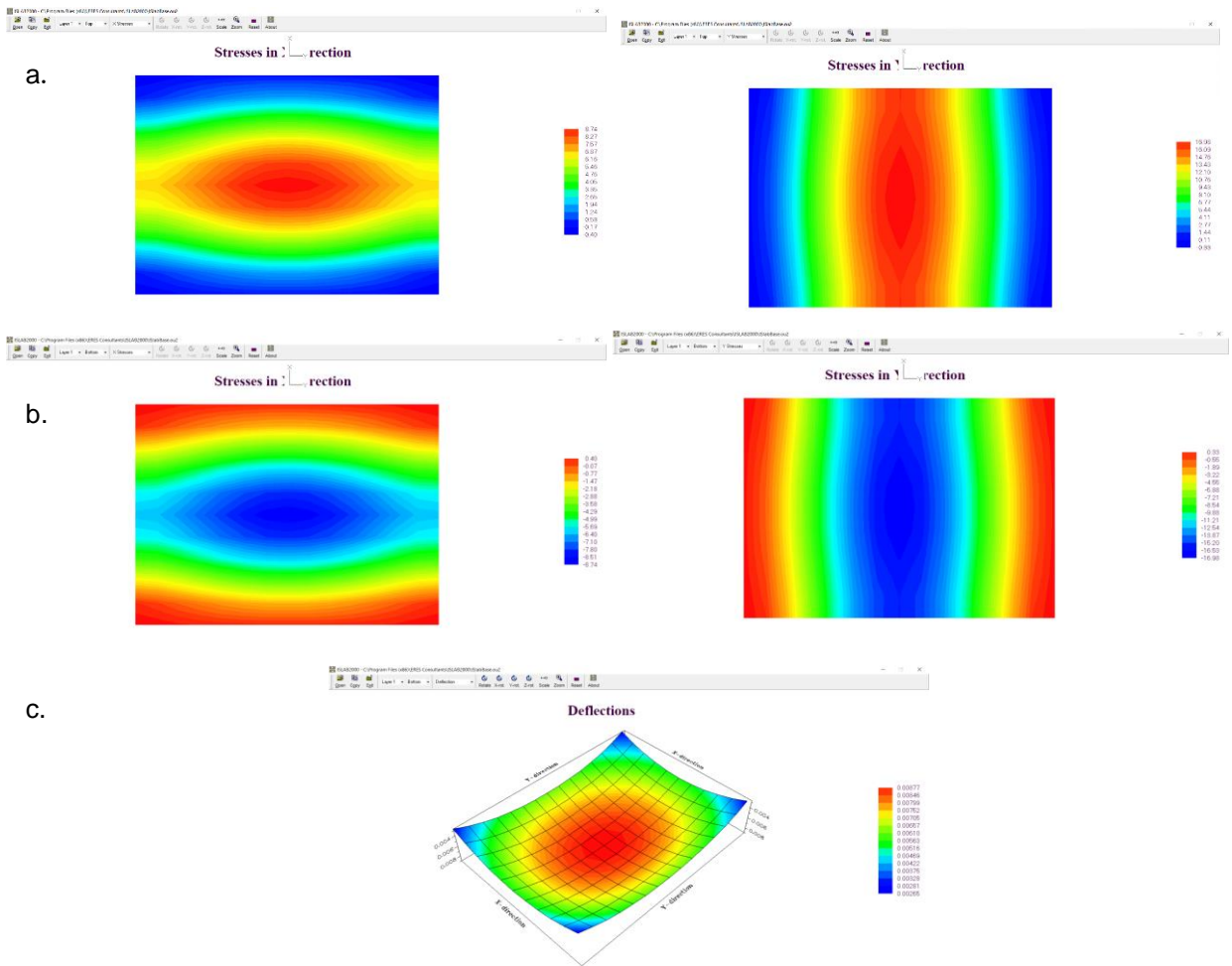


Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020

De igual manera se muestra la Figura 20 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima de la cara superior de losa. Espesor de 20 cm, a las 9:30 pm.

En la Figura 20. Gráficas a) se observa los cambios tensionales de la losa, en su centro sentido transversal y longitudinal, indicando que se está generando compresión en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) en la que se observa que los cambios tensionales de la losa se presentan en las zonas laterales, por tanto, las fibras inferiores están trabajando a tracción, lo cual permite concluir en la gráfica c) que se cumple la condición del momento flector negativo, es decir, se observa los efectos del alabeo nocturno en la losa sin restricciones, se forma una deformación o levantamiento de la losa en sus bordes y vértices sentido transversal y longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez debido al módulo de reacción K de 100Lb/pulg^3 , el cual actúa en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico negativo, encontrado en la presente investigación, para la losa de 20 cm de espesor. De esta manera podemos observar que, en consecuencia, de lo anterior, el círculo en color rojo representa el área de losa que tiene mayor contacto con el suelo de soporte, mientras las áreas de color verde y azul pierden contacto con este, de tal manera que se forman voladizos en sus vértices.

Figura 20. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Se continua con el procedimiento a fin de obtener los resultados esperados de la evaluación de esfuerzos y deformación por temperatura de la losa de 10 cm de espesor asociado a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 100 Lb/pulg³, para las horas indicadas en la Tabla 15, en la que se muestra los valores de las tensiones transversales máximas, tensiones longitudinales máximas y deflexión máxima tanto en la superficie como en el fondo de la losa, evaluadas en el software ISLAB2000, con base al diferencial de temperatura, calculado utilizando el método de correlación LDUST21 .

Tabla 15. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 10 cm con módulo de reacción k= 100 Lb/pulg³.

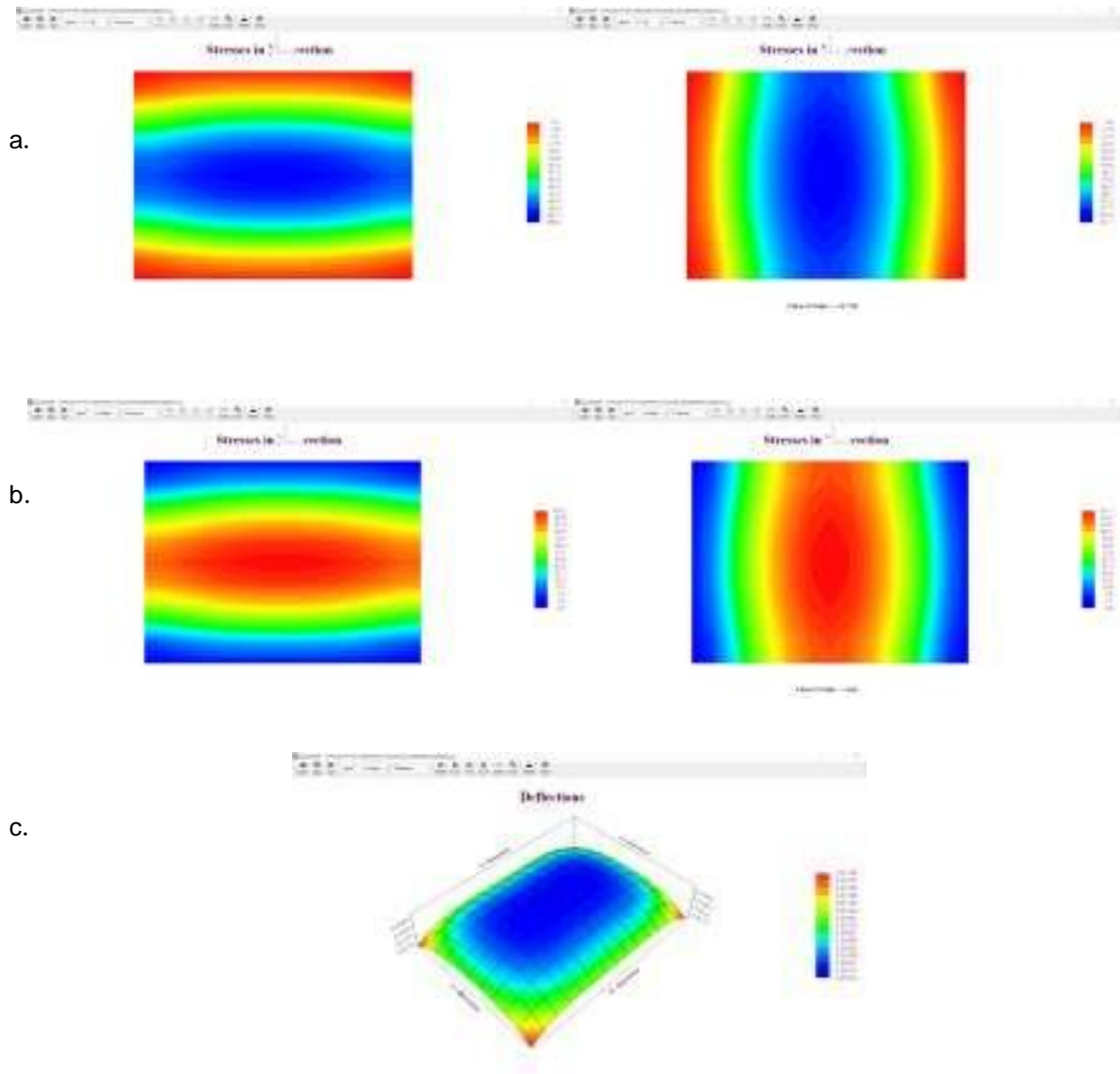
| Evaluación de esfuerzo deformación losa e= 10 cm con Módulo de reacción K = 100 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| ESPESOR DE LOSA 10 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MÁXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MÁXIMA | | DEFLEXION MÁXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MÁXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | | |
| | AM | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | 7:30 | 1.03 | 0.37 | 8.29 | 0.34 | 9.94 | 0.004471 | |
| | 9:30 | 2.96 | 1.06 | 23.82 | 0.97 | 28.57 | 0.00643 | |
| | 11:30 | 3.52 | 1.26 | 28.32 | 1.16 | 33.98 | 0.00699 | |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 14.12 | 5.1 | 105.2 | 4.6 | 131.7 | 0.01798 | |
| | 3:30 | 11.75 | 4.2 | 94.2 | 3.9 | 113.3 | 0.01533 | |
| | 5:30 | 2.34 | 0.84 | 18.83 | 0.77 | 22.59 | 0.005798 | |
| | 7:30 | -0.18 | 1.448 | 0.065 | 1.737 | 0.059 | | 0.003483 |
| | 9:30 | -1.75 | 14.08 | 0.63 | 16.89 | 0.58 | | 0.003961 |
| | 11:30 | -0.95 | 7.64 | 0.34 | 9.17 | 0.31 | | 0.003717 |
| | AM | | | | | | | |
| | 1:30 | -1 | 8.05 | 0.36 | 9.65 | 0.33 | | 0.003733 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

A continuación, se muestran la Figura 21 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima cara inferior de losa. Espesor de losa de 10 cm, a la 1:30 pm. De acuerdo con la información indicada en la Tabla 15.

En la Figura 21. Gráficas a) se observa los cambios tensionales de la losa, en sus bordes sentido transversal y longitudinal, indicando que se está generando tracción en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) en la que se observa que los cambios tensionales de la losa se presentan en el centro, por tanto, las fibras inferiores están trabajando a compresión, permitiendo concluir en la gráfica c) que se cumple la condición del momento flector positivo, es decir, se observa los efectos del alabeo diurno en la losa sin restricciones, de manera que, se forma una deformación o levantamiento de la losa que va de abajo hacia arriba en sentido transversal como longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez debido al módulo de reacción K de 100Lb/pulg³, actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico positivo para la losa de 10 cm de espesor. De esta manera se observa que, en consecuencia, del cambio físico de la losa, el elipsoide en color azul representa el área de losa que pierde contacto con el suelo de soporte observando, que, bajo la misma condición de la losa de 20 cm de espesor, la de 10 cm es más propensa a la flexión debido al menor momento de inercia. Situación que será evaluada en la fase 5 de la investigación, bajo la condición adicional de carga puntual en el centro de la losa y analizada en la fase 6, con el fin de encontrar el control tensional adecuado para disminuir los efectos del alabeo diurno y nocturno.

Figura 21. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm.



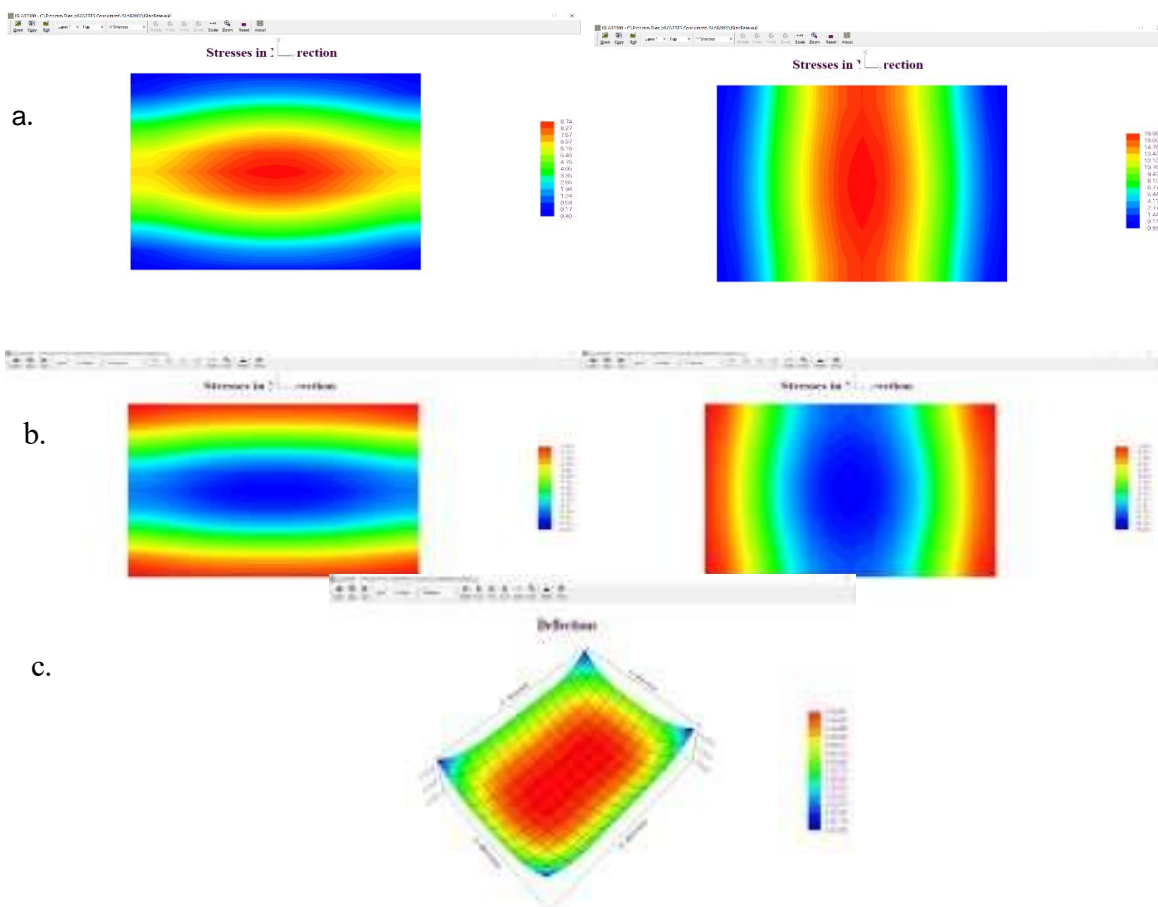
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020

De igual manera se muestra la Figura 22 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima de la cara superior de losa. Espesor de 10 cm, a las 9:30 pm.

En la Figura 22. Gráficas a) se observa los cambios tensionales de la losa, en su centro sentido transversal y longitudinal , indicando que se está generando compresión en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) observando que los cambios

tensionales de la losa se presentan en las zonas laterales, por tanto, las fibras inferiores están trabajando a tracción, permitiendo concluir en la gráfica c) que se cumple la condición del momento flector negativo, es decir, se observa los efectos del alabeo nocturno en la losa sin restricciones, de manera que, se forma una deformación o levantamiento de la losa en sus bordes y vértices sentido transversal y longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez debido al módulo de reacción K de 100Lb/pulg^3 , actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico negativo, para la losa de 10 cm de espesor. De esta manera, se observa que, en consecuencia, el círculo en color rojo representa el área de losa que tiene mayor contacto con el suelo de soporte, mientras las áreas de color verde y azul pierden contacto con este, formando unos voladizos.

Figura 22. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Se continua con el procedimiento a fin de obtener los resultados esperados de la evaluación de esfuerzos y deformación por temperatura de la losa de 30 cm de espesor asociado a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 100 Lb/pulg^3 , para las

horas indicadas en la Tabla 16, en la que se muestra los valores de las tensiones transversales máximas, tensiones longitudinales máximas y deflexión máxima en la superficie como en el fondo de la losa, evaluadas en el software ISLAB2000, con base al diferencial de temperatura, calculado utilizando el método de correlación LDUST21 .

Tabla 16. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 30 cm con módulo de reacción k = 100 Lb/pulg³

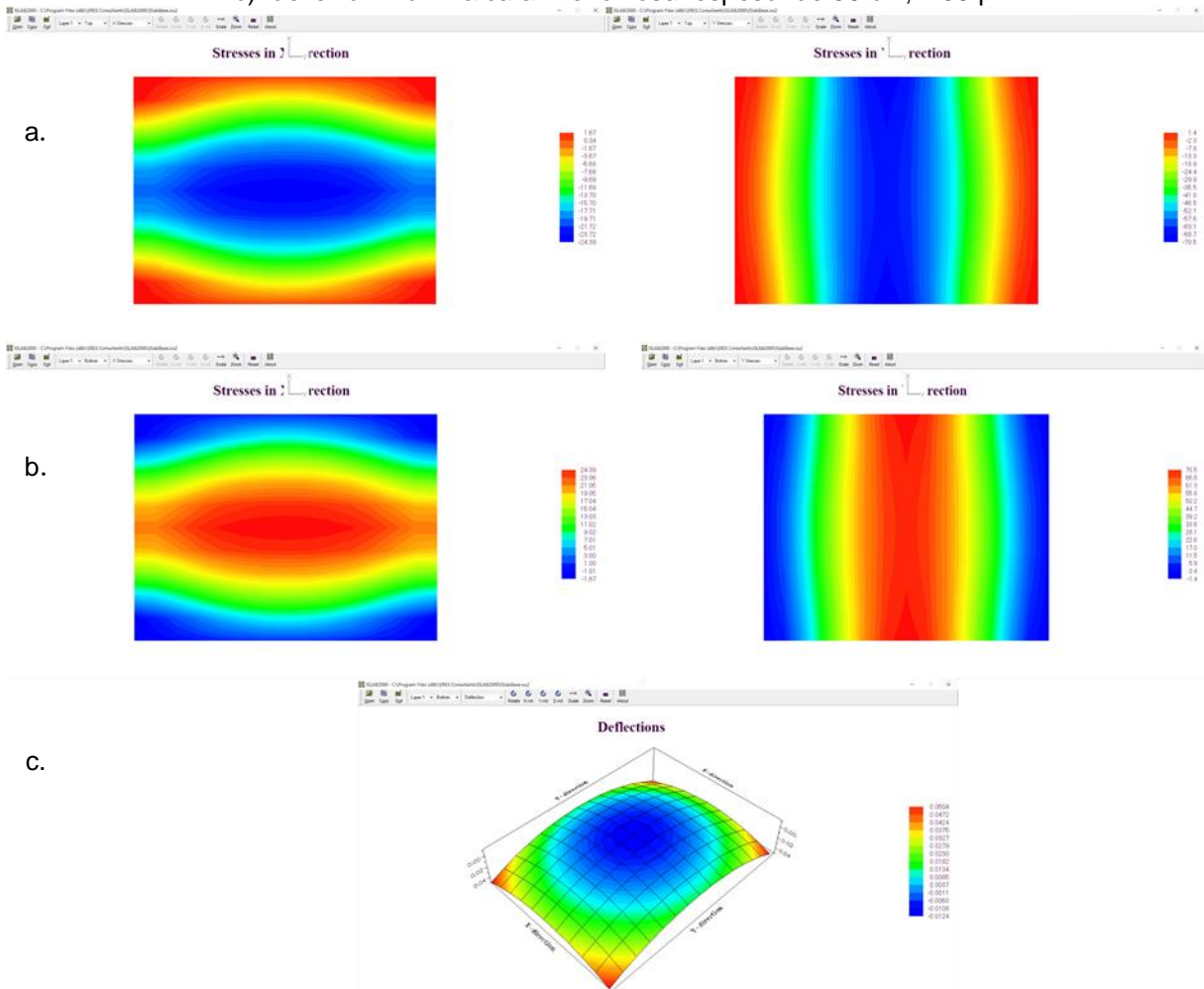
| Evaluación de esfuerzo deformación losa e= 30 cm con Módulo de reacción K = 100 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|---------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| ESPESOR DE LOSA 30 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MÁXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MÁXIMA | | DEFLEXION MÁXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MÁXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | | |
| | | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | 7:30 AM | 3.19 | 0.135 | 2.674 | 0.11 | 6.29 | 0.01336 | |
| | 9:30 | 8.77 | 0.37 | 7.35 | 0.3 | 17.29 | 0.01875 | |
| | 11:30 | 10.8 | 0.46 | 9.05 | 0.37 | 21.29 | 0.02071 | |
| | 1:30 PM | 42.8 | 1.67 | 24.39 | 1.4 | 70.5 | 0.0504 | |
| | 3:30 | 35.2 | 1.43 | 23.33 | 1.2 | 62.1 | 0.0472 | |
| | 5:30 | 7.15 | 0.3 | 5.99 | 0.25 | 14.1 | 0.01518 | |
| | 7:30 | -0.49 | 0.411 | 0.021 | 0.966 | 0.017 | | 0.010505 |
| | 9:30 | -5.22 | 4.37 | 0.22 | 10.29 | 0.18 | | 0.01273 |
| | 11:30 | -3.06 | 2.564 | 0.13 | 6.03 | 0.11 | | 0.01171 |
| | 1:30 AM | -3.06 | 2.564 | 0.13 | 6.03 | 0.11 | | 0.01171 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

A continuación, se muestran la Figura 23 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima cara inferior de losa. Espesor de losa de 30 cm, a la 1:30 pm. De acuerdo con la información indicada en la Tabla 16.

En la Figura 23. Gráficas a) se observa los cambios tensionales de la losa, en sus bordes sentido transversal y longitudinal , indicando que se está generando tracción en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) observando que los cambios tensionales de la losa se presentan en el centro, por tanto, las fibras inferiores están trabajando a compresión, permitiendo concluir en la gráfica c) que se cumple la condición del momento flector positivo, es decir, se observa los efectos del alabeo diurno en la losa sin restricciones, de manera que, se forma una deformación o levantamiento de la losa que va de abajo hacia arriba tanto en sentido transversal como longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función su rigidez debido al módulo de reacción K de 100Lb/pulg³, actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico positivo para la losa de 30 cm de espesor. De esta manera se observa que, en consecuencia, de lo anterior, el círculo en color azul representa el área de losa que pierde contacto con el suelo de soporte observando que, bajo la misma condición de la losa de 20 cm de espesor, la losa de 30 cm en teoría debería ser menor la flexión debido al mayor momento de inercia, pero en realidad lo que sucede es que, se tiene un aumento en la deformación máxima.

Figura 23. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

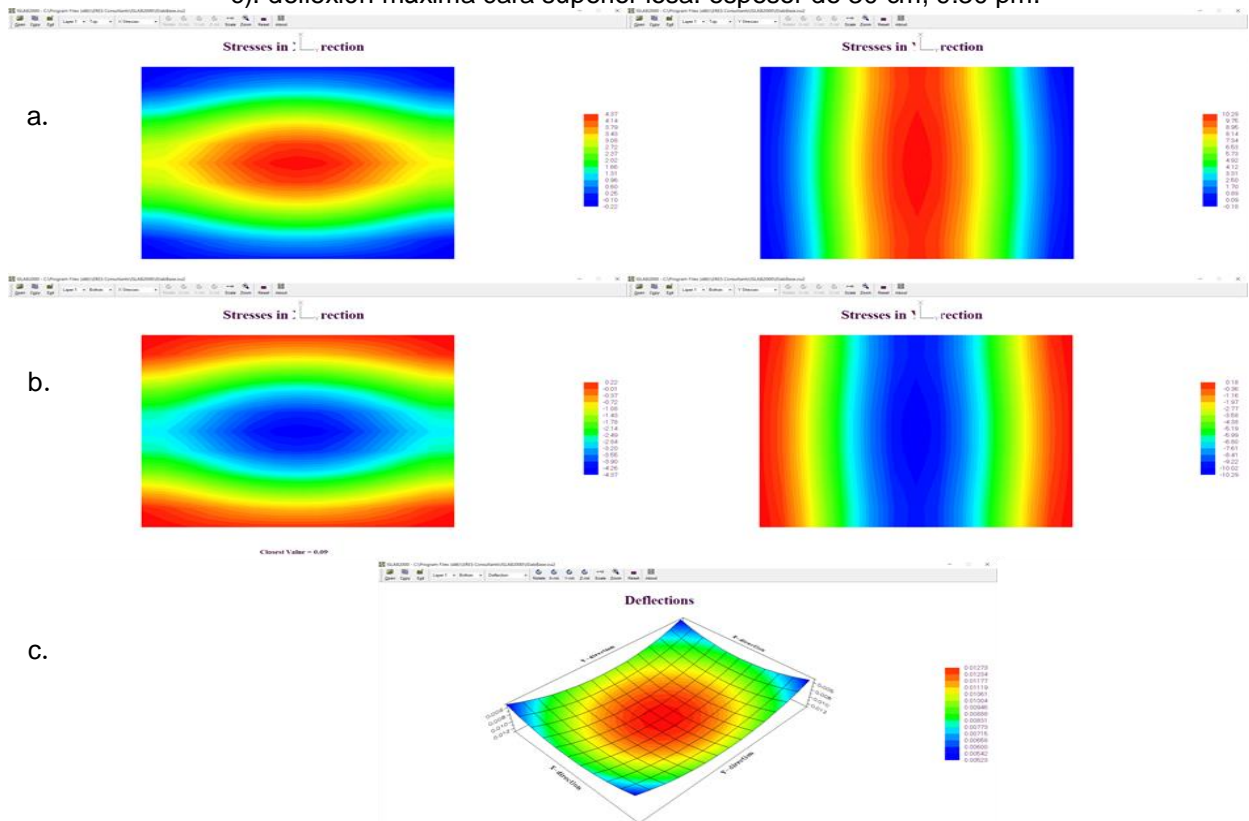
Situación que será evaluada en la fase 5 del presente trabajo de investigación, bajo la condición adicional de carga puntual en el centro de la losa y analizada en la fase 6, con el fin de encontrar el control tensional adecuado para disminuir los efectos del alabeo diurno y nocturno.

De igual manera se muestra la Figura 24 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa b) Tensiones máximas cara inferior de la losa c) Deflexión máxima de la cara superior de losa. Espesor de 30 cm, a las 9:30 pm.

En la Figura 24. Gráficas a) se observa los cambios tensionales de la losa, en su centro sentido transversal y longitudinal, indicando que se está generando compresión en las fibras superiores, situación distinta a la gráfica b) observando que los cambios tensionales de la losa se presentan en las zonas laterales, por tanto, las fibras inferiores

están trabajando a tracción, permitiendo concluir en la gráfica c) que se cumple la condición del momento flector negativo, es decir, se observa los efectos del alabeo nocturno en la losa sin restricciones, de esta manera, se forma una deformación o levantamiento de la losa en sus bordes y vértices sentido transversal y longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez, debido al módulo de reacción K de 100Lb/pulg^3 , actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico negativo, para la losa de 30 cm de espesor. De esta manera, se observa que, en consecuencia, el círculo en color rojo representa el área de losa que tiene mayor contacto con el suelo de soporte, mientras las áreas de color verde y azul pierden contacto con este, formando unos voladizos.

Figura 24. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). tensiones máximas cara inferior losa. c). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 30 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

A continuación, se evaluará bajo las mismas condiciones de gradiente térmico máximo positivo y negativo para las losas de 10,20 y 30 cm de espesor, pero cambiando la rigidez del suelo de soporte, proponiendo un valor de módulo de reacción K de 220Lb/pulg^3 , de acuerdo a lo indicado en la Tabla 13. y 17 a) Inputs de entrada losa $e=10\text{ cm}$. b) Inputs de entrada losa $e=20\text{ cm}$. c) Inputs de entrada losa $e=30\text{ cm}$.

Tabla 17.a) inputs entrada losa e=10 cm. b) inputs entrada losa e=20 cm. c) inputs entrada losa e=30 cm.

a.

| Inputs de entrada | | |
|--|------------------------|---------------------------|
| Módulo elástico del Concreto = | 4 x 10 ⁶ | Psi |
| Relación de Poisson Concreto = | 0.15 | |
| Espesor de losa = | 3.94 | Pulg. |
| Dimensión de la losa = | 118.11 x 157.48 | Pulg ² |
| Tamaño de la malla = | 12 x 12 | Pulg ² (medio) |
| CBR: 15 %, Módulo k-valor = | 220 | Lb/pulg ³ |
| Coefficiente de exp. térmico, α = | 4,4 x 10 ⁻⁶ | Pulg./Pulg./°F |

b.

| Inputs de entrada | | |
|--|------------------------|---------------------------|
| Módulo elástico del Concreto = | 4 x 10 ⁶ | Psi |
| Relación de Poisson Concreto = | 0.15 | |
| Espesor de losa = | 7.87 | Pulg. |
| Dimensión de la losa = | 118.11 x 157.48 | Pulg ² |
| Tamaño de la malla = | 12 x 12 | Pulg ² (medio) |
| CBR: 15 %, Módulo k-valor = | 220 | Lb/pulg ³ |
| Coefficiente de exp. térmico, α = | 4,4 x 10 ⁻⁶ | Pulg./Pulg./°F |

c.

| Inputs de entrada | | |
|--|------------------------|---------------------------|
| Módulo elástico del Concreto = | 4 x 10 ⁶ | Psi |
| Relación de Poisson Concreto = | 0.15 | |
| Espesor de losa = | 11.81 | Pulg. |
| Dimensión de la losa = | 118.11 x 157.48 | Pulg ² |
| Tamaño de la malla = | 12 x 12 | Pulg ² (medio) |
| CBR: 15 %, Módulo k-valor = | 220 | Lb/pulg ³ |
| Coefficiente de exp. térmico, α = | 4,4 x 10 ⁻⁶ | Pulg./Pulg./°F |

Fuente: Elaboración propia, con información de American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO) y Thomas Van Dam, PhD., P.E Universidad tecnológica de Michigan. Paquete de talleres de transferencia de tecnología PCC ISLAB2000. Y especificaciones de carreteras INVIAS 2013 artículos 231-13, 311 numeral 311.5.2.2., e IDU 4ET-1C-01.

Se continua con el procedimiento de evaluación de esfuerzos y deformación por temperatura de la losa de 10 cm de espesor asociado a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 220 Lb/pulg³, para las horas indicadas en la Tabla 18, mostrando los valores de las tensiones transversales máximas, tensiones longitudinales máximas y deflexión máxima tanto en la superficie como en el fondo de la losa, evaluadas en el software ISLAB2000, con base al diferencial de temperatura máximo positivo y negativo. A fin de obtener los resultados esperados, para su posterior análisis.

Tabla 18. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 10 cm con módulo de reacción k= 220 Lb/pulg³

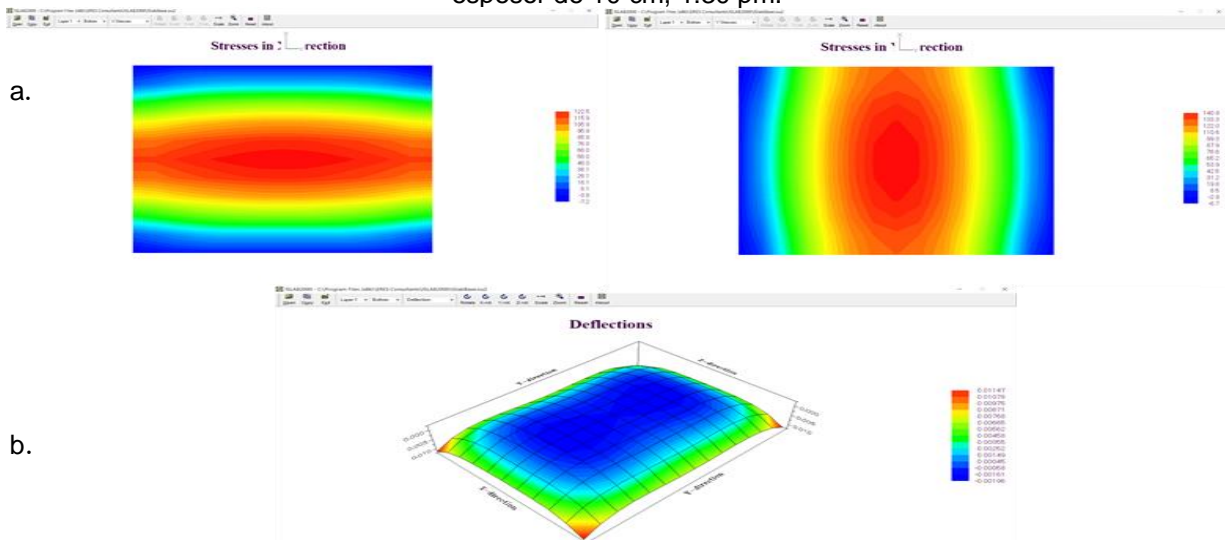
| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 10 cm con Módulo de reacción K= 220 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| ESPESOR DE LOSA 10 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA | DEFLEXION MAXIMA |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA | CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | Psí | Psí | Psí | Psí | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 14.12 | | 122.5 | | 140.9 | 0.01147 | |
| | 9:30 | -1.75 | 16.9 | | 17.86 | | | 0.001832 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

A continuación, se muestran la Figura 25 Gráficas a) Tensiones máximas cara inferior de la losa b) Deflexión máxima cara inferior de losa. Espesor de losa de 10 cm, a la 1:30 pm. De acuerdo con la información registrada en la Tabla 18.

En la Figura 25. Gráficas a) se observan los cambios tensionales de la losa en su centro, por lo tanto, las fibras inferiores están trabajando a compresión, permitiendo concluir en la gráfica b) que se cumple la condición del momento flector positivo, es decir, se observa los efectos del alabeo diurno en la losa sin restricciones, de manera que, se forma una deformación o levantamiento de la losa que va de abajo hacia arriba tanto en sentido transversal como longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función su rigidez debido al módulo de reacción K de 220Lb/pulg³, actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico positivo para la losa de 10 cm de espesor. De esta manera, se observa que, en consecuencia, el círculo en color azul representa el área de losa que pierde contacto con el suelo de soporte observando que, bajo la misma condición de la losa de 10 cm de espesor, pero con módulo de reacción k de 100Lb/pulg³ tiende a disminuir en su deformación, con indicios de un control tensional más equilibrado entre capas. Situación que será evaluada en la fase 5 de la investigación bajo la condición adicional de carga puntual en el centro de la losa y analizada en la fase 6, con el fin de encontrar el control tensional adecuado para disminuir los efectos del alabeo diurno y nocturno.

Figura 25. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm.

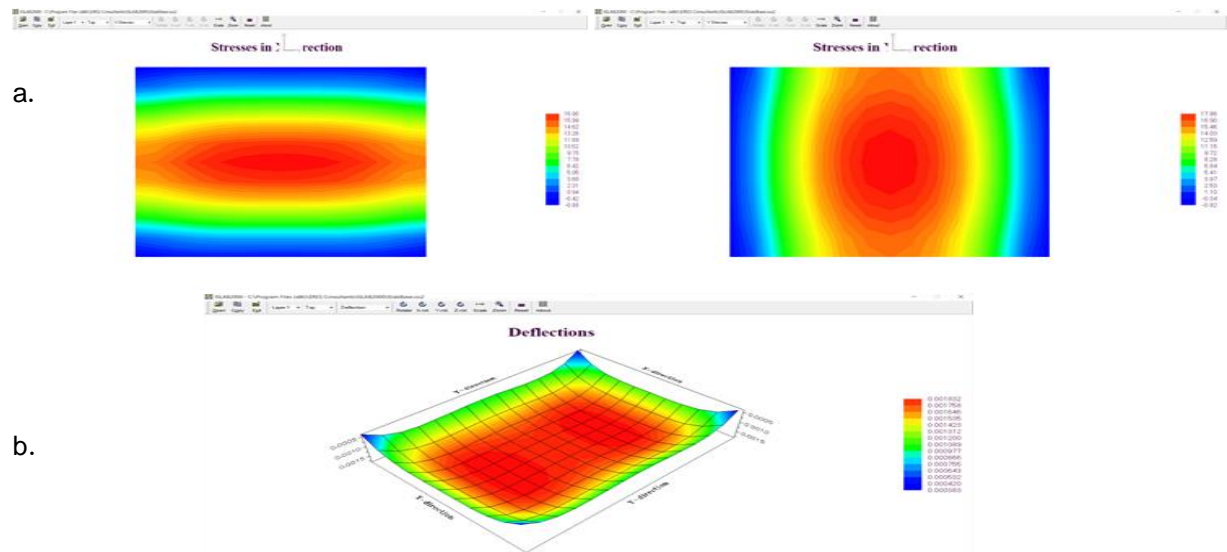


Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

De igual manera, se muestra la Figura 26 Gráficas a) Tensiones máximas cara superior de la losa. c) Deflexión máxima de la cara superior de losa. Espesor de 10 cm, a las 9:30 pm. De acuerdo con la información registrada en la Tabla 18.

En la Figura 26. Gráficas a) se observa los cambios tensionales en el centro de la losa cara superior, indicando que se está generando compresión en las fibras superiores, a diferencia de las fibras inferiores que están trabajando a tracción, permitiendo concluir en la gráfica b) que se cumple la condición del momento flector negativo, es decir, se observa los efectos del alabeo nocturno en la losa sin restricciones, originando una deformación o levantamiento de la losa en sus bordes y vértices sentido transversal y longitudinal, en respuesta a la resiliencia del suelo de soporte que está dada en función de su rigidez y debido al módulo de reacción K de 220Lb/pulg^3 , actuando en conjunto con los esfuerzos generados por el máximo gradiente térmico negativo, para la losa de 10 cm de espesor. De esta manera, se observa que, en consecuencia, de lo anterior, el círculo en color rojo representa el área de losa que tiene mayor contacto con el suelo de soporte, mientras las áreas de color verde y azul pierden contacto con este, formando unos voladizos, teniendo en cuenta la condición de la losa de 10 cm de espesor con un módulo de reacción K de 100Lb/pulg^3 , la deformación máxima tiende a reducirse, lo cual ayudaría a disminuir la formación de voladizos en sus bordes laterales y vértices. Situación que será evaluada en la fase 5 de la investigación bajo la condición adicional de carga puntual en el centro de la losa y analizada en la fase 6, con el fin de encontrar el control tensional adecuado para disminuir los efectos del alabeo diurno y nocturno.

Figura 26. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement

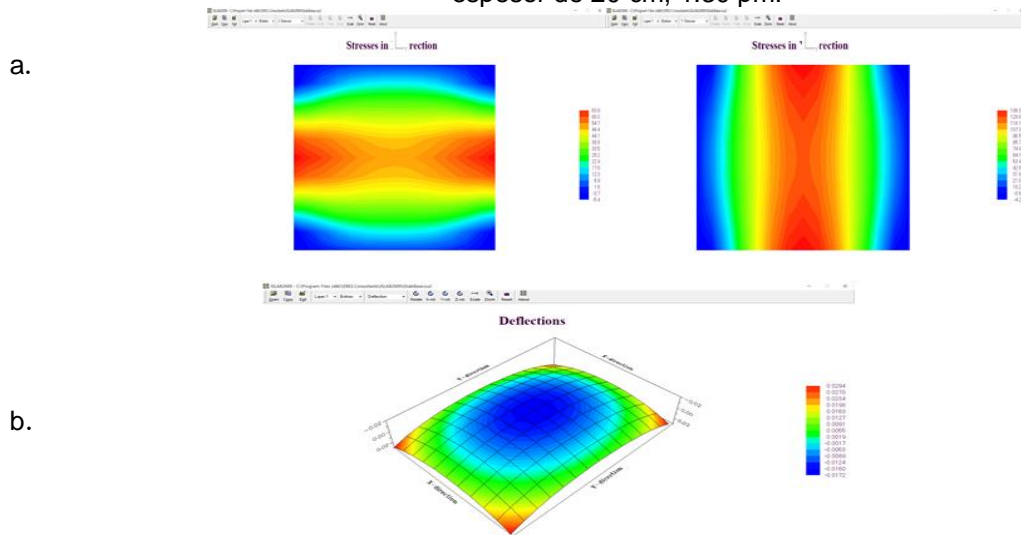
De esta manera, se continúa con el procedimiento de evaluación de los esfuerzos y deformaciones de la losa, originados por el gradiente térmico máximo positivo y negativo, teniendo en cuenta la condición del suelo de soporte K de 220Lb/pulg³, para las losas de 20 y 30 cm de espesor, como se indica en las Tablas 19 y 20 y se observa en las Figuras 27, 28,29 y 30.

Tabla 19. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 20 cm con módulo de reacción k = 220 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 20 cm con Módulo de reacción K= 220 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| ESPESOR DE LOSA 20 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MÁXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MÁXIMA | | DEFLEXION MÁXIMA | DEFLEXION MAXIMA |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA | CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 27.98 | | 63.6 | | 136 | 0.0294 | |
| | 9:30 | -3.6 | 15.54 | | 25.06 | | | 0.00448 |

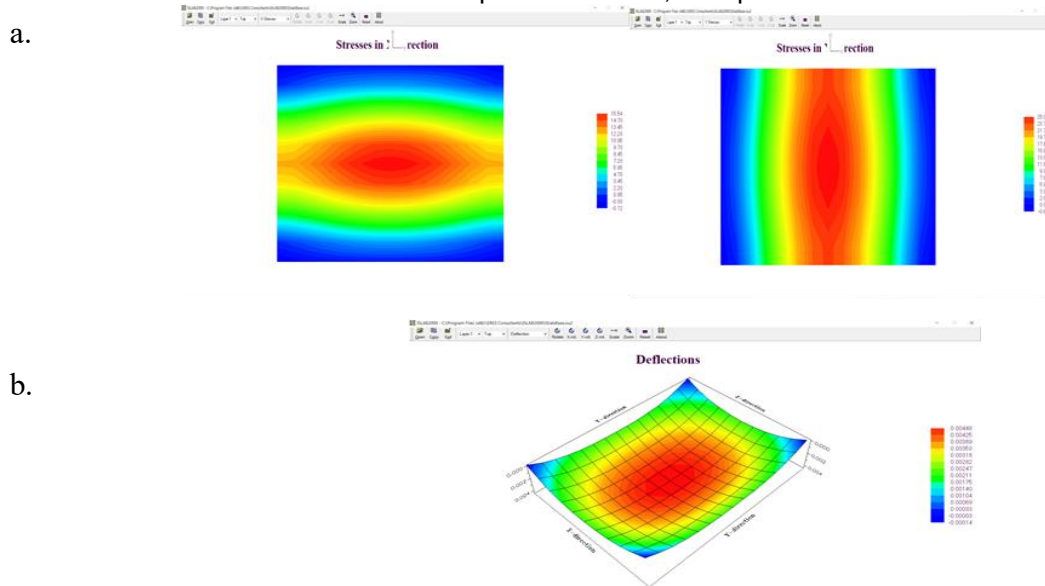
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

Figura 27. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Figura 28. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm.



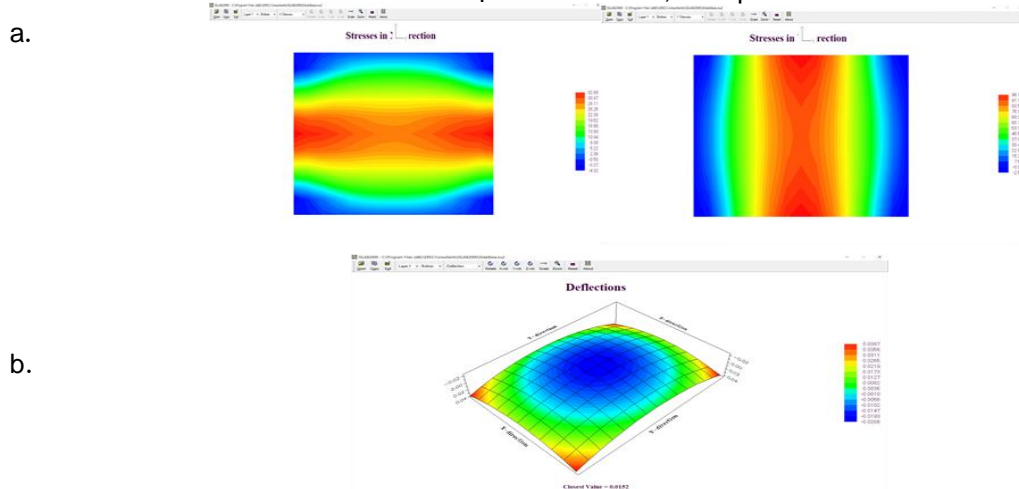
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Tabla 20. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 30$ cm con módulo de reacción $k = 220$ Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa $e = 30$ cm con Módulo de reacción $K = 220$ Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| ESPESOR DE LOSA 30 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA | DEFLEXION MAXIMA |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA | CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 42.38 | | 32.88 | | 96.1 | 0.0387 | |
| | 9:30 | -5.22 | 8.88 | | 15.54 | | | 0.00678 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

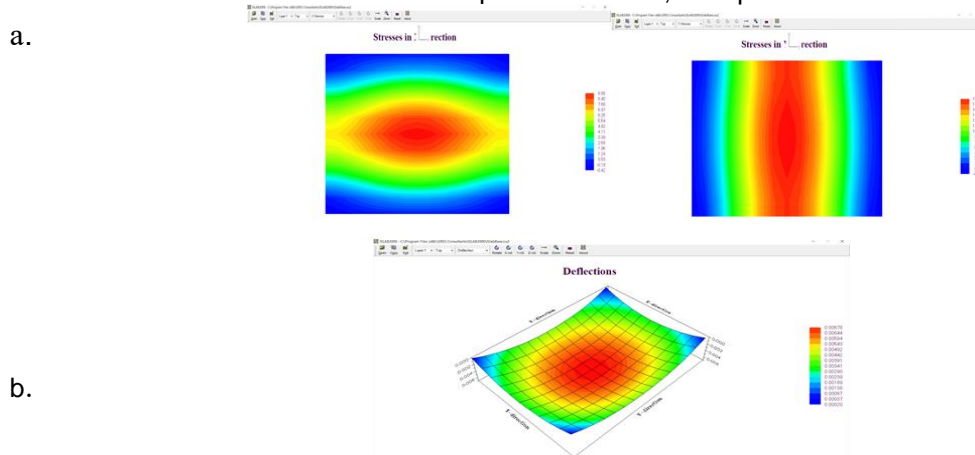
Figura 29. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement

ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Figura 30. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 30 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Las variables a evaluar para obtener la combinación de espesor de losa y módulo de reacción K, serán las variables propuestas de combinación entre sí, puesto que no se gobierna sobre la variable del clima que será el factor determinante para obtener el resultado esperado entre espesor de losa y tipo de rigidez de suelo de soporte que permita controlar de mejor manera los efectos del fenómeno de alabeo. De ahí que, se tendrá en cuenta para el análisis de resultados el cambio tensional entre la losa y el suelo de soporte debido a los efectos ocasionados por los esfuerzos tensionales del máximo gradiente de temperatura lineal positivo y negativo, en ese sentido, se procede a evaluar por último bajo la condición de módulo de reacción K de 700Lb/pulg³, para las losas de 10, 20 y 30 cm de espesor, como se indica en la Tabla 21 a, b y c (Inputs de entrada) y Tablas 22 ,23 y 24 y que se observa en las Figuras 31,32,33,34,35 y 36.

Tabla 21.a) Inputs entrada losa e=10 cm. b) Inputs entrada losa e=20 cm. c) Inputs entrada losa e=30 cm.

a.

| Inputs de entrada | | |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Módulo elástico del Concreto | = | 4 x 10 ⁶ Psi |
| Relación de Poisson Concreto | = | 0.15 |
| Espesor de losa | = | 3.94 Pulg. |
| Dimensión de la losa | = | 118.11 x 157.48 Pulg ² |
| Tamaño de la malla | = | 12 x 12 Pulg ² (medio) |
| CBR: 80 %, Módulo k-valor | = | 700 Lb/pulg ³ |
| Coefficiente de exp. térmico, α | = | 4,4 x 10 ⁻⁶ Pulg./Pulg./°F |

b.

| Inputs de entrada | | |
|---|------------------------|---------------------------|
| Módulo elástico del Concreto = | 4 x 10 ⁶ | Psi |
| Relación de Poisson Concreto = | 0.15 | |
| Espesor de losa = | 7.87 | Pulg. |
| Dimensión de la losa = | 118.11 x 157.48 | Pulg ² |
| Tamaño de la malla = | 12 x 12 | Pulg ² (medio) |
| CBR: 80 %, Módulo k-valor = | 700 | Lb/pulg ³ |
| Coeficiente de exp. térmico, α = | 4,4 x 10 ⁻⁶ | Pulg./Pulg./°F |

c.

| Inputs de entrada | | |
|---|------------------------|---------------------------|
| Módulo elástico del Concreto = | 4 x 10 ⁶ | Psi |
| Relación de Poisson Concreto = | 0.15 | |
| Espesor de losa = | 11.81 | Pulg. |
| Dimensión de la losa = | 118.11 x 157.48 | Pulg ² |
| Tamaño de la malla = | 12 x 12 | Pulg ² (medio) |
| CBR: 80 %, Módulo k-valor = | 700 | Lb/pulg ³ |
| Coeficiente de exp. térmico, α = | 4,4 x 10 ⁻⁶ | Pulg./Pulg./°F |

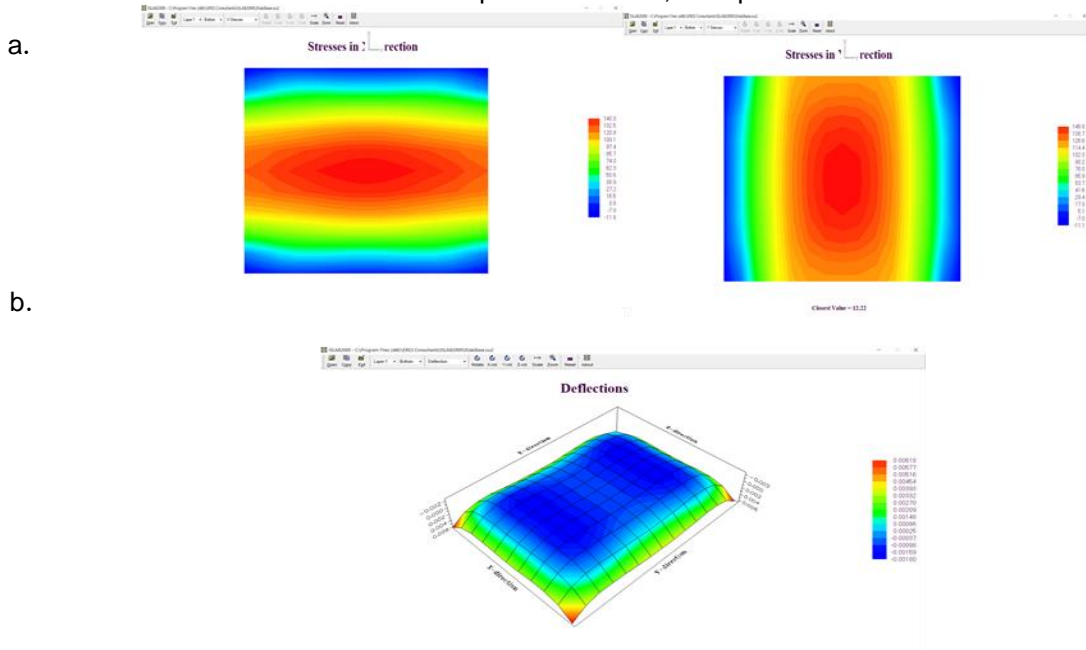
Fuente: Elaboración propia, con información de American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO) y Thomas Van Dam, Ph.D., P.E Universidad tecnológica de Michigan. Paquete de talleres de transferencia de tecnología PCC ISLAB2000. Y especificaciones de carreteras INVIAS 2013 artículos 231-13, 311 numeral 311.5.2.2., e IDU 4ET-1C-01.

Tabla 22. Evaluación de esfuerzo, deformación losa e= 10 cm con módulo de reacción k = 700 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 10 cm con Módulo de reacción K= 700 Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| ESPESOR DE LOSA 10 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MAXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | in | in |
| | | | Psi | Psi | Psi | Psi | | |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 14.12 | | 140.3 | | 146.8 | 0.00618 | |
| | 9:30 | -1.75 | 18.07 | | 17.42 | | | 0.000618 |

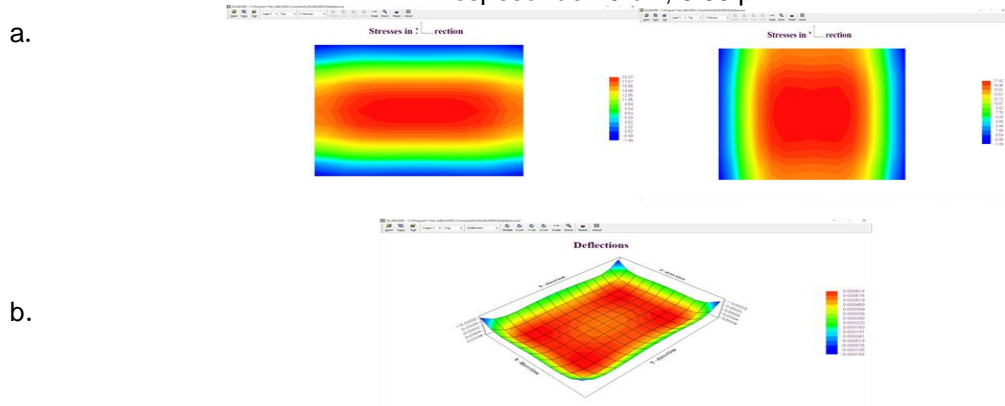
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

Figura 31. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 10 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Figura 32. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 10 cm, 9:30 pm.



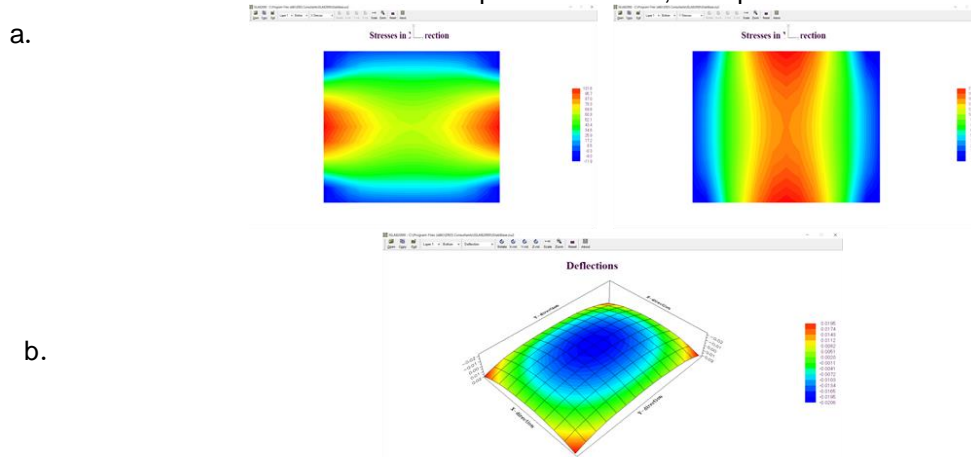
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software islab2000, cedido por pavement me Desing-universidad de illinois-chad becker-2020.

Tabla 23. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 20$ cm con módulo de reacción $k = 700$ Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa $e = 20$ cm con Módulo de reacción $K = 700$ Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| ESPESOR DE LOSA 20 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MAXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 27.98 | | 101.6 | | 175.9 | 0.0195 | |
| | 9:30 | -3.6 | 27.56 | | 34.02 | | | 0.001599 |

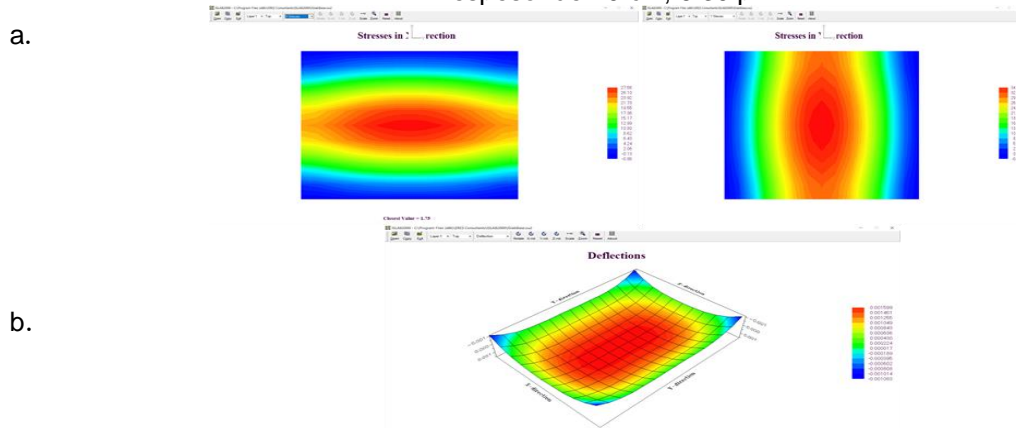
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000.

Figura 33. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 20 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Figura 34. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor de 20 cm, 9:30 pm.



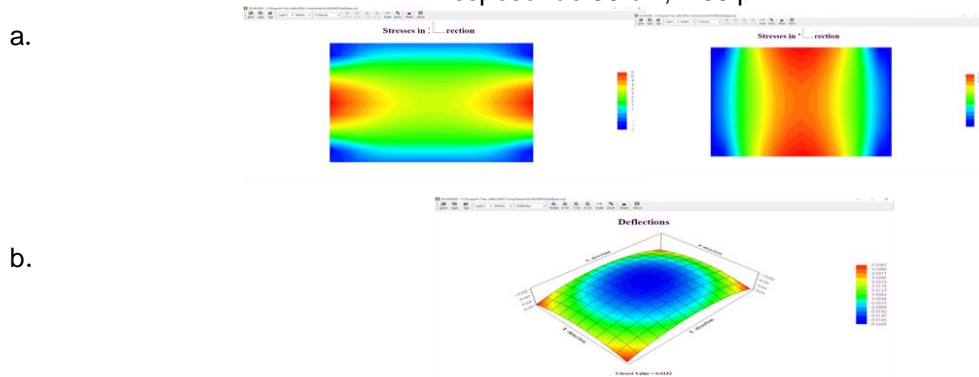
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Tabla 24. Evaluación de esfuerzo, deformación losa $e = 30$ cm con módulo de reacción $k = 700$ Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa $e = 30$ cm con Módulo de reacción $K = 700$ Lb/pulg ³ | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|--|--|
| ESPESOR DE LOSA 30 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA °F | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA CARA INFERIOR DIA in | DEFLEXION MAXIMA CARA SUPERIOR NOCHE in |
| | | | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | | |
| | | PM | | | | | | |
| | 1:30 | 42.38 | | 58.6 | | 119.9 | 0.0271 | |
| | 9:30 | -5.22 | 20.83 | | 34.28 | | | 0.00285 |

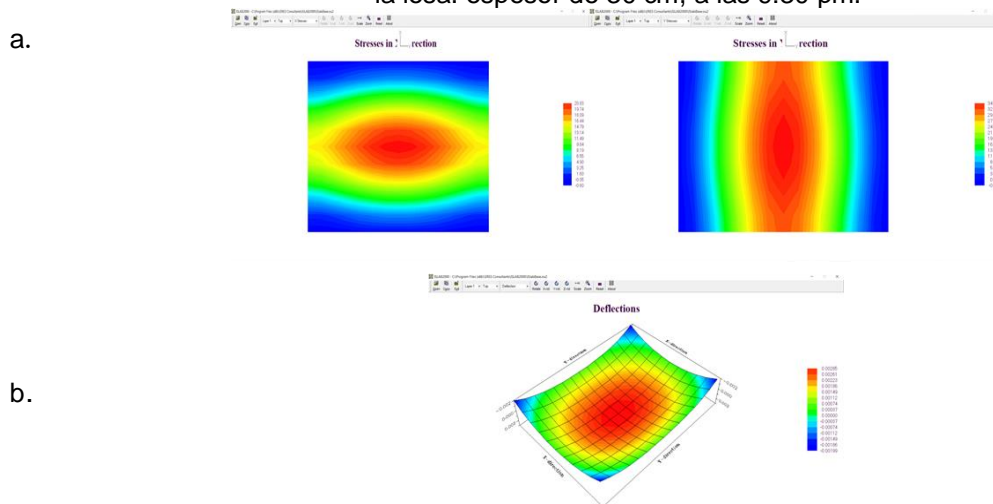
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

Figura 35. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor de 30 cm, 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Figura 36. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior de la losa. b). deflexión máxima cara superior de la losa. espesor de 30 cm, a las 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

En las Tablas 25,26 y 27 se indica el resumen de resultados obtenidos luego de la evaluación de esfuerzos y deformación en la losa de 10,20 y 30 cm de espesor, de modo que, se observa la tendencia del comportamiento dinámico de la relación entre el espesor de losa y los módulos de reacción K del suelo de soporte de 100,220 y 700 Lb/pulg³, sumado a las condiciones de gradiente térmico máximo positivo y negativo.

En la Tabla 25, se indica que para un gradiente positivo y módulo de reacción K de 100 Lb/pulg³, las tensiones máximas son de mayor valor en la losa de 10 cm de espesor que en las losas de 20 y 30 cm, sin embargo, la deflexión máxima va aumentando a medida que se incrementa el espesor de losa, de igual manera se indica para un gradiente

negativo donde las tensiones máximas son más representativas en la losa de 10 cm de espesor, pero a diferencia de la condición anterior, la losa de 20 cm de espesor experimenta una similitud en las tensiones longitudinales máximas a la de 10 cm, mientras que la deflexión máxima aumenta con el incremento del espesor de losa.

Tabla 25. Evaluación esfuerzos y deformación losas 10,20 y 30 cm, espesor módulo reacción K = 100 Lb/pulg³.

| | | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|------------|---------|---------|--|
| | Hora | 1:30 p. m. | | | |
| | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm | |
| CARA INFERIOR DE LOSA | Tensión Transversal Máxima | 105.20 | 43.00 | 24.39 | |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 131.70 | 107.20 | 70.50 | |
| | Deflexión Máxima | 0.01798 | 0.0393 | 0.05504 | |
| | Hora | 9:30 p. m. | | | |
| | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm | |
| CARA SUPERIOR DE LOSA | Tensión Transversal Máxima | 14.08 | 8.74 | 4.37 | |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 16.89 | 16.98 | 10.29 | |
| | Deflexión Máxima | 0.003961 | 0.00877 | 0.01273 | |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Tabla 26, se indica que para un gradiente positivo y módulo de reacción K de 220 Lb/pulg³, las tensiones máximas son de mayor valor en la losa de 10 cm de espesor que en las losas de 20 y 30 cm, sin embargo, la deflexión máxima va aumentando a medida que se incrementa el espesor de losa, de igual manera se indica para un gradiente negativo donde las tensiones transversales máximas son más representativas en la losa de 10 cm de espesor, pero a diferencia de la condición anterior, la losa de 20 cm de espesor experimenta un incremento en las tensiones longitudinales máximas con relación a los valores de las losas de 10 y 30 cm, mientras que la deflexión máxima aumenta con el incremento del espesor de losa.

Tabla 26. Evaluación esfuerzos y deformación losas 10,20 y 30 cm espesor módulo reacción k = 220 Lb/pulg³.

| | | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|------------|---------|---------|--|
| | Hora | 1:30 p. m. | | | |
| | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm | |
| CARA INFERIOR DE LOSA | Tensión Transversal Máxima | 122.50 | 63.60 | 32.88 | |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 140.90 | 136.00 | 96.10 | |
| | Deflexión Máxima | 0.01147 | 0.0294 | 0.0387 | |
| | Hora | 9:30 p. m. | | | |
| | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm | |
| CARA SUPERIOR DE LOSA | Tensión Transversal Máxima | 16.90 | 15.54 | 8.88 | |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 17.86 | 25.06 | 18.73 | |
| | Deflexión Máxima | 0.001832 | 0.00448 | 0.00678 | |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Tabla 27, se indica que para un gradiente positivo y módulo de reacción K de 700 Lb/pulg³, las tensiones transversales máximas son de mayor valor en la losa de 10 cm de espesor que en las losas de 20 y 30 cm, sin embargo, la deflexión máxima es muy inferior a las reportadas en las losas de 20 y 30 cm, en cierta medida la tendencia con relación a lo registrado en los dos casos anteriores de relación de módulos de reacción K, se

observa que la losa de 10 cm controla los efectos del alabeo positivo y negativo a medida que se incrementa la rigidez del suelo de soporte, y la diferencia entre las tensiones máximas de la losa de 20 y 30 cm en la condición del gradiente térmico máximo negativo son similares, en ese sentido la evaluación que procede para cuando se adiciona una carga puntual en el centro de la losa, será teniendo en cuenta la tendencia más desfavorable y favorable al control del alabeo, es decir, que de acuerdo a los resultados obtenidos en la condición de losa sin restricción, se tomara para la evaluación de la Fase 5 de la investigación, la combinación de los espesores de 10 y 30 cm de losa, respecto a los módulos de reacción K de 100 y 700 Lb/pulg³, y la carga puntual a la que será sometida la losa, cambiando así su condición de evaluación a la de una losa con restricción.

Tabla 27. Evaluación esfuerzos y deformación losas de 10,20 y 30 cm espesor módulo reacción k = 700 Lb/pulg³.

| Hora | | 1:30 p. m. | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------|----------|---------|
| CARA INFERIOR DE LOSA | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm |
| | Tensión Transversal Máxima | 140.30 | 101.60 | 58.60 |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 146.80 | 175.90 | 119.90 |
| | Deflexión Máxima | 0.00618 | 0.0195 | 0.0271 |
| Hora | | 9:30 p. m. | | |
| CARA SUPERIOR DE LOSA | Espesores de losa | 10 cm | 20 cm | 30 cm |
| | Tensión Transversal Máxima | 18.07 | 27.56 | 20.83 |
| | Tensión Longitudinal Máxima | 17.42 | 34.02 | 34.28 |
| | Deflexión Máxima | 0.000618 | 0.001083 | 0.00285 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

7.5. FASE 5. EVALUACIÓN DE MÁXIMAS TENSIONES Y DEFORMACIÓN DE LA LOSA, POR GRADIENTE TÉRMICO, CARGA PUNTUAL EN EL CENTRO DE LA LOSA, PARA ESPEORES DE LOSA DE 10 Y 30 CM Y (K) DE SUELO DE SOPORTE DE 100 Y 700 LB/PULG³

Para la evaluación de los esfuerzos y deformación de la losa, bajo la condición de carga puntual en el centro de losa, se asumió el valor de carga unitaria tomada de la resolución 4100 del 2004 INVIAS, Información que se suministra en la tabla 28, en relación con los impulsos de entrada al software ISLAB2000, los cuales se corren para el posterior análisis de resultados.

Tabla 28. Inputs entrada evaluación esfuerzos y deformación losas 10 y 30 cm, espesor

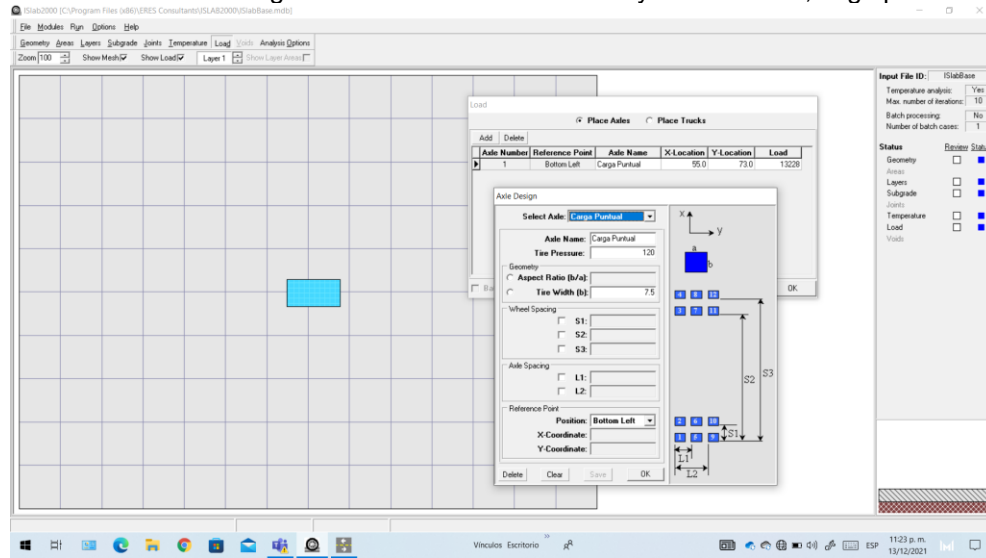
| |
|---|
| Condición de análisis: |
| Carga Puntual al centro de la losa: |
| Dónde, P = 13228.0 Libras (10387-Resolucion-4100-Del-28-de-Diciembre-de-2004 @ Www.Invias.Gov.Co , n.d.) |
| K: 100 y 700 Lb/Pulg ³ . |

Horas: 1:30 pm -9:30 pm

Fuente: Elaboración propia, con información AASHTO y especificaciones de carreteras INVIAS 2015.

En este orden de ideas, en la Figura 37 se presenta el panel de ingreso para la configuración en el software ISLAB2000, el cual facilita la evaluación de cargas puntuales en el centro de la losa.

Figura 37. Panel islab2000 configuración evaluación esfuerzos y deformación, carga puntual centro losa.



Fuente: Imagen gráfica ISLAB2000.

Por su parte, en la tabla 29 se hace referencia a los resultados esperados tras la evaluación de los esfuerzos y deformaciones por gradiente térmica máxima positiva y negativa, además de la carga puntual en el centro de la losa de 10 cm de espesor, la cual se encuentra asociada a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 100 Lb/pulg³.

Tabla 29. Evaluación esfuerzo, deformación losa e= 10 cm módulo reacción k = 100 Lb/pulg³

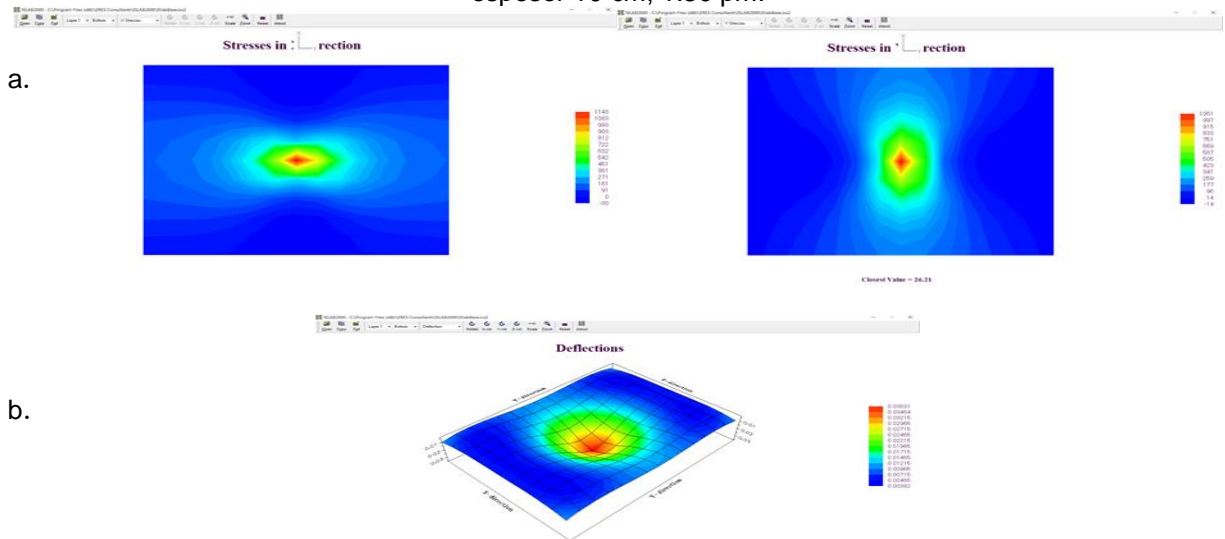
| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 10 cm con Módulo de reacción K = 100 Lb/pulg ³ y P=13228 Lb | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| ESPESOR DE LOSA 10 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA CARA INFERIOR DIA | DEFLEXION MAXIMA CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | F | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | CARA SUPERIOR Psi | CARA INFERIOR Psi | in | in |
| | PM | 1:30 | 14.12 | | 1143 | | 1051 | 0.03631 |
| | 9:30 | -1.75 | 1017 | | 900 | | | 0.04131 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

Asimismo, en la Figura 38, gráficas a) y b) se observa los cambios tensionales en el centro de la losa cara inferior, los cuales reaccionan a la combinación de carga puntual y rigidez del suelo de soporte, de ahí que, el círculo de color rojo representa el área en contacto de la sección de la carga puntual, debido a su efecto punzante en la losa, a diferencia de la condición de losa sin restricción, donde la losa forma la curvatura

libremente, pero en consecuencia al efecto del gradiente térmico máximo positivo, el área residual en color azul mantiene su condición de tracción en las fibras superiores y de contracción en las fibras inferiores, así que, con base a los resultados de Tabla 29, confirma que, la deflexión máxima se da en la cara inferior de la losa, es decir, que en este caso la relación espesor de losa, rigidez del suelo de soporte, y carga puntual, no alcanzan a controlar los efectos del alabeo diurno, por cuanto el momento de inercia del espesor de losa de 10cm, gobierna la condición a ser más propensa a la flexión.

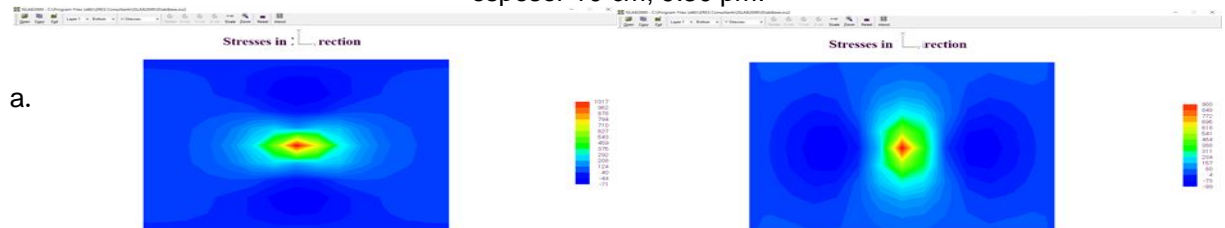
Figura 38. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 10 cm, 1:30 pm.



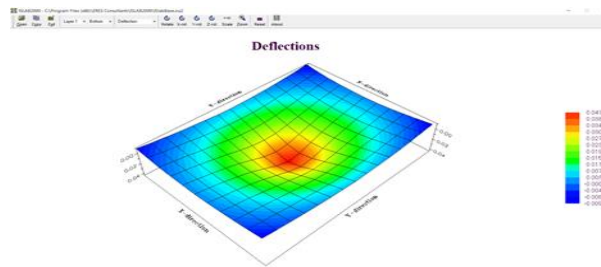
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Por su parte, en la Figura 39, las gráficas a) y b) dan a conocer que el cambio tensional se presenta en el centro de la losa, y que el efecto punzante de la carga puntual, está afectando el momento de inercia de la losa de 10 cm, en consecuencia, de esto, se tiene que lo de color azul, muestra el área de la losa más propensa a la flexión durante el alabeo nocturno.

Figura 39. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 10 cm, 9:30 pm.



b.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

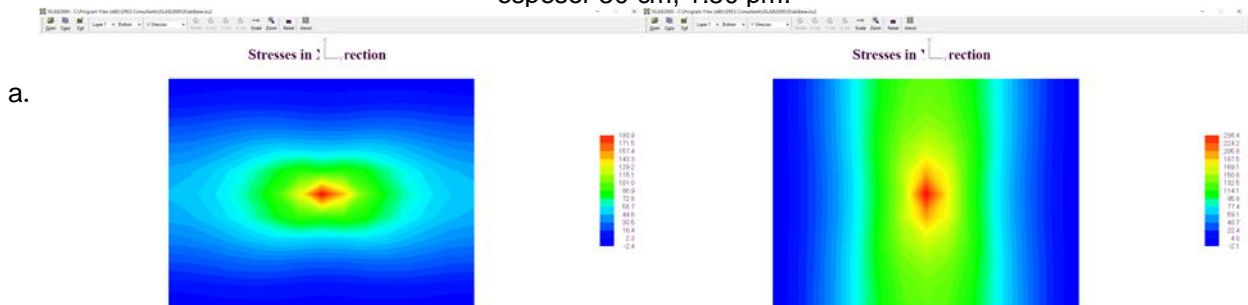
Tabla 30. Evaluación esfuerzo, deformación losa e= 30 cm módulo reacción k = 100 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 30 cm con Módulo de reacción K = 100 Lb/pulg ³ y P=13228 Lb | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| ESPESOR DE LOSA 30 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA | DEFLEXION MAXIMA |
| | | °F | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA | CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 42.38 | | 180.9 | | 236.4 | 0.0554 | |
| | 9:30 | -5.22 | 141 | | 142.6 | | | 0.02285 |

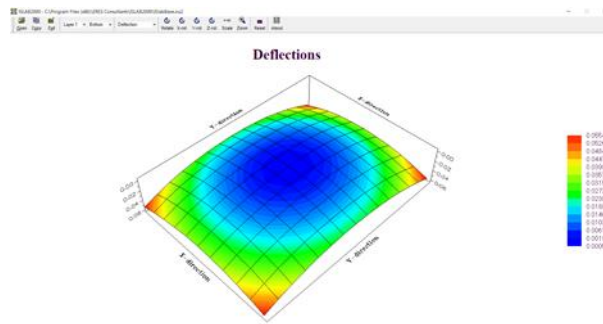
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 40. Gráficas a) y b) se observa los cambios tensionales en el centro de la losa cara inferior, los cuales reaccionan a la combinación de carga puntual y rigidez del suelo de soporte, de ahí que el círculo de color rojo representa el área en contacto de la sección de la carga puntual, debido a su efecto punzante en la losa, a diferencia de la condición de losa sin restricción, donde la losa forma la curvatura libremente, pero en consecuencia al efecto del gradiente térmico máximo positivo, el área residual en color azul mantiene su condición de tracción en las fibras superiores y de contracción en las fibras inferiores, así que, con base a los resultados de Tabla 30, confirma que, la deflexión máxima se da en la cara inferior de la losa, es decir, la relación espesor de losa, rigidez del suelo de soporte, y carga puntual, no alcanzan a controlar los efectos del alabeo diurno, por cuanto en la losa de 30cm, la condición física que gobierna es a ser más propensa a la flexión.

Figura 40. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 30 cm, 1:30 pm.



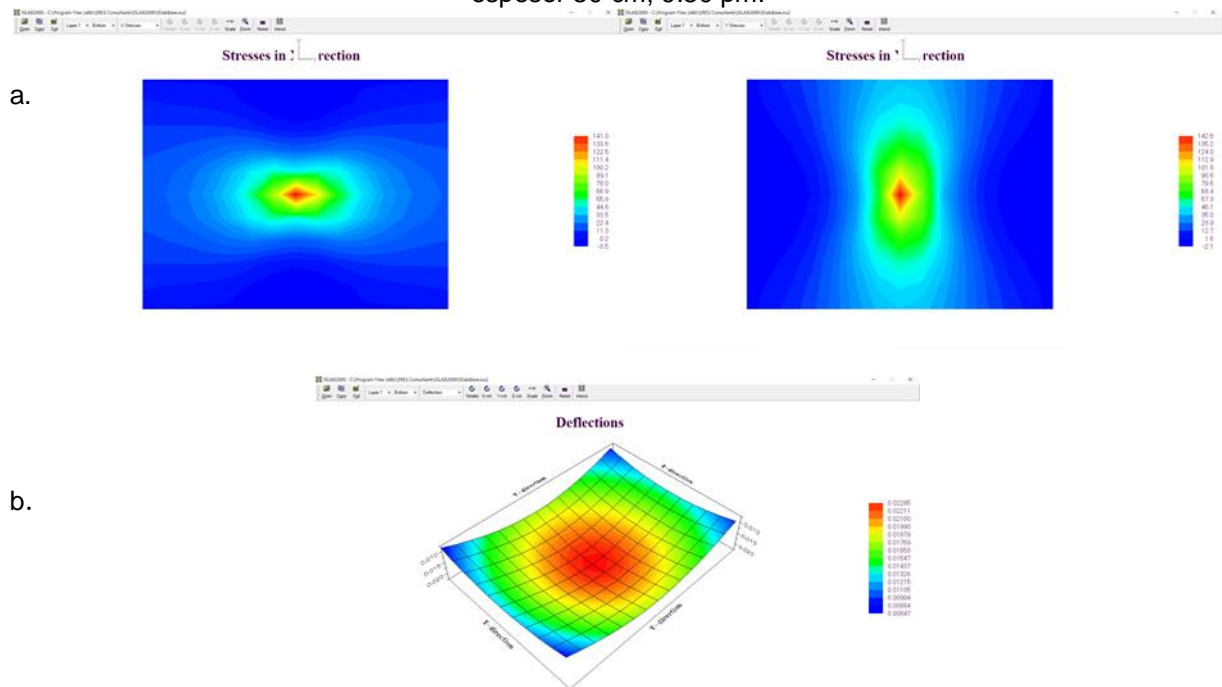
b.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

En la Figura 41, las Gráficas a) y b) se observa que el cambio tensional se presenta en el centro de la losa, y que el efecto punzante de la carga puntual, no está afectando el momento de inercia de la losa de 30 cm, en consecuencia, de esto, se tiene que lo de color en azul, muestra la menor área de la losa expuesta a la flexión en la condición de alabeo nocturno.

Figura 41. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 30 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

En la Tabla 31, se indica los resultados esperados de la evaluación de esfuerzos y deformación por gradiente térmico máximo positivo y negativo y carga puntual en el centro de la losa de 10 cm de espesor asociado a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 700 Lb/pulg³.

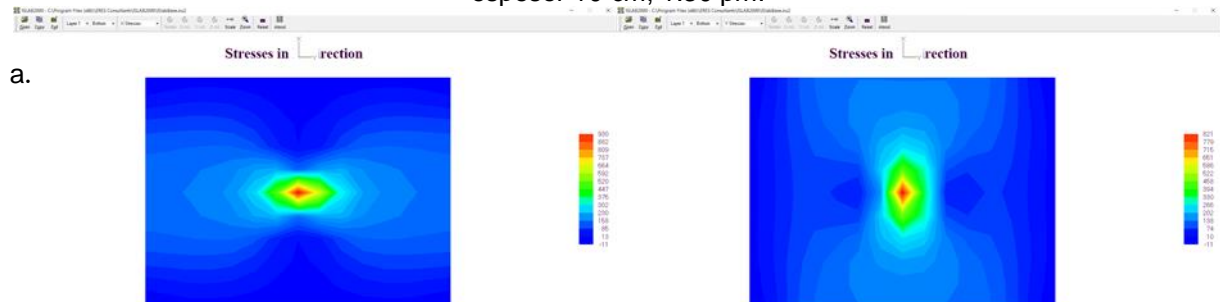
Tabla 31. Evaluación esfuerzo, deformación losa e= 10 cm módulo reacción k = 700 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 10 cm con Módulo de reacción K = 700 Lb/pulg ³ y P=13228 Lb | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|
| ESPESOR DE LOSA 10 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLESION MAXIMA |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA |
| | | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in |
| | PM | | | | | | |
| | 1:30 | 14.12 | | 930 | | 821 | 0.01311 |
| | 9:30 | -1.75 | 765 | | 661 | | 0.01333 |

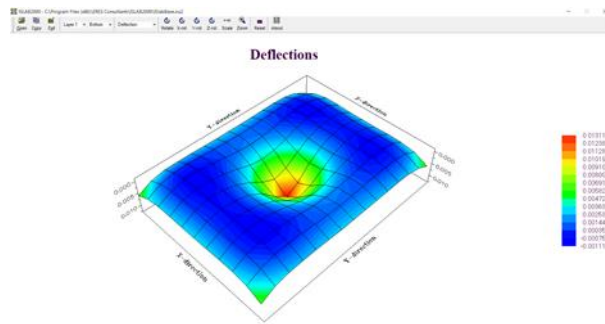
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 42, las gráficas a) y b) se observa los cambios tensionales en el centro de la losa cara inferior, los cuales reaccionan a la combinada de carga puntual y rigidez del suelo de soporte, de ahí que el círculo de color rojo representa el área en contacto de la sección de la carga puntual, debido a su efecto punzante en la losa, a diferencia de la condición de losa sin restricción, donde la losa forma la curvatura libremente, pero en consecuencia al efecto del gradiente térmico máximo positivo, el área residual en color azul mantiene su condición de tracción en las fibras superiores y de contracción en las fibras inferiores, así que, con base a los resultados de Tabla 31, la deflexión máxima se da en la cara inferior de la losa, pero en este caso se ha disminuido la deformación, ya que obedece al cambio de interfaz del espesor de losa, rigidez del suelo de soporte, y carga puntual, controlando de esta manera en gran parte los efectos del alabeo diurno respecto a la evaluación con un suelo de soporte de bajo módulo de reacción K.

Figura 42. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 10 cm, 1:30 pm.



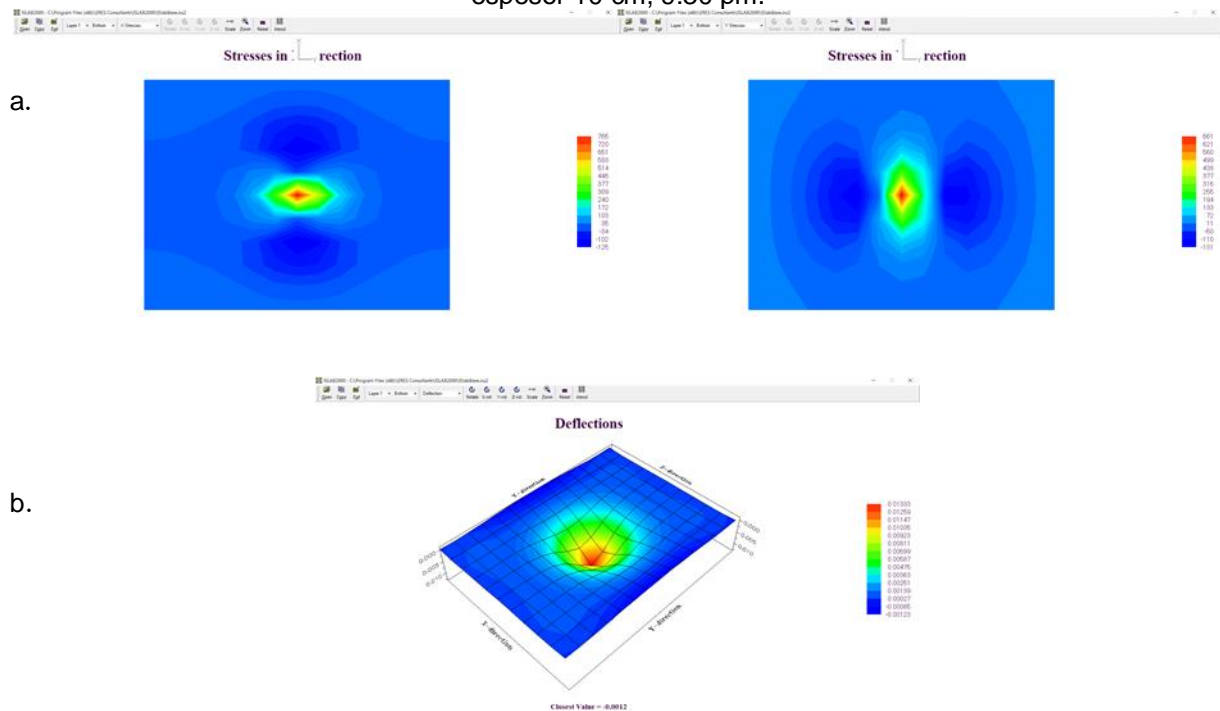
b.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Mientras que en la Figura 43, Gráficas a) y b) se observa que el cambio tensional en el centro de la losa, y el efecto punzante de la carga puntual, no está afectando el momento de inercia de la losa de 10 cm, en consecuencia, de esto, se tiene que a la flexión durante el alabeo nocturno es similar al diurno, por cuanto las deflexiones máximas para las dos condiciones equilibran la interfaz con un suelo de soporte de alto módulo de reacción K.

Figura 43. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 10 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

En la Tabla 32 se indica los resultados esperados de la evaluación de esfuerzos y deformación por gradiente térmico máximo positivo y negativo y carga puntual en el

centro de la losa de 30 cm de espesor asociado a un suelo de soporte con un módulo de reacción K de 700 Lb/pulg³.

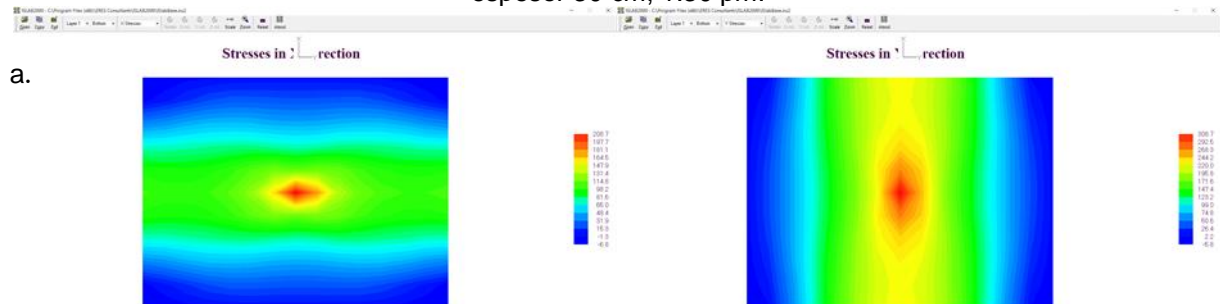
Tabla 32. Evaluación esfuerzo, deformación losa e= 30 cm módulo reacción k = 700 Lb/pulg³

| Evaluación de esfuerzos y deformación máximos losa e= 30 cm con Módulo de reacción K = 700 Lb/pulg ³ y P=13228 Lb | | | | | | | | |
|--|------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| ESPESOR DE LOSA 30 CM | HORA | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | TENSION TRANSVERSAL MAXIMA | | TENSION LONGITUDINAL MAXIMA | | DEFLEXION MAXIMA | DEFLEXION MAXIMA |
| | | | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA SUPERIOR | CARA INFERIOR | CARA INFERIOR DIA | CARA SUPERIOR NOCHE |
| | | °F | Psi | Psi | Psi | Psi | in | in |
| | PM | | | | | | | |
| | 1:30 | 42.38 | | 208.7 | | 308.7 | 0.0276 | |
| | 9:30 | -5.22 | 112.2 | | 90.2 | | | 0.00581 |

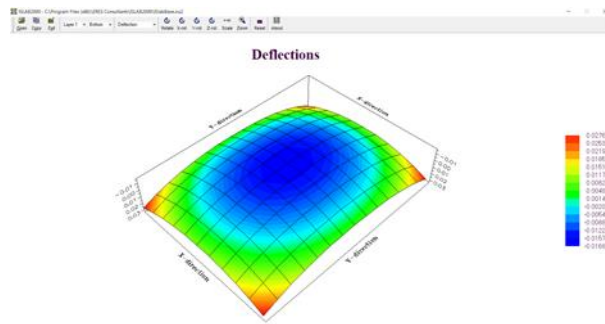
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 44. Gráficas a) y b) se observa los cambios tensionales en el centro de la losa cara inferior, los cuales reaccionan a la combinación de carga puntual y rigidez del suelo de soporte, de ahí que el círculo de color rojo representa el área en contacto de la sección de la carga puntual, debido a su efecto punzante en la losa, a diferencia de la condición de losa sin restricción, donde la losa forma la curvatura libremente, pero en consecuencia al efecto del gradiente térmico máximo positivo, el área residual en color azul mantiene su condición de tracción en las fibras superiores y de contracción en las fibras inferiores, así que, con base a los resultados de Tabla 32, confirma que, la deflexión máxima se da en la cara inferior de la losa, es decir, la relación espesor de losa, rigidez del suelo de soporte, y carga puntual, no alcanzan a controlar los efectos del alabeo diurno, por cuanto en la losa de 30cm, la condición física que gobierna es a ser más propensa a la flexión, situación que en realidad no se espera que sucediera, puesto que se cree que con un mayor espesor de losa será menor el efecto del fenómeno de alabeo sobre el pavimento rígido.

Figura 44. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesor 30 cm, 1:30 pm.



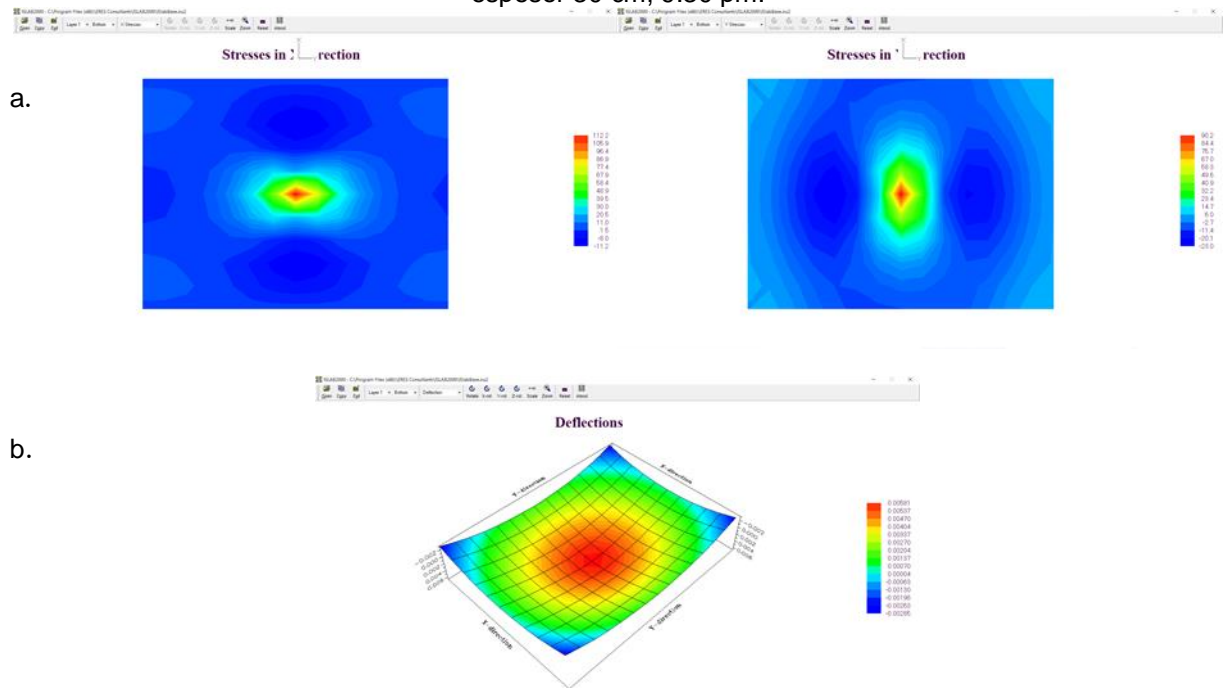
b.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

Mientras que en la Figura 45, Gráficas a) y b) se observa que el cambio tensional en el centro de la losa, y el efecto punzante de la carga puntual, está afectando el momento de inercia de la losa de 30 cm, en consecuencia, de esto, se tiene que a la flexión durante el alabeo nocturno se amplifica ocasionando la formación de voladizos que se observan de mayor magnitud que en la losa de 10 cm bajo las mismas condiciones de carga, temperatura y módulo de reacción K.

Figura 45. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesor 30 cm, 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. FASE 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ALTERNATIVA SELECCIONADA

Una vez realizado las evaluaciones para las condiciones de una losa sin restricciones y con restricciones, se obtuvo los resultados, que dieron respuesta a varios interrogantes en cuanto al comportamiento de la losa, en relación con el fenómeno del alabeo.

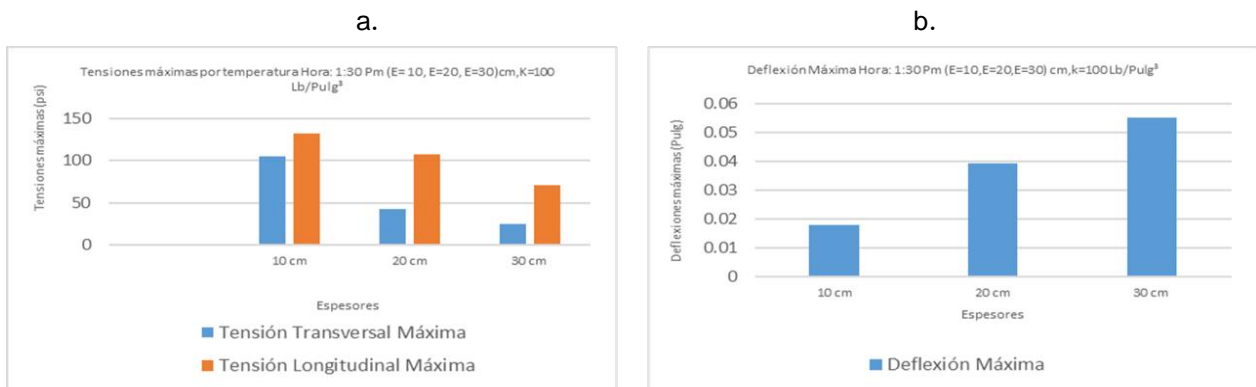
Los resultados describen, como aspectos como: el espesor de losa, la rigidez del suelo de soporte y el gradiente térmico positivo y negativo, son fundamentales para la reducción de los efectos del alabeo.

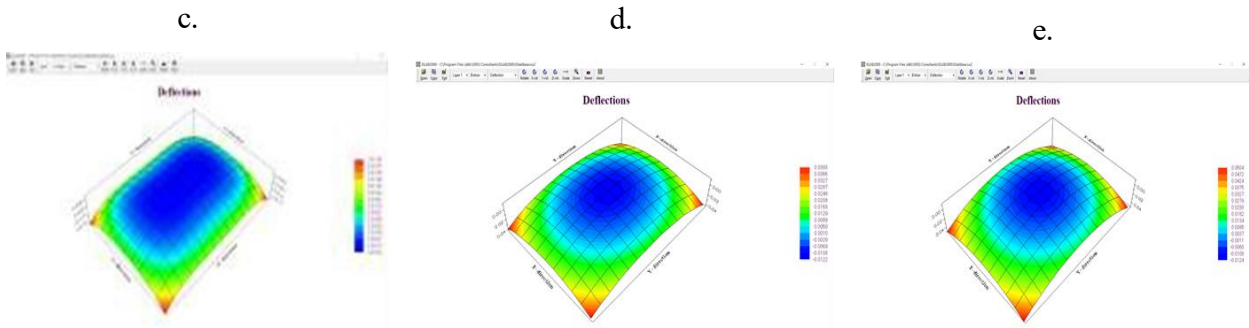
De ahí que, la respuesta de la losa al impacto de una carga puntual en su centro, indiquen un efecto punzante que se disipa al suelo de soporte en función del espesor de losa, es decir, se observa que la reducción del impacto de la carga en la losa obedece al control tensional del momento flector que se origina entre el suelo de soporte y la losa, condición que está dada por la resiliencia de los materiales en respuesta a los esfuerzos generados por el alabeo diurno y nocturno.

Uno de los resultados importantes, está vinculado con el comportamiento del producto de la combinación del suelo de soporte con un módulo de alta rigidez $k=700$, Lb/pulg³ y un espesor de losa de 10 cm, demostrando que es posible diseñar estructuras de pavimento rígido que generen un beneficio para mitigar los efectos del alabeo, como la formación de voladizos.

En la Figura 46, se observa como en las gráficas a) y b) se presenta la diferencia de respuesta al impacto del gradiente térmico máximo positivo, para los (3) tres espesores de losa analizados, en la condición de una losa sin restricciones.

Figura 46. Gráficas, a). tensiones máximas cara inferior losa. b). deflexión máxima cara inferior losa. espesores c) 10, d) 20 y e) 30 (cm), k: 100, Lb/pulg³, 1:30 pm.





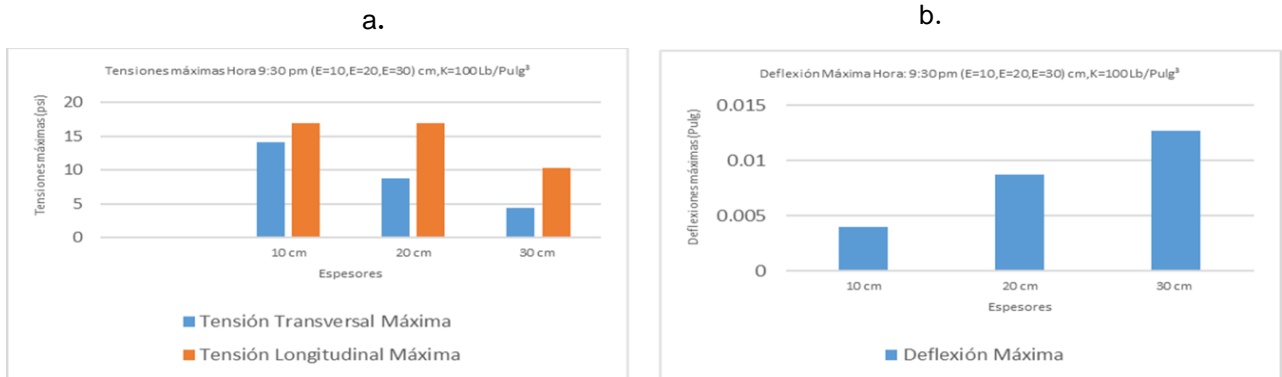
Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

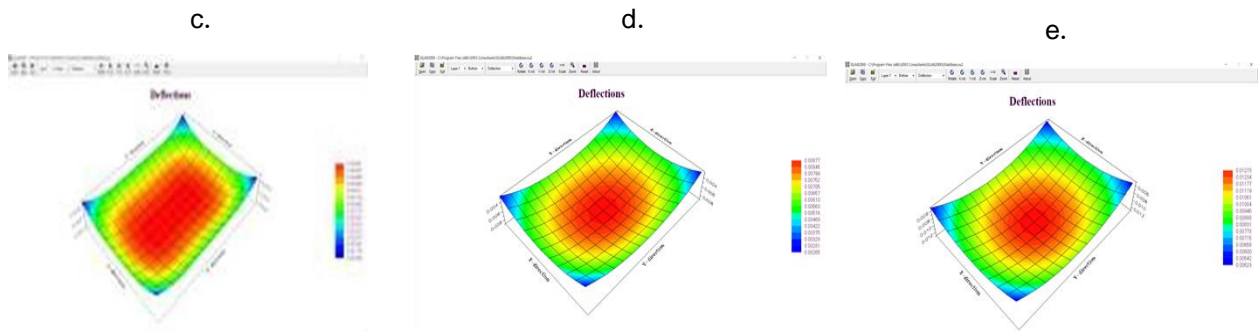
Son notable los efectos del alabeo diurno, cuando el suelo de soporte tiene un módulo de reacción K de 100 Lb/pulg^3 , es decir, de baja rigidez, lo cual amplifica la deformación de la losa, haciendo que experimenten grandes contracciones en las fibras inferiores y tracciones en las superiores.

Comparando cada espesor de losa c), d) y e), versus módulo de reacción K de 100 Lb/pulg^3 , en la condición de gradiente térmico máximo positivo, se observa que el espesor de 10 cm , experimenta tensiones longitudinales y transversales máximas, superiores a la losa de 20 cm , y muy por encima de la losa de 30 cm , sin embargo, la deflexión máxima para los (3) tres espesores de losa, se manifiesta con mayor intensidad en la losa de 30 cm , observando de esta manera en la Figura 46, c) que la deformación de la losa se homogeniza en gran parte de su longitud y ancho, lo cual permite físicamente que la losa de 10 cm disipe de mejor manera el cambio tensional entre la cara inferior y el suelo de soporte.

En la Figura 47, las gráficas a) y b) muestran la diferencia de respuesta al impacto del gradiente térmico máximo negativo, para los (3) tres espesores de losa analizados, en la condición de una losa sin restricciones.

Figura 47. Gráficas, a). tensiones máximas cara superior losa. b). deflexión máxima cara superior losa. espesores c) 10 , d) 20 y e) 30 (cm), k : $100, \text{ Lb/pulg}^3$, $9:30 \text{ pm}$.





Fuente: Elaboración propia con base a las salidas gráficas del software ISLAB2000, cedido por Pavement ME Design-Universidad de Illinois-Chad Becker-2020.

La grafica indica los efectos del alabeo nocturno, cuando el suelo de soporte tiene un módulo de reacción K de 100 Lb/pulg³, es decir, de baja rigidez, lo cual amplifica la deformación de la losa, haciendo que experimenten grandes contracciones en las fibras superiores y tracciones en las inferiores.

Comparando cada espesor de losa c), d) y e), versus módulo de reacción K de 100 Lb/pulg³, en la condición de gradiente térmico máximo negativo, se identifica que el espesor de 10 cm, experimenta tensiones longitudinales máximas, superior a la losa de 20 cm, y muy encima a la losa de 30 cm, no obstante, en relación con las tensiones transversales máximas la losa de 10 y 20 cm experimentan similar efecto tensional, sin embargo, la deflexión máxima para los (3) tres espesores de losa, se manifiesta con mayor intensidad en la losa de 30 cm, observando de esta manera en la Figura 47 c) que la deflexión es menor y por tanto, la losa homogeniza los esfuerzos transfiriéndolos al suelo de soporte, como se ve representado en el elipsoide de color rojo.

Habiendo ilustrado el comportamiento combinado de espesor de losa, junto con el módulo de reacción K y gradiente térmico máximo positivo y negativo. Pudo realizarse el análisis de las condiciones combinadas de espesores y módulos de reacción K de baja, mediana y alta rigidez, a fin de analizar los efectos del alabeo diurno y nocturno, estableciendo de este modo, cuál de las alternativas de combinación controlan de mejor manera los esfuerzos y deformaciones en la losa sin restricciones.

De esta manera, en la tabla 33, se indica los resultados obtenidos de la evaluación de esfuerzos y deformación por gradiente térmico máximo positivo y negativo para los espesores de losa de 10,20 y 30 cm, en relación a los módulos de reacción K de 100,220 y 700 Lb/pulg³. en la condición de una losa sin restricciones.

Tabla 33. Datos de resultados tensiones y deformación máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg³. a la 1:30 y 9:30 pm.

| Tensiones máximas y Deflexión Máxima de los los picos horarios de la 1:30 pm y 9: 30 pm respecto al gradiente térmico de temperatura presente durante el día y la noche vs la combinación de espesores (E=10,E=20,E=30) cm, y módulo de reacción del suelo de soporte (K =100,K=220,K=700) Lb/Pulg ³ | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|
| Espeor | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | |
| K= | 100 | 100 | 100 | 220 | 220 | 220 | 700 | 700 | 700 | |
| Gradiente positivo | Hora 1:30 Pm | | | | | | | | | |
| | Tensión transversal máxima | 105.20 | 43.00 | 24.39 | 122.50 | 63.60 | 32.88 | 140.30 | 101.60 | 58.60 |
| | Tensión longitudinal máxima | 131.70 | 107.20 | 70.50 | 140.90 | 136.00 | 96.10 | 146.80 | 175.90 | 119.90 |
| | Deflexión máxima | 0.01798 | 0.03990 | 0.0550 | 0.0115 | 0.0294 | 0.0387 | 0.0062 | 0.0195 | 0.0271 |
| Gradiente negativo | Hora 9:30 Pm | | | | | | | | | |
| | Tensión transversal máxima | 14.08 | 8.74 | 4.37 | 16.90 | 15.54 | 8.88 | 18.07 | 27.56 | 20.83 |
| | Tensión longitudinal máxima | 16.89 | 16.98 | 10.29 | 17.86 | 25.06 | 18.73 | 17.42 | 34.02 | 34.28 |
| | Deflexión máxima | 0.00396 | 0.00877 | 0.01273 | 0.00183 | 0.00448 | 0.0068 | 0.00062 | 0.0011 | 0.0029 |

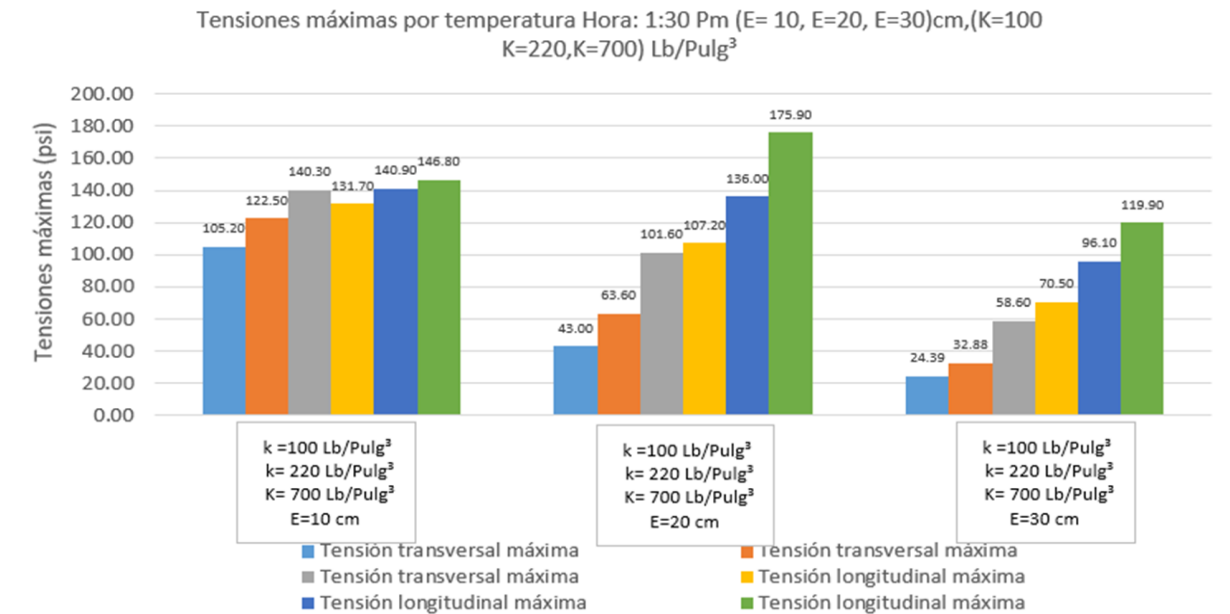
Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En forma general en la Tabla 33, se comparan los resultados de tensiones máximas y deflexión máxima, debido a los efectos del alabeo diurno y nocturno,

En la Figura 48, a), b) y c) se tiene los valores relacionados a las tensiones máximas de los distintos espesores de losa y módulos de reacción K, en condiciones de gradiente térmico máximo positivo, observando que la losa de 10 cm, tiene un mejor control tensional para los tres casos de módulos de reacción K, a diferencia de la losa de 20 cm, la cual tiende a presentar valores de máximas tensiones más elevados a medida que se aumenta la rigidez del suelo de soporte, de la misma manera se presenta para la losa de 30 cm, que a diferencia del espesor de losa que la precede, esta tiene un aumento en los valores de máxima tensión.

De lo anterior, cabe resaltar que, en la losa de 10cm, no se presentan cambios bruscos en los valores de tensiones máximas, respecto al aumento del módulo de reacción K, mientras que en los espesores de 20 y 30 cm, el aumento en el valor de tensiones máximas se incrementa significativamente cuando la rigidez del suelo de soporte es mayor, en ese sentido sí, se incrementa el espesor de la losa y la rigidez del suelo de soporte, se obtendrán valores de tensiones máximas más elevados, mientras que sí, mantiene un menor espesor de losa y se incrementa la rigidez del suelo de soporte, se lograra un mejor control del cambio tensional entre capas y por ende prever los efectos del alabeo diurno.

Figura 48. Datos de resultados tensiones máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg³. a la 1:30 pm.

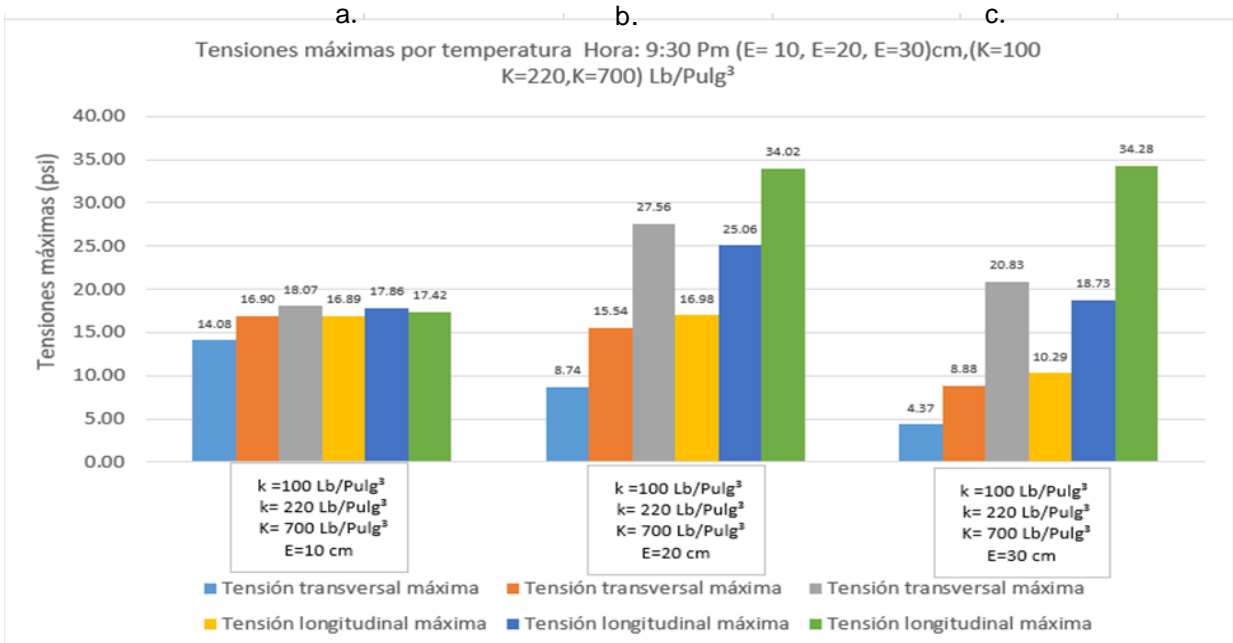


Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 49, a), b) y c) se tiene los valores relacionados a las tensiones máximas de los distintos espesores de losa y módulos de reacción K, en condiciones de gradiente térmico máximo negativo, observando que la losa de 10 cm, tiene un mejor control tensional para los tres casos de módulos de reacción K, a diferencia de la losa de 20 cm, la cual tiende a presentar incremento en los valores de máximas tensiones transversales con un módulo de reacción K intermedio, mientras que con módulo de reacción K alto, disminuye las máximas tensiones transversales, pero se ve incrementado el valor de las tensiones máximas longitudinales, de la misma manera se presenta para la losa de 30 cm, que a diferencia del espesor de losa que la precede, esta tiene una disminución en los valores de máxima tensión transversal ante un módulo de reacción K intermedio.

En consecuencia, cabe resaltar que, en la losa de 10cm, no se presentan cambios bruscos en los valores de tensiones máximas, respecto al aumento del módulo de reacción K, mientras que en los espesores de 20 y 30 cm, el aumento en el valor de tensiones máximas se incrementa significativamente cuando la rigidez del suelo de soporte es mayor, en ese sentido sí, se incrementa el espesor de la losa y la rigidez del suelo de soporte, se obtendrán valores de tensiones máximas más elevados, mientras que sí, mantiene un menor espesor de losa y se incrementa la rigidez del suelo de soporte, se lograra un mejor control del cambio tensional entre capas y por ende prever los efectos del alabeo nocturno que, de acuerdo a lo observado en la en la Figura 48 a) y Figura 49 a). las tensiones máximas por gradiente térmico negativo son menores a las ocasionadas por el gradiente térmico positivo, lo cual significa que, el diferencial de temperatura entre la superficie y fondo de la losa durante el día, maximizan los efectos del fenómeno del alabeo.

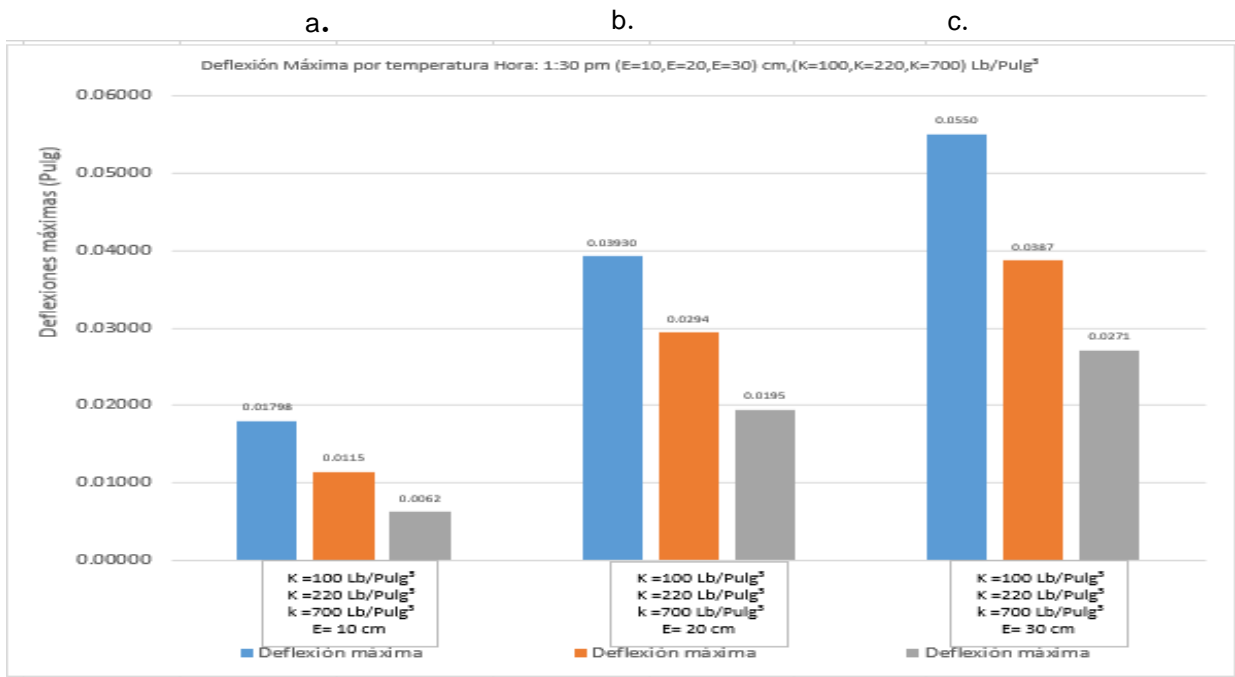
Figura 49. Datos de resultados tensiones máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg³. a las 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 50. Gráficas a), b) y c) referente a la deflexión máxima de la losa en los espesores de 10,20 y 30 cm, en condición de gradiente térmico máximo positivo y módulos de reacción K de 100, 220 y 700 Lb/pulg³, un primer aspecto que se observa para los (3) tres espesores de losa es que, la deflexión máxima cuando el módulo de reacción K del suelo de soporte es de baja rigidez, aumenta su empuje de abajo hacia arriba, y disminuye al incremento de la rigidez del suelo de soporte, sin embargo, la condición más favorable para el control de la deflexión máxima, se da, cuando la losa de 10 cm, se soporta en un suelo de módulo de reacción K alto, lo cual permite controlar la formación de fisuras de arriba hacia abajo en la zona central de la losa, para el otro caso de los espesores de 20 y 30 cm, se observa una tendencia de control a la deflexión máxima a medida que se rigidiza el suelo de soporte, pero aun así no alcanzan a reducir la deformación respecto a los resultados de deflexión máxima de la losa de 10 cm, y por el contrario su diferencia se mantiene a razón de 1:3 para la losa de 20 cm y de 1:5 respecto a la de 30 cm.

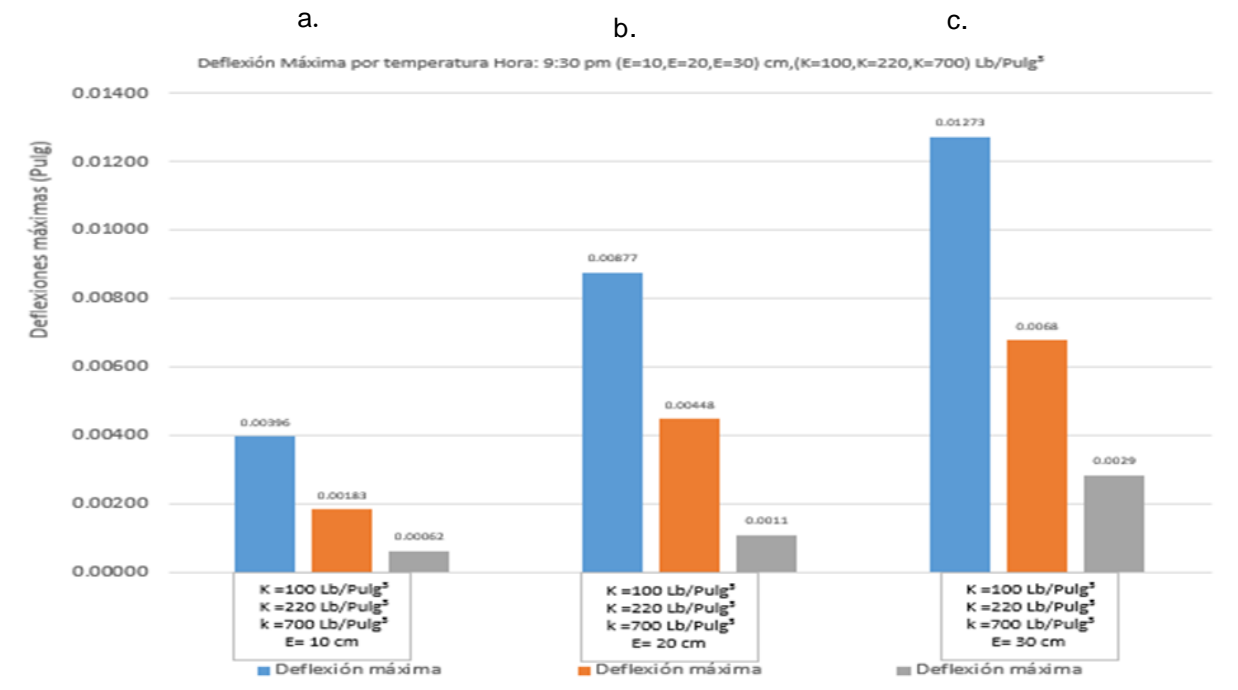
Figura 50. Datos de deformación máxima, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg³. a la 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 51. Gráficas a), b) y c) referente a la deflexión máxima de la losa en los espesores de 10,20 y 30 cm, en condición de gradiente térmico máximo negativo y módulos de reacción K de 100, 220 y 700 Lb/pulg³, un primer aspecto que se observa para los (3) tres espesores de losa es que, la deflexión máxima cuando el módulo de reacción K del suelo de soporte es de baja rigidez, aumenta considerablemente su deflexión máxima, y disminuye al incremento de la rigidez del suelo de soporte, sin embargo, la condición más favorable para el control de la deflexión máxima, se da, cuando la losa de 10 cm, se soporta en un suelo de módulo de reacción K alto, lo cual permite controlar la formación de voladizos en las zonas laterales y vértices de la losa, y por ende prevenir la formación de fisuras que se generan de abajo hacia arriba, puesto que a pesar de que en los espesores de 20 y 30 cm se observa una tendencia similar al comportamiento con alabeo diurno, no alcanzan a reducir la deformación, en consecuencia su proporcionalidad diferencial es similar al ocasionado por un gradiente térmico positivo.

Figura 51. Datos de deformación máxima, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100,220 y 700 Lb/pulg³. a la 1:30 pm.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Tabla 34, se indica los resultados obtenidos de la evaluación de esfuerzos y deformación por gradiente térmico máximo positivo y negativo para los espesores de losa de 10,20 y 30 cm, con relación a los módulos de reacción K de 100,220 y 700 Lb/pulg³. en la condición de una losa con restricciones.

Es decir, se tuvo en cuenta para su evaluación la carga puntual descrita en la fase 5, Tabla 28, de ahí que, luego de haber evaluado el comportamiento de la losa bajo la condición de una carga estática, la cual ejerce una oposición a la deformación de la losa, debido a los esfuerzos por temperatura, los cuales son ocasionados por los efectos de un alabeo diurno y nocturno, que del mismo modo a lo sucedido en la losa con restricciones se indica los valores máximos por cambios tensionales entre capas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, y la respuesta al menor y mayor momento de inercia respecto al espesor de losa. Se observa que la combinación de espesor de losa, módulo de reacción K del suelo de soporte, y carga puntual, obedecen a un comportamiento singular cuando la losa de 10 cm, se soporta en un suelo de módulo de reacción K de alta rigidez, en la condición de un alabeo nocturno.

Siendo similar al valor de la deflexión máxima diurno, mientras que, en la losa de 30 cm, se reduce drásticamente el valor de deflexión máxima respecto a un gradiente positivo,

de modo que, de estar predeterminado a la flexión en el día, en la noche el mayor momento de inercia debido a su espesor minimiza la deformación.

Tabla 34. Datos de resultados tensiones y deformación máximas, espesores losa 10,20 y 30 cm y módulos de reacción k 100 y 700 Lb/pulg³. más carga puntual p= 13228 libras, a la 1:30 y 9:30 pm.

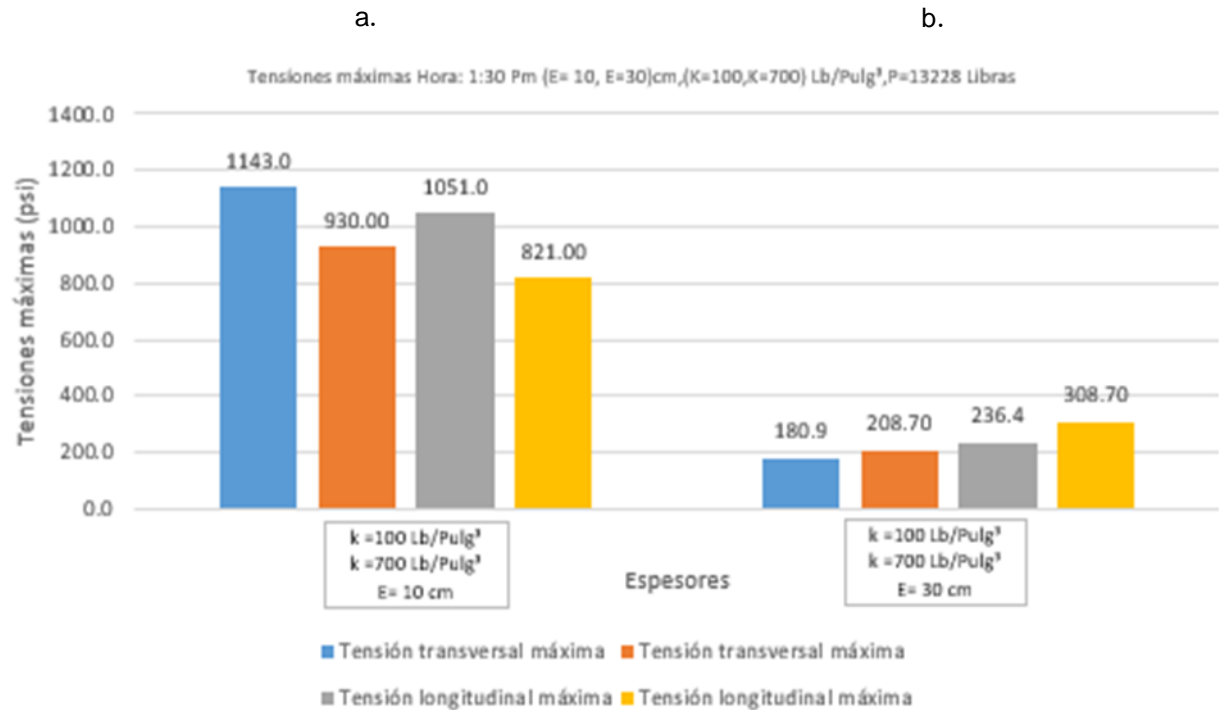
| Tensiones máximas y Deflexión Máxima de los picos horarios de la 1:30 pm y 9: 30 pm, respecto al gradiente térmico de temperatura presente durante el día y la noche, sumado a la carga puntual ubicada en el centro de la losa vs la combinación de espesores que representan los valores mínimos y máximos de los esfuerzos presentes en la losa (E=10,E=30) cm, y módulo de reacción del suelo de soporte (K =100,K=700) Lb/Pulg ³ | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Esesor | 10 | 30 | 10 | 30 |
| K= | 100 | 100 | 700 | 700 |
| Gradiente positivo | | | | |
| Hora 1:30 Pm | | | | |
| Tensión transversal máxima | 1143.0 | 180.9 | 930.00 | 208.70 |
| Tensión longitudinal máxima | 1051.0 | 236.4 | 821.00 | 308.70 |
| Deflexión máxima | 0.03631 | 0.05540 | 0.01311 | 0.02760 |
| Gradiente negativo | | | | |
| Hora 9:30 Pm | | | | |
| Tensión transversal máxima | 1047.00 | 141.00 | 765.00 | 112.20 |
| Tensión longitudinal máxima | 900.00 | 142.60 | 661.00 | 90.20 |
| Deflexión máxima | 0.04130 | 0.02285 | 0.01333 | 0.00581 |

Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 52. Gráficas a), y b) referente a las tensiones máximas de la losa en los espesores de 10 y 30 cm, en condición de gradiente térmico máximo positivo y módulos de reacción K de 100 y 700 Lb/pulg³ y carga puntual, un primer aspecto que se observa para los (2) dos espesores de losa es que, las tensiones máximas cuando el módulo de reacción K del suelo de soporte es de baja rigidez, la losa de 10 cm respecto a la losa de 30 cm, tiene una relación de los valores tensionales máximos de 6:1, y al aumentar la rigidez de suelo de soporte se reducen estos valores en una proporción de 4:1, siendo evidente la gran diferencia de absorción tensional debido a su espesor y cambio tensional entre capas.

Por otro parte, se observa que, en la losa de 30 cm, tiene más impacto en su estado tensional entre capas, cuando se incrementa la rigidez del suelo de soporte, es decir, que entre mayor sea la rigidez del suelo de soporte y espesor de losa, sometidos ambos a una carga puntual, será indiferente la resultante al efecto de punzamiento, como se observa en la Figura 44 b), sin embargo, es importante mirar en la gráfica que la losa se comporta físicamente como si estuviera en una condición sin restricciones, lo cual genera la duda para resolver en próximas investigaciones, de que las cargas dinámicas al ser cíclicas, podría afectar la losa de 30 cm, generando fisuras que se formarían de arriba hacia abajo de manera prematura.

Figura 52. Datos de tensiones máximas, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100 y 700 Lb/pulg³. más carga puntual p= 13228 Libras, a la 1:30 pm.

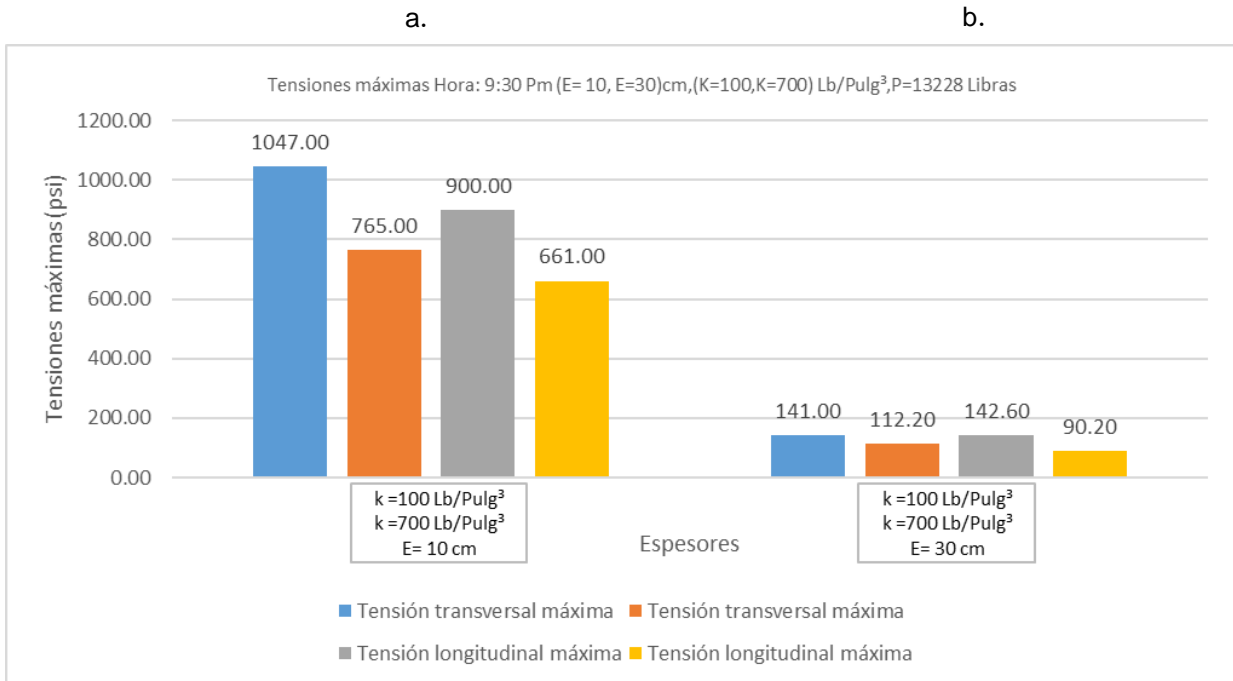


Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

En la Figura 5, gráficas a) y b) referente a las tensiones máximas de la losa en los espesores de 10 y 30 cm, en condición de gradiente térmico máximo negativo y módulos de reacción K de 100 y 700 Lb/pulg³ y carga puntual, un primer aspecto que se observa para los (2) dos espesores de losa es que, las tensiones máximas cuando el módulo de reacción K del suelo de soporte es de baja rigidez, la losa de 10 cm respecto a la losa de 30 cm, tiene una relación de los valores tensionales máximos de 5:1, y al aumentar la rigidez de suelo de soporte se reducen estos valores en una proporción de 3:1, siendo evidente la gran diferencia de absorción tensional debido a su espesor y cambio tensional entre capas.

También, se observa que, en la losa de 30 cm, tiene más impacto en su estado tensional entre capas, cuando se incrementa la rigidez del suelo de soporte, es decir, que entre mayor sea la rigidez del suelo de soporte y espesor de losa, sometidos ambos a una carga puntual, será indiferente la resultante al efecto de punzamiento, como se observa en la Figura 45 b), sin embargo, es importante mirar en la gráfica que la losa se comporta físicamente como si estuviera en una condición sin restricciones, lo cual genera la duda para resolver en próximas investigaciones, de que las cargas dinámicas al ser cíclicas, podría afectar la losa de 30 cm, generando fisuras que se formarían de abajo hacia arriba por la formación de voladizos en el sentido transversal y longitudinal.

Figura 53. Datos de tensiones máximas, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100 y 700 Lb/pulg³. más carga puntual p= 13228 Libras, a las 9:30 pm.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

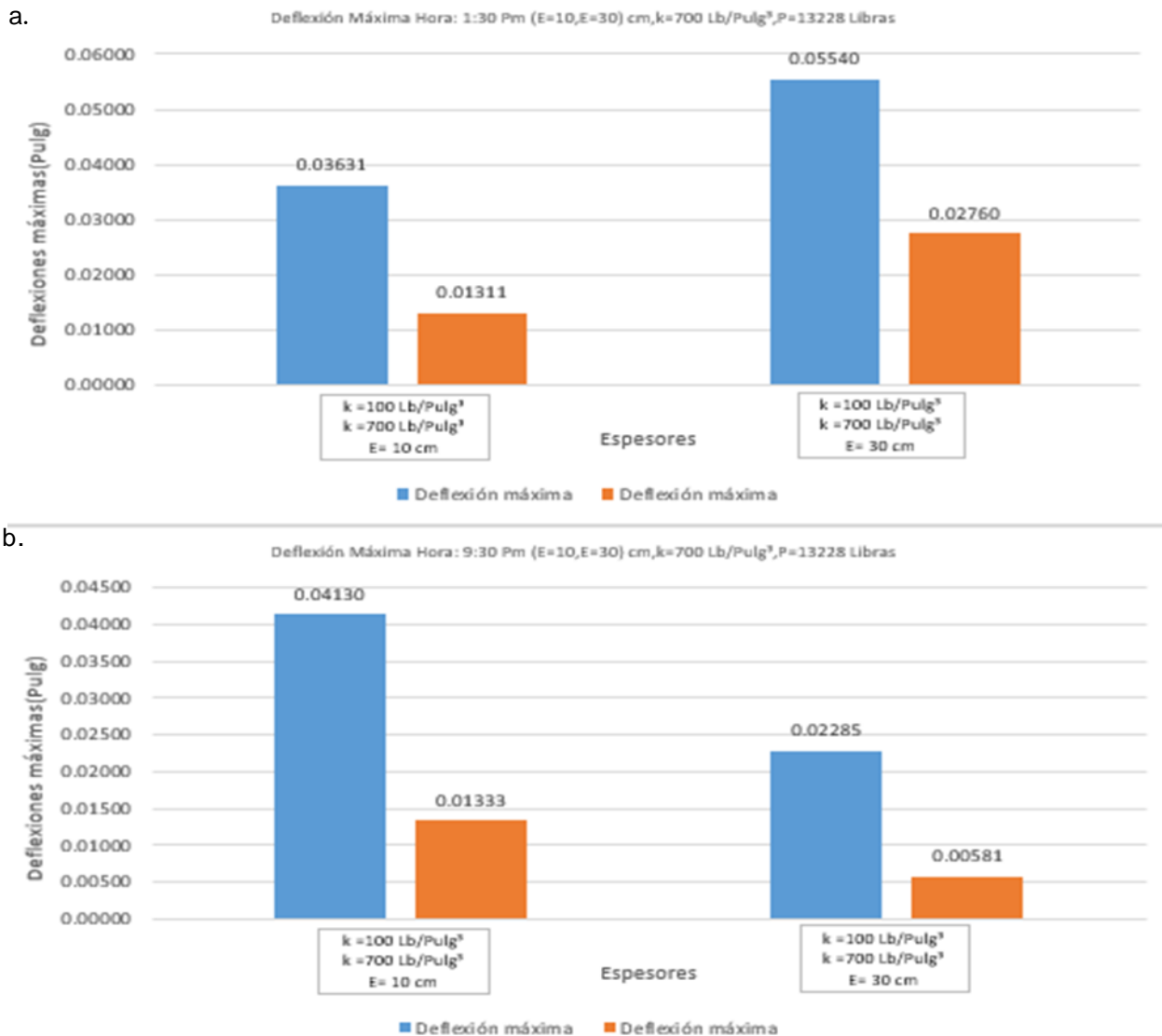
En la Figura 54, la gráficas a) referente a la deflexión máxima de la losa en los espesores de 10 y 30 cm, en condición de gradiente térmico máximo positivo y módulos de reacción K de 100 y 700 Lb/pulg³ y carga puntual, un primer aspecto que se observa para los (2) dos espesores de losa es que, la deflexión máxima cuando el módulo de reacción K del suelo de soporte es de baja rigidez, aumenta su empuje de abajo hacia arriba, y este disminuye al incremento de la rigidez del suelo de soporte, sin embargo, la condición más favorable para el control de la deflexión máxima, se da, cuando la losa de 10 cm, se soporta en un suelo de módulo de reacción K alto, lo cual permite controlar la formación de fisuras de arriba hacia abajo en la zona central de la losa, para el otro caso del espesor de 30 cm, se observa una tendencia de control a la deflexión máxima a medida que se rigidiza el suelo de soporte, pero aun así no alcanza a reducir la deformación máxima respecto a los resultados de deflexión máxima de la losa de 10 cm, y su diferencia se mantiene a razón de 1:3 , respecto a los valores de deflexión máxima.

Luego, en la gráfica b) se observa que los resultados obtenidos, y la respuesta al menor y mayor momento de inercia respecto al espesor de losa. la combinación de espesor de losa, módulo de reacción K del suelo de soporte, y carga puntual, obedecen a un comportamiento singular cuando la losa de 30 cm, se soporta en un suelo de módulo de reacción K de alta rigidez, en la condición de un alabeo nocturno.

Siendo que para este caso que, la deformación con relación a un gradiente positivo es menor, sin embargo, se es necesario tener en cuenta las cargas permanentes, puesto

que de acuerdo a lo observado en la Fase 5, Figura 45 b) se podría ver afectada la losa debido a la formación de voladizos laterales y vértices, generando de esta manera posibles fisuras que se formarían de abajo hacia arriba debido a esta condición,

Figura 54. Datos de deformación máxima, espesores losa 10 y 30 cm y módulos de reacción k 100 y 700 Lb/pulg³ y puntual p= 13228 Libras, a) 1:30 y b) 9:30 pm.

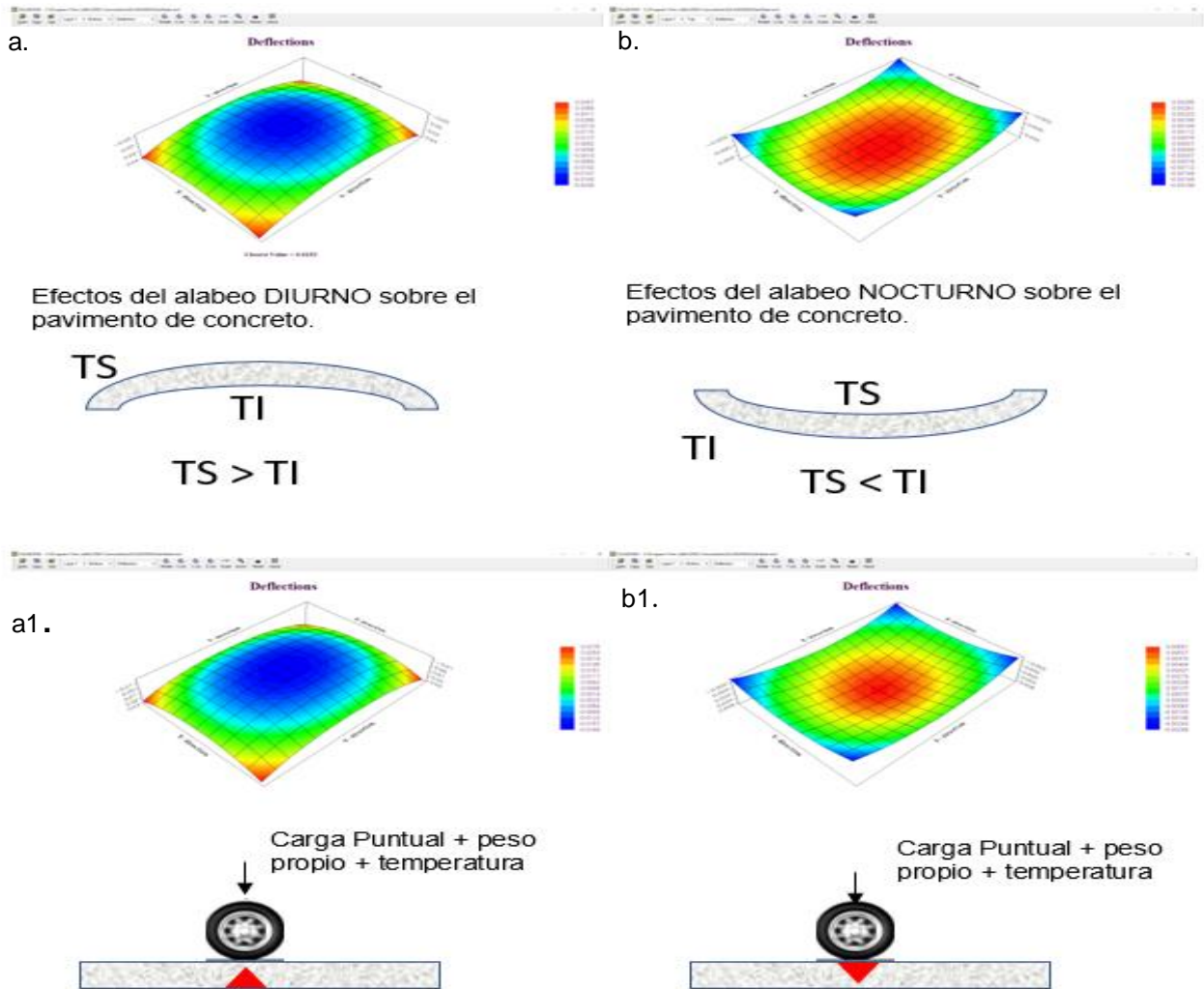


Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

De las razones expuestas en la Fase 4, 5 y 6 acerca de la evaluación, comportamiento y análisis, de los distintos espesores de losa con relación a los efectos de un alabeo diurno, nocturno, módulo de reacción K y carga puntual, se observa que la alternativa seleccionada corresponde una losa de 10 cm de espesor y un alto módulo de rigidez del suelo de soporte, considerando que a pesar que de que la losa de 30 cm, tiene mejores valores en la deflexión máxima, al final por su deformación y perdida de contacto con el

suelo de soporte esta propensa a presentar fisuras prematuras en la condición de losa sin restricciones y con restricciones, como se observa en la Figura 55. Gráficas a) efectos alabeo diurno sin restricciones, a1) efectos alabeo diurno con restricciones, b) efectos alabeo nocturno sin restricciones, b1) efectos alabeo nocturno con restricciones.

Figura 55. Graficas. a) losa sin restricción diurna, a1) losa con restricción diurna, b) losa sin restricción diurna, b1) losa con restricción nocturno. 30 cm de espesor.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

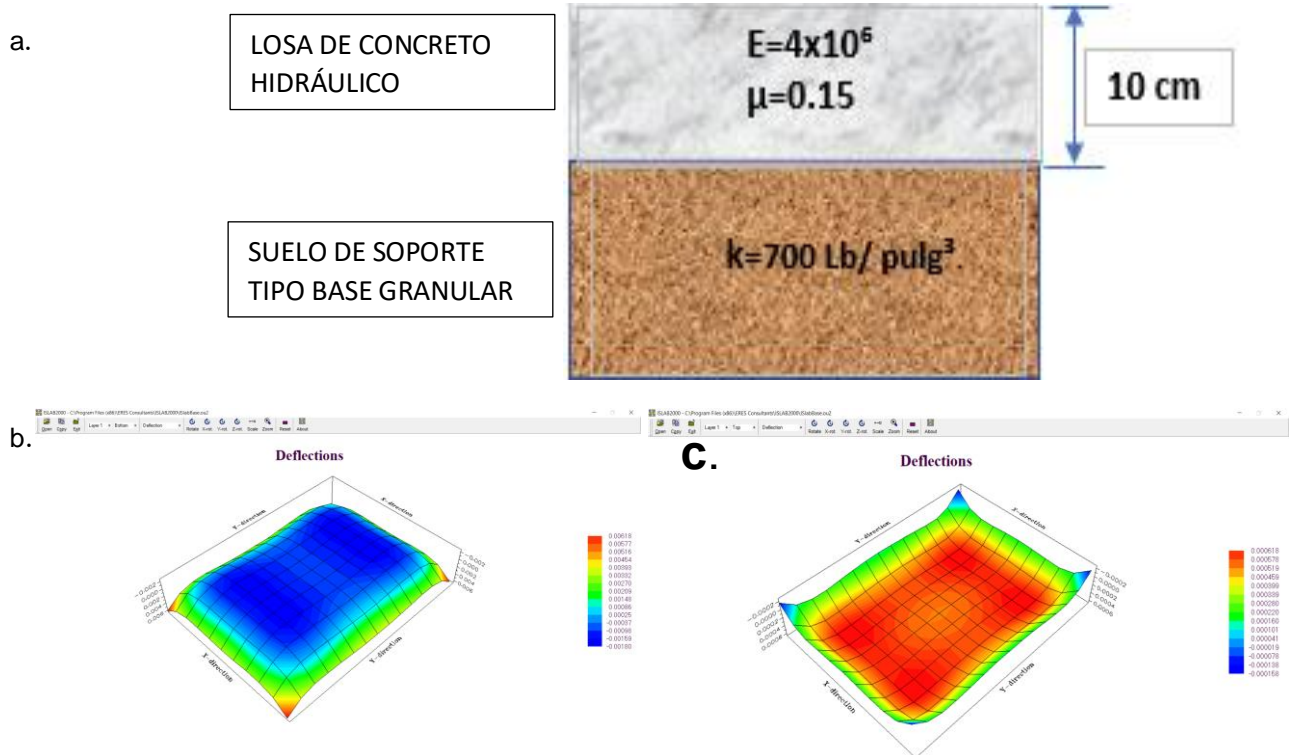
De esta manera, en la Figura 55 se concluye que la relación espesor de losa de 30 cm y módulo de reacción K de alta rigidez, no es la mejor alternativa para el control del alabeo diurno y nocturno.

8.1.1. Alternativa de losa de concreto hidráulico sin restricciones y suelo de soporte de módulo de reacción K de 700 Lb/pulg³.

El uso de bases granulares de alta rigidez y losa de 10 cm de espesor, en la estructura de pavimento rígido, según los resultados de esta investigación, reducen los efectos del alabeo diurno y nocturno. Esta estructura es concebida para vías urbanas.

En la Figura 56, se representa una propuesta de alternativa de pavimento rígido incluyendo dos capas, un suelo de soporte tipo base granular y una losa de 10 cm de espesor. El cual debe cumplir las propiedades de los materiales descritos en la Fase 3 y Tabla 13, por ende, con a la resistencia de esfuerzos, deformaciones, y punzamiento, de igual manera debe realizarse modelaciones particulares para cada sitio en estudio.

Figura 56. Graficas. a) alternativa de losa sin restricciones, b) deflexión máxima diurna, c) deflexión máxima nocturna.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

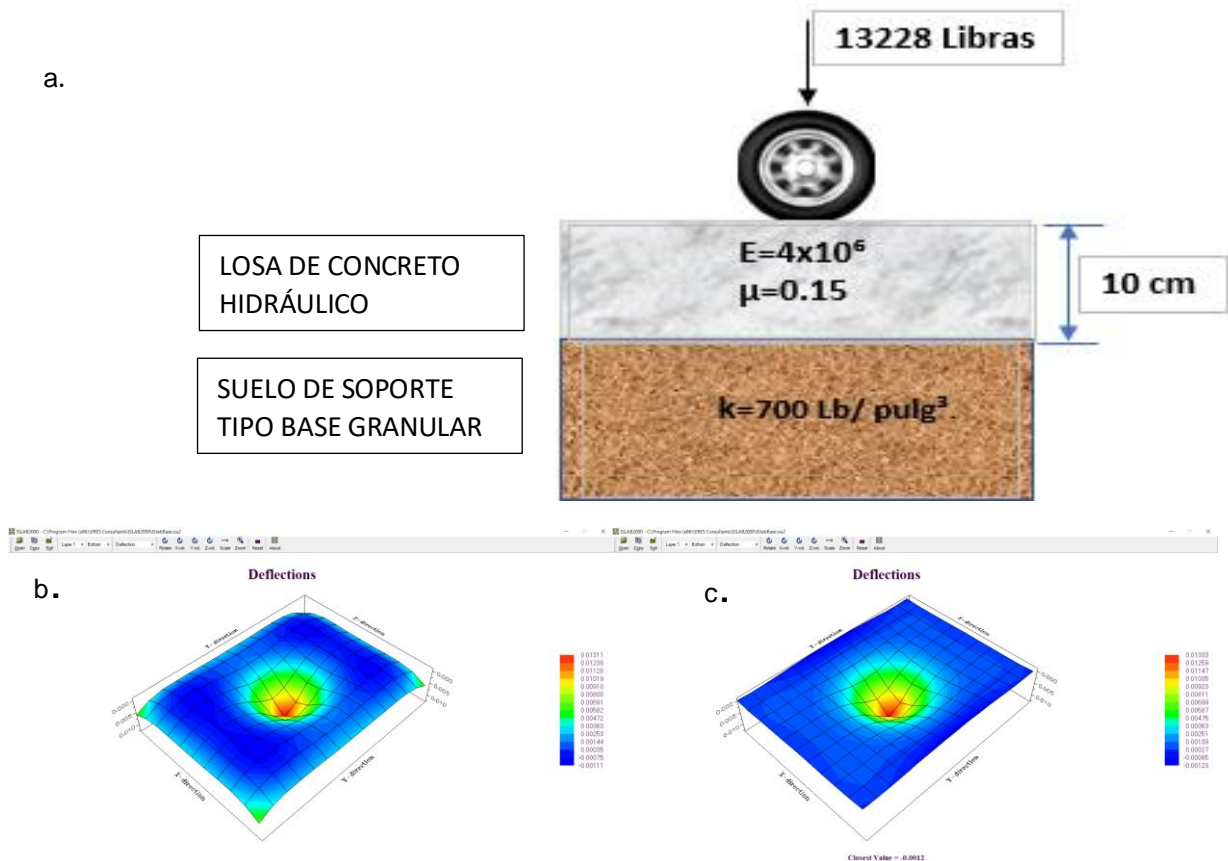
8.1.2. Alternativa de losa de concreto hidráulico con restricción y suelo de soporte de módulo de reacción K de 700 Lb/pulg³, más carga puntual de 13228 Libras.

Al sumar una carga puntual, es posible reconocer que, la losa respecto a la anterior alternativa estaría con restricción, por lo cual el uso de las bases granulares de alta rigidez

y losas de 10 cm, son capaces de reducir los efectos del alabeo diurno y nocturno, puesto que, le permite a la estructura del pavimento rígido adecuarse a unas condiciones específicas como las que se presentaron en esta investigación. En consecuencia, este tipo de estructuras viales pueden concebirse como alternativas viables para las zonas urbanas con flujos vehiculares livianos y de manera esporádica con la circulación de vehículos tipo C2G, C3 y C4, pues su configuración geométrica no permite el acceso a vehículos de carga pesada como un C5 o C6.

En la Figura 57, se realiza una representación de una propuesta de alternativa de pavimento rígido en la que se incluyen dos capas, un suelo de soporte tipo base granular y una losa de 10 cm de espesor, los cuales deben cumplir a cabalidad con las propiedades de los materiales descritos en la fase 3 y tabla 13, los cuales se relacionan con la resistencia de esfuerzo, de formación y pulsa miento, no obstante, modo, es importante la realización de modelaciones particulares para cada sitio de estudio.

Figura 57. Graficas. a) alternativa de losa con restricción, b) deflexión máxima diurna, c) deflexión máxima nocturna.



Fuente: Elaboración propia, con información de los resultados obtenidos en el software ISLAB2000

9. CONCLUSIONES

Gracias a los resultados emergentes de la presente investigación, puede concluirse que el comportamiento de la losa en relación con el esfuerzo y la deformación que ocurre como respuesta a la combinación de capas, contribuye a definir las características que debe tenerse en cuenta para el mejoramiento de las alternativas del pavimento rígido, el cual debe diseñarse y crearse en correspondencia con las necesidades y demandas de cada una de las zonas en las que se desea implementar proyectos de infraestructura vial. En ese sentido, los hallazgos que se presentan en las diferentes gráficas del documento, muestran como los efectos del alabeo diurno y nocturno, se relacionan con el tipo de espesor de la losa, así como, con el módulo de reacción K y la carga puntual, pues estos factores juegan un papel determinante en la reducción de tensiones y deformaciones máximas tanto para la condición de la losa sin restricción o con restricción.

Por otra parte, las comparaciones de los espesores combinados con otros módulos de reacción K del suelo de soporte, permite observar la capacidad de absorción de los efectos del alabeo diurno y nocturno, evidenciando que, es posible reducir el impacto de dichos efectos en las vías urbanas, a partir de la combinación de materiales que contemplen las exigencias de la zona, en ese sentido, puede controlarse en la formación de voladizos en áreas laterales y vértices de la losa.

De acuerdo con el análisis comparativo de tensiones y de deformaciones máximas que se obtuvieron a partir de las evaluaciones del método numérico de elementos finitos computacionales, pudo observarse una relación directa entre el espesor de la losa, la rigidez del suelo de soporte y los gradientes máximos positivos y negativos, los cuales posibilitaron continuar con las tomas de información de campo, la temperatura de la superficie de una losa, ya que este tipo de procedimientos se constituyen en una base para la definición del gradiente térmico máximo positivo y negativo en cualquier ciudad en la que se pretenda implementar proyectos con pavimento rígido.

Otra de las otro de los aportes que pueden conceptualizar con la ejecución de esta investigación, está relacionado con reconocer como las losas de bajo espesor, tienen un gradiente térmico positivo y negativo máximo menor que las cosas con un mayor espesor, esto debido a que entre menos diferencia exista en la profundidad de la cara superior e inferior de la losa, más parecida es su temperatura, por tanto, el diferencial de temperatura es menor; mientras que, a mayor profundidad de la cara inferior, ésta se aísla térmicamente, dado que, va aumentando el espesor de la losa y el aislamiento térmico que aporta el suelo de soporte, conlleva un aumento en el diferencial térmico de la superficie y el fondo de la losa.

En este orden de ideas, puede encontrarse una aplicación práctica de la presente investigación, en la posibilidad de determinar por medio de la evaluación de esfuerzo y de deformación, las secciones transversales y longitudinales máximas, así como, la deformación máxima de una vía local como la que se identificó en la ciudad de Bogotá,

con estos resultados, puede contribuirse a mejorar los procesos de monitoreo de los pavimentos existentes, además de conocer los efectos actuales que ocasiona el alabeo diurno y nocturno en estas infraestructuras de tránsito vehicular.

Finalmente, una de las contribuciones importantes de este trabajo, está relacionada con la posibilidad de reducir los efectos del gradiente térmico máximo positivo y negativo en los suelos de soporte de alta rigidez con espesor de losa de 10 cm, pues la combinación y conformación de estos elementos, pueden ayudar a controlar los cambios tensionales entre capas, por lo cual, el peso propio de la losa no de forma al suelo que la soporta y ayuda a disipar los esfuerzos en gran parte de la misma, al distribuir y transmitir las cargas a la base granular, ejerciendo así, un control adecuado de la formación de voladizo, al permitir que la inercia de la losa no tenga mayor influencia en el momento flector que ocasiona la deflexión máxima. De este modo, puede definirse que cuando la losa se somete a cargas puntuales y el alabeo diurno tenga las propiedades físicas de poder equilibrar los esfuerzos por contracción de las fibras inferiores y los de tracción de las fibras superiores. De igual manera, puede señalarse que ante un alabeo nocturno es posible equilibrar las contracciones de las fibras superiores y la atracción de las fibras inferiores, teniendo en cuenta las condiciones expuestas al efecto punzante de la carga puntual.

10. RECOMENDACIONES

Desde las recomendaciones que pueden efectuarse con los hallazgos emergentes de esta investigación, está en poder reconocer que desde el análisis realizado a partir de la combinación de espesores de la losa con los módulos de reacción K del suelo de soporte, es posible definir que en los casos en los que exista una combinación de losas de 10 cm de espesor, el módulo de reacción K del suelo de soporte de alta rigidez, esto conlleva una reducción significativa de los efectos del alabeo diurno y nocturno, dado que, permite una oportunidad de trabajar y diseñar estructuras de pavimento rígido con las características de las vías locales como las que se encuentran en la ciudad de Bogotá. De este modo, es aconsejable que la organización de estos proyectos viales, se fundamenten en una profundización de estudios enfocados en aspectos como los suelos de soporte y su aporte a las propiedades de alto módulo, pues estos permite ser utilizados como suelos de alta rigidez, que en conjunto con el espesor de la losa analizada, permite actuar de tal manera que existe una mayor disipación de los esfuerzos por temperatura, al transmitir de la losa al suelo que la soporta esa carga vehicular cíclica de manera uniforme.

Es importante considerar que la toma de temperatura de los materiales con termómetro infrarrojo, ofrecieron lecturas reales en la superficie y fondo de la losa, lo cual permitió poner en cuestionamiento la utilización del modelo AASHTO en Colombia, el cual se emplea para el cálculo del diferencial de temperatura máximo positivo y negativo, esto puede confrontarse pues este modelo toma como referencia un rango unitario de valores de temperatura y un espesor definido de la losa en función del total de la misma; por tanto, la calibración de estos valores se fundamentan en condiciones térmicas existentes en Estados Unidos, las cuales no pueden relacionarse de forma directa con las que se presentan dentro del contexto colombiano. Por lo tanto, la interpretación de la información suministrada por el modelo AASHTO, puede distorsionarse, al ofrecer una información imprecisa de acuerdo con lo descrito en la fase 2 de esta investigación y la cual se corrobora en la tabla 12. Puesto que, a realizar los respectivos ejercicios de corroboración, los valores indicados respecto al gradiente térmico positivo y negativo, difieren de los cálculos obtenidos con el método AASHTO, lo cual puede conducir a errores de interpretación de los datos obtenidos.

Entre otras de las recomendaciones que pueden darse con los resultados de este estudio, está en reconocer la relevancia e importancia de llevar a cabo procesos de análisis acerca de las variables de gradiente térmico de acuerdo con las temperaturas que se presentan en cada una de las regiones del contexto colombiano.

Asimismo, es importante que los procesos de estudio para la implementación de proyectos viales, evalúen in situ, dado que, esta información posibilita diseñar y construir losas de pavimento rígido sin restricción, sin pasadores de transferencia de carga ni anclajes laterales, lo cual acoge en el rango de horarios establecidos en el trabajo de investigación. Por tanto, es imprescindible que la toma de temperatura de la cara superior e inferior de la losa, se lleve a cabo con el empleo de un termómetro infrarrojo de

materiales, pues la información suministrada por esta herramienta, contribuye a calibrar el método LDUST21, así como, observar el comportamiento de la losa en condiciones de un alabeo por construcción diurna y nocturna; es decir, a las 24 horas de haber culminado la construcción de cada losa, deben llevarse a cabo la medición de su/mediante una cinta métrica flexible, esto con el fin de encontrar en el campo, la deflexión máxima y luego proceder a compararla con los resultados obtenidos en el software de elementos finitos. De este modo, la información suministrada permitirá verificar que la evaluación computacional de esfuerzos y deformaciones, están acordes a los comportamientos reales de la losa, previo a su puesta en servicio vehicular, de este modo, se ha comprobado que los elementos teóricos propuestos, son totalmente fieles cuando se trata de evaluar una losa construida en un período determinado de años, pues éstas han sufrido deterioro debido a los efectos de la temperatura y el tránsito de miles o millones de ejes.

Tras los hallazgos relacionados en esta investigación, es plausible reconocer la necesidad de avanzar en el estudio del comportamiento del pavimento rígido, en aras de alcanzar mejores diseños de estructuras que se adecúen a las exigencias del contexto en el que se desee implementar un determinado proyecto vial, de ahí que exista la necesidad de conocer los gradientes máximos positivos y negativos del lugar, en el que se desea llevar a cabo esta construcción con pavimento rígido.

Por otra parte, el diseño del pavimento rígido, hoy en día representa un gran desafío en el campo de la ingeniería de carreteras, dado que este tipo de estudios debe aportar a la consolidación de soluciones viales de bajo tránsito a partir de nuevas alternativas que contengan cualidades singulares, que beneficien a los sectores urbanos, las cuales hoy en día, al interior del contexto nacional, carecen de un mantenimiento oportuno, lo cual puede asociarse con la falta de recursos en estos sectores, pues en la mayoría de los casos los recursos están dispuestos a la malla vial principal.

Es importante considerar que, desde los procesos desencadenados en la ingeniería de vías urbanas, deben proponerse métodos que reduzcan los efectos del alabeo diurno y nocturno en pavimentos rígidos, los cuales se fundamenten en estudios detallados de los distintos diferenciales de temperatura de cada una de las ciudades del país. Sin embargo, esto sólo es una parte de la búsqueda de alternativas a solucionar las problemáticas de infraestructura vial, ya que, en el país existe un alto desconocimiento de la información real de los sitios en los que se pretende implementar un proyecto de infraestructura vial. Es decir, que en el momento actual no se cuenta con una información primaria en la que se establezcan aspectos como la temperatura, el tránsito, los materiales de construcción y las características de los suelos de soporte; por lo cual, se hace indispensable visualizar cambios en la aplicabilidad de los manuales del diseño del INVIAS e IDU, acudiendo de forma permanente a la información de primer nivel para poder planear un diseño del pavimento rígido que se adecúen a las exigencias del terreno.

Una de las recomendaciones finales frente a los resultados de esta investigación, está en que hoy en día se requiere definir una matriz informativa de gradientes térmicos de acuerdo con las particularidades de los suelos que tiene el país, esto con el fin de

incorporar un documento que le sirva de apoyo a las diferentes entidades del Estado para generar diseños que puedan actuar acorde atendiendo favorablemente a las afectaciones del pavimento por alabeo diurno y nocturno.

11. REFERENCIAS

- 10387-resolucion-4100-del-28-de-diciembre-de-2004 @ www.invias.gov.co. (n.d.).
<https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/resoluciones-circulares-otros/10387-resolucion-4100-del-28-de-diciembre-de-2004>
- AASHTO. (2003). *Diseño de Pavimentos - AASHTO 93. AASHTO Design Procedures For New Pavements*.
https://www.academia.edu/34103801/DISENO_DE_PAVIMENTO_METODO_AASHTO_93_ESPANOL_1_
- Akin, M. (2020). *PAVEMENT SURFACE TREATMENTS FOR ICE-PRONE LOCATIONS IN THE* Prepared By. 18.
- Ballou, D., Welner, K., Mathis, W., & Gunn, E. (2012). *REVIEW OF THE LONG - TERM* Reviewed By. 11, 179–196.
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2014). *FLEXURAL CAPACITY OF RIGID PAVEMENT CONCRETE SLABS WITH* Prepared By. 13.
- By, P., Roesler, J., Montemayor, R., Desantis, J., & Gupta, P. (2021). *Evaluation of Premature Cracking in Urban Concrete Pavement* (Issue 21).
- especificaciones-tecnicas-generales-de-materiales* @ www.idu.gov.co. (n.d.).
<https://www.idu.gov.co/page/especificaciones-tecnicas-generales-de-materiales>
- Galasova, K. (2000). *USER ' S GUIDE " ISLAB2000 — Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements ."* 61820(217).
- González, J. (2012). Ante los retos del concreto permeable. *Imcyc*, 4.
- Hansen, S., & Nieboer, E. (2015). *Supplementary info Hansen 2011. January*.
- Imad L. Al-Qadi. (2020). *Impact of new-generation wide-base tires on pavement structure and fuel consumption* (Issue 20).
- INVIAS. (2013). *4570-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras* @ www.invias.gov.co. (n.d.). <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/4570-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras>
- Issa, M. A. (2017). *Effect of Early-Age Concrete Elastic Properties on Fatigue Damage in Pcc Pavements Containing Fibers*. 17.
- Louiza, H., Zérroual, A., & Djamel, H. (2015). Impact of the Transport on the Urban Heat Island. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(3), 252–263.
[https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(3\).03](https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(3).03)

- Mccullough, B. F., & Rasmussen, R. O. (1999). *Fast Track Paving: Concrete Temperature Control and Traffic Opening criteria for Bonded Concrete Overlays*. 7(2), 1–204. <https://www.thetranstecgroup.com/wp-content/uploads/2020/11/FHWA-RD-98-167.pdf>
- Nociones_estructuras_pavimentos.pdf*. (n.d.).
- Popovics, J. S., Roesset, J. M., Peterson, C., Salas, A., & Ham, S. (2013). *High Plastic Concrete Temperature Specifications for Paving Mixtures*. 11, 112. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/45831/FHWA-ICT-11-087.pdf?sequence%3D2>
- Ruiz, J. M., Rasmussen, R. O., Chang, G. K., Dick, J. C., Nelson, P. K., Schindler, A. K., Turner, D. J., & Wilde, W. J. (2005). *Type of Report and Period Covered Final Report Computer-Based Guidelines for Concrete Pavements*.
- Stiegel, G. J., & Swanson, M. (2006). *A DVANCED H IGH T EMPERATURE , H IGH -P RESSURE Description*. 11, 2008–2011.
- Tran, Q., & Roesler, J. R. (2022). Rapid detection of concrete joint activation using normalized shear wave transmission energy. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 1025–1037. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1785448>
- Transporte, E. M. De. (2003). *de 1993*, 769. <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/resoluciones-circulares-otros/10387-resolucion-4100-del-28-de-diciembre-de-2004/file>
- Una evaluación mecanicista preliminar de las secciones transversales de PCC Uso de ISLAB2000 – Un estudio paramétrico*. (n.d.).
- Xiang-Dong-Liu-72293926 @ www.researchgate.net*. (n.d.). <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Xiang-Dong-Liu-72293926>
- Zhou, Q., Okte, E., Sen, S., Ozer, H., Al-qadi, I. L., Roesler, J. R., & Chatti, K. (2019). *Development of a Life-Cycle Assessment Tool for Pavement Preservation and Maintenance*. 1, 101. <https://apps.ict.illinois.edu/projects/getfile.asp?id=8865>

12. ANEXOS

12.1. ANEXO 1. TOMA TEMPERATURA DE LOSA DE 20 CM DE ESPESOR, 11:30 AM, 3:30 PM, 5:30 PM, 7:30 PM, 11:30 PM, Y 1:30 AM.

8.0 Cambio de baterías

Cuando la batería esté baja, se indicará el símbolo . En ese instante, debe cambiar la antigua batería por una nueva. Saque la tapa de la batería y cámbiela por una nueva de 9 V^{max}.

9.0 Parámetros técnicos

| | Termómetro PM6530A |
|------------------------|--|
| LCD | Color LCD |
| D:S | 12:1 |
| EMISIVIDAD | 0.10 a 1.00 |
| RESPUESTA DEL ESPECTRO | 8 um a 14 um |
| LÁSER | < 1 mW / 630 nm a 670 nm clase 2 |
| TIEMPO DE RESPUESTA | <0.5 s |
| APAGADO AUTOMÁTICO | Alrededor de 20 segundos |
| Tº DE FUNCIONAMIENTO | 0 °C a 40 °C |
| Tº DE ALMACENAMIENTO | -10 °C a 60 °C |
| FUENTE DE PODER | 9 V ^{max} 6F22 BATERÍA |
| RANGO DE MEDICIÓN | -50 °C a 300 °C (-58 °F a 572 °F) |
| PRECISIÓN | -50 °C a 0 °C ± 3 °C 0 °C a 300 °C ± (1.5 % lectura + 2 °C) |

PORTUGUÊS

1.0 Informações de segurança

Leia atentamente o Manual de Operação antes de usar o instrumento. Não limpe o instrumento de medição de temperatura com nenhum solvente.

Símbolos de segurança

Avisos importantes contra riscos

Em conformidade com a directiva europeia de segurança CE

Este instrumento está em conformidade com as normas abaixo: EN61326-1 e EN60825-1

2.0 Avisos importantes

Quando o ambiente de trabalho sofre uma mudança súbita, o medidor de medição de temperatura deve ser colocado num ambiente 30 minutos. A medição só pode ser retomada quando a temperatura dentro do medidor é consistente com o que está fora dele. O campo electromagnético da soldadura eléctrica e do aquecimento por indução deve ser minimizada.

Não coloque o medidor de medição de temperatura próximo ou objeto. O medidor deve ser mantido limpo de modo que a poeira seja negada o acesso à lente cone.









**12.2. ANEXO 2. CÁLCULO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA LOSA DE 20 CM
11:30 AM,3:30 PM,5:30 PM,7:30 PM, 11:30 PM,1:30 AM.**

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|--------------------------|
| Hora | 11:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 17 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 32.6 | 29.2 |
| 2 | 32.5 | 26.6 |
| 3 | 31.6 | 28.6 |
| Temp-promedio ° C | 32.23 | 28.13 |
| Temp-promedio ° F ($0\text{ °C} \times 9/5$) + 32 = 32 °F | 90.01 | 82.63 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 7.38 | |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|--------------------------|
| Hora | 3:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 15.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 41.0 | 28.6 |
| 2 | 41.6 | 27.7 |
| 3 | 41.1 | 28.1 |
| Temp-promedio ° C | 41.23 | 28.13 |
| Temp-promedio ° F ($0\text{ °C} \times 9/5$) + 32 = 32 °F | 106.21 | 82.63 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 23.58 | |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto |
|------------|---|
|------------|---|

| | | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 5:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 13.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 28.4 | 25.5 |
| 2 | 28.7 | 26.7 |
| 3 | 28.1 | 25.1 |
| Temp-promedio ° C | 28.40 | 25.77 |
| Temp-promedio ° F (0 °C × 9/5) + 32 = 32 °F | 83.12 | 78.39 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 4.73 | |

| | | |
|---|---|--------------------------|
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
| Hora | 1:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 10.4 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 16.9 | 18.6 |
| 2 | 16.9 | 17.7 |
| 3 | 16.8 | 17.6 |
| Temp-promedio ° C | 16.87 | 17.97 |
| Temp-promedio ° F (0 °C × 9/5) + 32 = 32 °F | 62.37 | 64.35 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -1.98 | |

| | |
|----|---|
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto |
|----|---|

| | | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 7:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 12 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 23.5 | 22.7 |
| 2 | 23.2 | 22.9 |
| 3 | 24.0 | 23.4 |
| Temp-promedio ° C | 23.57 | 23.00 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 74.43 | 73.40 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 1.03 | |

12.3. ANEXO 3. CÁLCULO DE TEMPERATURA FONDO DE LOSA DE 10 Y 30 CM DE ESPESOR, 7:30 AM, 9:30 AM, 11:30 AM, 3:30 PM, 5:30 PM, 7:30 PM, 11:30 PM, Y 1:30 AM.

| hr | 7:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|---|--|---|---|
| e1 en Cm | 20 | | | | | |
| e2 en Cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S(e1) - T_c I(e1)$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C (e1) \times 100\%)}{T_c S(e1)}$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c I(e1))$ | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ |
| 23.5 | 21.9 | 1.60 | 7.0% | 3.5% | 0.82 | 22.7 |
| 23.2 | 22.6 | 0.60 | 3.0% | 1.5% | 0.35 | 22.9 |
| 24.0 | 22.9 | 1.10 | 5.0% | 2.5% | 0.60 | 23.4 |

| hr | 9:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|---|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 30 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S - T_c I$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C \times 100\%)}{T_c S}$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c S(e1))$ | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ |
| 31.2 | 28.1 | 3.10 | 10.0% | 15.0% | 4.68 | 26.5 |
| 31.7 | 27.8 | 3.90 | 12.0% | 18.0% | 5.71 | 26 |
| 30.9 | 28.2 | 2.70 | 9.0% | 13.5% | 4.17 | 26.7 |

| | |
|------------|---|
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto |
|------------|---|

| | | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 9:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 15 ° C | |
| Registro de temperaturas en la cara superior e inferior de la Losa de concreto en ° C | | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 31.2 | 29.6 |
| 2 | 31.7 | 29.8 |
| 3 | 30.9 | 29.5 |
| Temp-promedio ° C | 31.27 | 29.63 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C × 9/5) + 32 = 32 ° F | 88.29 | 85.33 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 2.96 | |

| hr | 3:30 p. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|---|---|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cS} - T_{cI}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \cdot 100\%)}{T_{cS}}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1) \cdot (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 41.0 | 28.6 | 12.40 | 30.0% | 15.0% | 6.15 | 34.9 |
| 41.6 | 27.7 | 13.90 | 33.0% | 16.5% | 6.86 | 34.7 |
| 41.1 | 28.1 | 13.00 | 32.0% | 16.0% | 6.58 | 34.5 |

| | | |
|---|---|--------------------------|
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
| Hora | 11:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 17 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 32.6 | 31.0 |
| 2 | 32.5 | 29.6 |
| 3 | 31.6 | 30.2 |
| Temp-promedio ° C | 32.23 | 30.27 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C × 9/5) + 32 = 32 ° F | 90.01 | 86.49 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 3.52 | |

| hr | 11:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|---|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cS} - T_{cI}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \cdot 100\%)}{T_{cS}}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1)^2(e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 32.6 | 29.2 | 3.40 | 10.0% | 5.0% | 1.63 | 31.0 |
| 32.5 | 26.6 | 5.90 | 18.0% | 9.0% | 2.93 | 29.6 |
| 31.6 | 28.6 | 3.00 | 9.0% | 4.5% | 1.42 | 30.2 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 3:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 15.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 41.0 | 34.9 |
| 2 | 41.6 | 34.7 |
| 3 | 41.1 | 34.5 |
| Temp-promedio ° C | 41.23 | 34.70 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | 106.21 | 94.46 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 11.75 | |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 5:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 13.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 28.4 | 27.0 |
| 2 | 28.7 | 27.7 |
| 3 | 28.1 | 26.6 |
| Temp-promedio ° C | 28.40 | 27.10 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | 83.12 | 80.78 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 2.34 | |

| hr | 5:30 p. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|---|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cS} - T_{cI}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \cdot 100\%)}{T_{cS}}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1)^2(e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 28.4 | 25.5 | 2.90 | 10.0% | 5.0% | 1.42 | 27.0 |
| 28.7 | 26.7 | 2.00 | 7.0% | 3.5% | 1.00 | 27.7 |
| 28.1 | 25.1 | 3.00 | 11.0% | 5.5% | 1.55 | 26.6 |

| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|--|---|
| $T_{cs}(e1)$ | $T_{ci}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cs} - T_{ci}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \times 100\%)}{T_{cs}}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1)^2(e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cs}(e1))$ | $T_{ci}(e2) = T_{cs}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 23.3 | 23.4 | -0.10 | 0.0% | 0.0% | 0.00 | 23.3 |
| 23.3 | 23.9 | -0.60 | -3.0% | -1.5% | -0.35 | 23.7 |
| 23.4 | 23.1 | 0.30 | 1.0% | 0.5% | 0.12 | 23.3 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|--------------------------|
| Hora | 7:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 12.0 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 23.3 | 23.3 |
| 2 | 23.3 | 23.7 |
| 3 | 23.4 | 23.3 |
| Temp-promedio ° C | 23.33 | 23.43 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 73.99 | 74.17 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -0.18 | |

| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|--|---|
| $T_{cs}(e1)$ | $T_{ci}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cs} - T_{ci}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \times 100\%)}{T_{cs}}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1)^2(e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cs}(e1))$ | $T_{ci}(e2) = T_{cs}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 17.7 | 19.0 | -1.30 | -7.0% | -3.5% | -0.62 | 18.3 |
| 17.7 | 19.0 | -1.30 | -7.0% | -3.5% | -0.62 | 18.3 |
| 17.7 | 18.6 | -0.90 | -5.0% | -2.5% | -0.44 | 18.1 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|----------------------|---|--------------------------|
| Hora | 11:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 11.0 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |

| | | |
|--|---|-------|
| 1 | 17.7 | 18.3 |
| 2 | 17.7 | 18.3 |
| 3 | 17.7 | 18.1 |
| Temp-promedio ° C | 17.70 | 18.23 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 63.86 | 64.81 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -0.95 | |

| hr | 1:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|---|---|--|---|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 10 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S - T_c I$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C \times 100\%)}{T_c S}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times T_c S (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c S (e1))$ | $T_c I (e2) - T_c S (e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ |
| 16.9 | 18.6 | -1.70 | -10.0% | -5.0% | -0.85 | 17.8 |
| 16.9 | 17.7 | -0.80 | -5.0% | -2.5% | -0.42 | 17.3 |
| 16.8 | 17.6 | -0.80 | -5.0% | -2.5% | -0.42 | 17.2 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|--------------------------|
| Hora | 1:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 10.4 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 16.9 | 17.8 |
| 2 | 16.9 | 17.3 |
| 3 | 16.8 | 17.2 |
| Temp-promedio ° C | 16.87 | 17.43 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 62.37 | 63.37 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -1.00 | |

| hr | 7:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|--|---|--|--|--|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 30 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C (e1) = T_{cS} - T_{cI}$ | $\% \Delta T^{\circ}C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \times 100\%)}{T_{cS}}$ | $\% \Delta T^{\circ}C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C (e2) = (\% \Delta T^{\circ}C (e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^{\circ}C (e2)$ |
| 23.5 | 21.9 | 1.60 | 7.0% | 10.5% | 2.47 | 21 |
| 23.2 | 22.6 | 0.60 | 3.0% | 4.5% | 1.04 | 22.2 |
| 24.0 | 22.9 | 1.10 | 5.0% | 7.5% | 1.8 | 22.2 |

| ΔT | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|---|--|
| Hora | 7:30 a. m. | | |
| Lugar | Bogotá D.C | | |
| Temperatura Ambiente | 12 °C | | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa | |
| 1 | 23.5 | 21 | |
| 2 | 23.2 | 22.2 | |
| 3 | 24.0 | 22.2 | |
| Temp-promedio °C | 23.57 | 21.80 | |
| Temp-promedio °F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 74.43 | 71.24 | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio °F (c)-Temp-promedio °F (l) | | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | 3.19 | | |

| hr | 9:30 a. m. | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|--|---|---|--|--|
| e1 en cm | 20 | | | | | |
| e2 en cm | 30 | | | | | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_{cs}(e1)$ | $T_{ci}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C (e1) = T_{cs} - T_{ci}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \cdot 100\%)}{T_{cs}}$ | $\frac{0}{100} \Delta T^{\circ}C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C (e1) \cdot \frac{e2}{e1})}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C (e2) = (\% \Delta T^{\circ}C (e2) \times T_{cs}(e1))$ | $T_{ci}(e2) = T_{cs}(e1) - \Delta T^{\circ}C (e2)$ |
| 31.2 | 28.1 | 3.10 | 10.0% | 15.0% | 4.68 | 26.5 |
| 31.7 | 27.8 | 3.90 | 12.0% | 18.0% | 5.71 | 26 |
| 30.9 | 28.2 | 2.70 | 9.0% | 13.5% | 4.17 | 26.7 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|--|---|--------------------------|
| Hora | 9:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 15 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 31.2 | 26.5 |
| 2 | 31.7 | 26.0 |
| 3 | 30.9 | 26.7 |
| Temp-promedio ° C | 31.27 | 26.40 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | 88.29 | 79.52 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (l) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 8.77 | |

| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
|---------------------------|---------------------------|---|---|--|--|---|
| $T_{cS}(e1)$ | $T_{cI}(e1)$ | $\Delta T^{\circ}C(e1) = T_{cS} - T_{cI}$ | $0_{10} \Delta T^{\circ}C(e1) = \frac{(\Delta T^{\circ}C \cdot 100\%)}{T_{cS}}$ | $0_{10} \Delta T^{\circ}C(e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ}C(e1)^2(e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ}C(e2) = (\% \Delta T^{\circ}C(e2) \times T_{cS}(e1))$ | $T_{cI}(e2) = T_{cS}(e1) - \Delta T^{\circ}C(e2)$ |
| 32.6 | 29.2 | 3.40 | 10.0% | 15.0% | 4.89 | 27.7 |
| 32.5 | 26.6 | 5.90 | 18.0% | 27.0% | 8.78 | 23.7 |
| 31.6 | 28.6 | 3.00 | 9.0% | 13.5% | 4.27 | 27.3 |

| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|---|--------------------------|
| Hora | 11:30 a. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 17 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 32.6 | 27.7 |
| 2 | 32.5 | 23.7 |
| 3 | 31.6 | 27.3 |
| Temp-promedio ° C | 32.23 | 26.23 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | 90.01 | 79.21 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 10.80 | |
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
| Hora | 3:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 15.5 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 41.0 | 22.6 |
| 2 | 41.6 | 21.0 |
| 3 | 41.1 | 21.4 |
| Temp-promedio ° C | 41.23 | 21.67 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | 106.21 | 71.01 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | 35.20 | |

| hr 5:30 p. m. e1 en cm 20 e2 en cm 30 | | | | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|--|---|---|--|
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^0 C(e1) = T_c S - T_c I$ | $\% \Delta T^0 C(e1) = \frac{(\Delta T^0 C \cdot 100\%)}{T_c S}$ | $\% \Delta T^0 C(e2) = \frac{(\% \Delta T^0 C(e1) \cdot (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^0 C(e2) = (\% \Delta T^0 C(e2) \times T_c S(e1))$ | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^0 C(e2)$ |
| 28.4 | 25.5 | 2.90 | 10.0% | 15.0% | 4.26 | 24.1 |
| 28.7 | 26.7 | 2.00 | 7.0% | 10.5% | 3.01 | 25.7 |
| 28.1 | 25.1 | 3.00 | 11.0% | 16.5% | 4.64 | 23.5 |

| ΔT | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|--|---|--------------------------|
| Hora | | 5:30 p. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 13.5 ° C | |
| No Lectura | | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | | 28.4 | 24.1 |
| 2 | | 28.7 | 25.7 |
| 3 | | 28.1 | 23.5 |
| Temp-promedio ° C | | 28.40 | 24.43 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | | 83.12 | 75.97 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | | 7.15 | |

| hr 3:30 p. m. e1 en cm 20 e2 en cm 30 | | | | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|--|---|---|--|
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^0 C(e1) = T_c S - T_c I$ | $\% \Delta T^0 C(e1) = \frac{(\Delta T^0 C \cdot 100\%)}{T_c S}$ | $\% \Delta T^0 C(e2) = \frac{(\% \Delta T^0 C(e1) \cdot (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^0 C(e2) = (\% \Delta T^0 C(e2) \times T_c S(e1))$ | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^0 C(e2)$ |
| 41.0 | 28.6 | 12.40 | 30.0% | 45.0% | 18.45 | 22.6 |
| 41.6 | 27.7 | 13.90 | 33.0% | 49.5% | 20.59 | 21 |
| 41.1 | 28.1 | 13.00 | 32.0% | 48.0% | 19.73 | 21.4 |

| T | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|----------------------|--|---|--------------------------|
| Hora | | 7:30 p. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 12.0 ° C | |
| No Lectura | | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | | 23.3 | 23.3 |
| 2 | | 23.3 | 24.4 |
| 3 | | 23.4 | 23.1 |

| | | |
|--|--|---|
| Temp-promedio ° C | 23.33 | 23.60 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 73.99 | 74.48 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -0.49 | |
| hr | 7:30 p. m. | |
| e1 en cm | 20 | |
| e2 en cm | 30 | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S - T_c I$ |
| 23.3 | 23.4 | -0.10 |
| 23.3 | 23.9 | -0.60 |
| 23.4 | 23.1 | 0.30 |
| % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura |
| $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C \times 100\%)}{T_c S}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c S(e1))$ |
| 0.0% | 0.0% | 0 |
| -3.0% | -4.5% | -1.05 |
| 1.0% | 1.5% | 0.35 |
| Temperatura cara inferior | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ | |
| 23.3 | 23.3 | |
| 24.4 | 24.4 | |
| 23.1 | 23.1 | |

| | | |
|--|--|---|
| hr | 11:30 p. m. | |
| e1 en cm | 20 | |
| e2 en cm | 30 | |
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura |
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S - T_c I$ |
| 17.7 | 19.0 | -1.30 |
| 17.7 | 19.0 | -1.30 |
| 17.7 | 18.6 | -0.90 |
| % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura |
| $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C \times 100\%)}{T_c S}$ | $\frac{0}{10} \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c S(e1))$ |
| -7.0% | -10.5% | -1.86 |
| -7.0% | -10.5% | -1.86 |
| -5.0% | -7.5% | -1.33 |
| Temperatura cara inferior | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ | |
| 19.6 | 19.6 | |
| 19.6 | 19.6 | |
| 19.0 | 19.0 | |

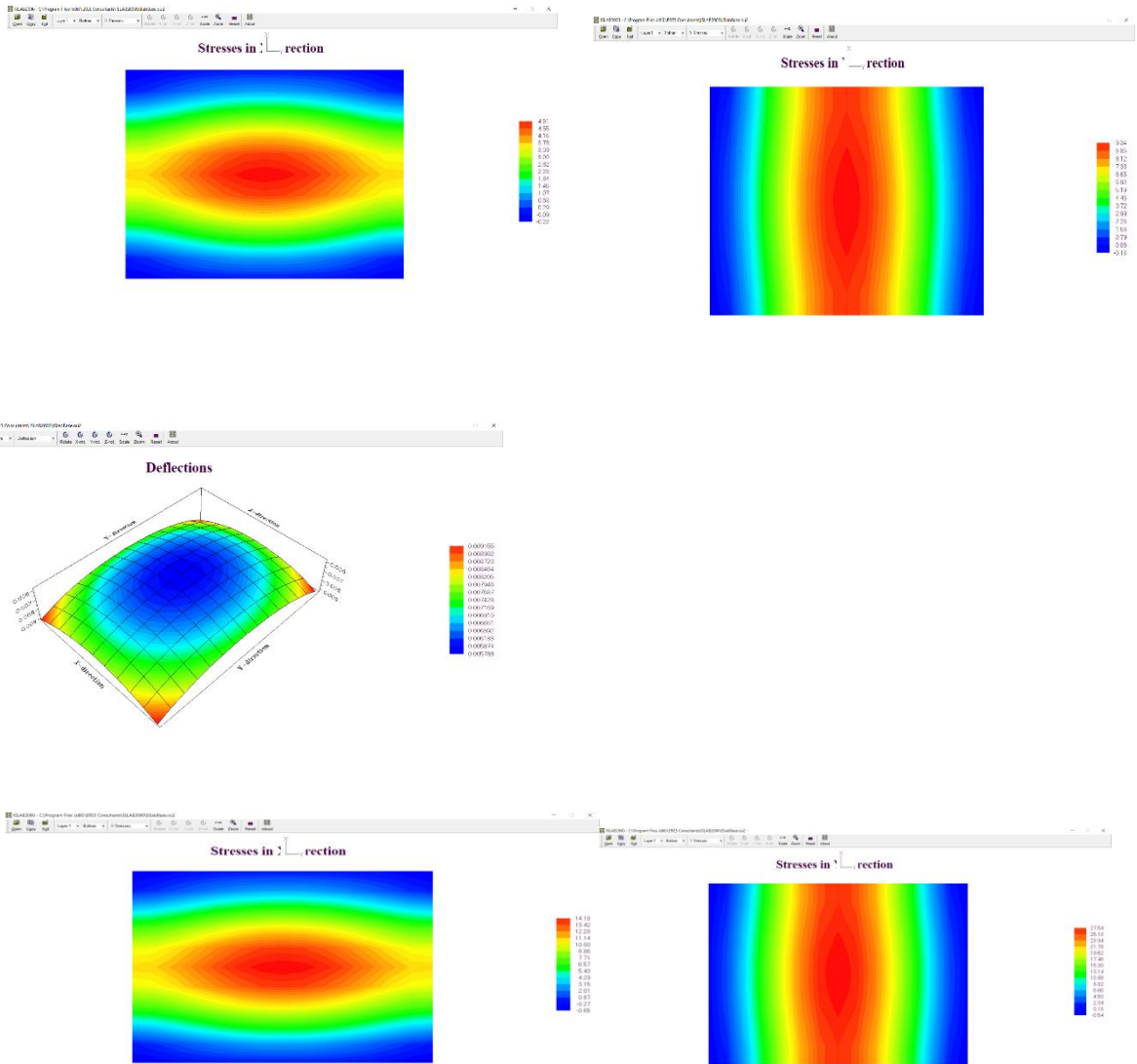
| | | |
|--|---|--------------------------|
| ΔT | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
| Hora | 11:30 p. m. | |
| Lugar | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | 11.0 ° C | |
| No Lectura | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | 17.7 | 19.6 |
| 2 | 17.7 | 19.6 |
| 3 | 17.7 | 19.0 |
| Temp-promedio ° C | 17.70 | 19.40 |
| Temp-promedio ° F (0 °C x 9/5) + 32 = 32 °F | 63.86 | 66.92 |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT °F gradiente térmico de temperatura | -3.06 | |

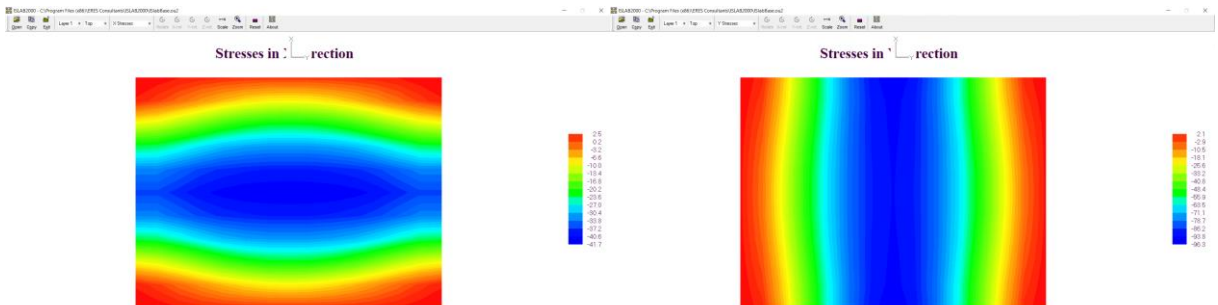
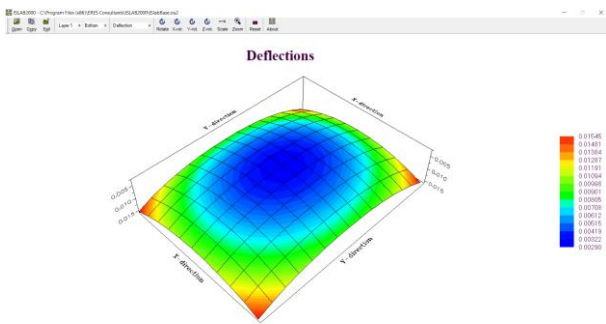
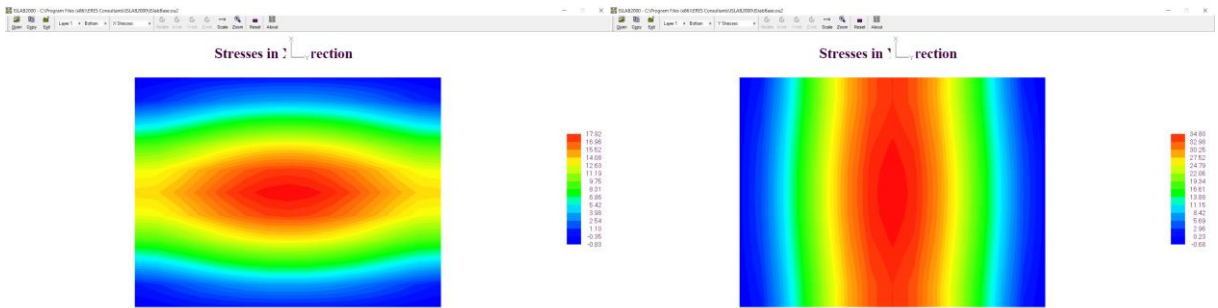
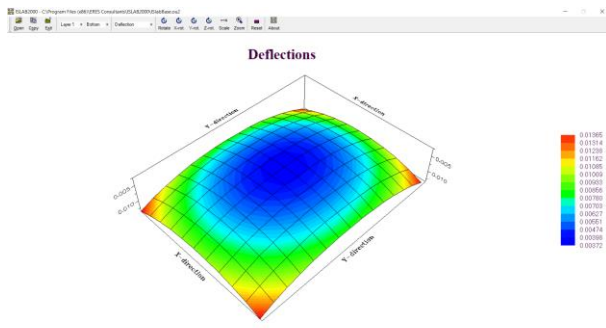
| Temperatura cara superior | Temperatura cara inferior | Variación de temperatura | % descendente de Temperatura (e1) | % descendente de Temperatura (e2) | Variación de temperatura | Temperatura cara inferior |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|---|---|
| $T_c S(e1)$ | $T_c I(e1)$ | $\Delta T^{\circ} C (e1) = T_c S - T_c I$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e1) = \frac{(\Delta T^{\circ} C \times 100\%)}{T_c S}$ | $\% \Delta T^{\circ} C (e2) = \frac{(\% \Delta T^{\circ} C (e1) \times (e2))}{(e1)}$ | $\Delta T^{\circ} C (e2) = (\% \Delta T^{\circ} C (e2) \times T_c S(e1))$ | $T_c I(e2) = T_c S(e1) - \Delta T^{\circ} C (e2)$ |
| 16.9 | 18.6 | -1.70 | -10.0% | -15.0% | -2.54 | 19.4 |
| 16.9 | 17.7 | -0.80 | -5.0% | -7.5% | -1.27 | 18.2 |
| 16.8 | 17.6 | -0.80 | -5.0% | -7.5% | -1.26 | 18.1 |

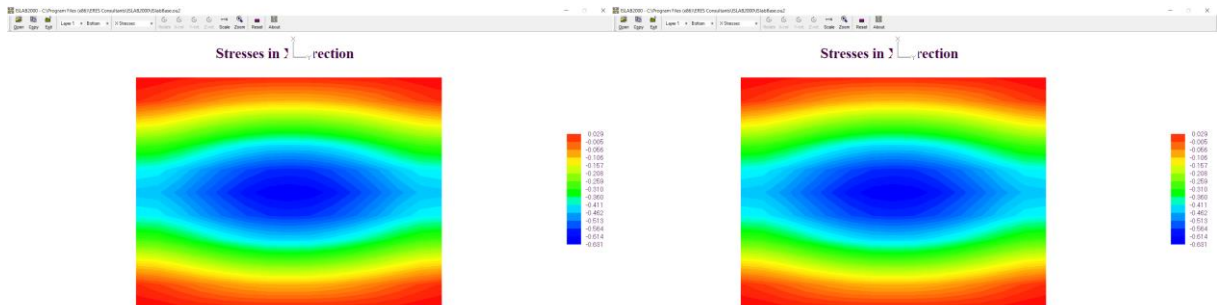
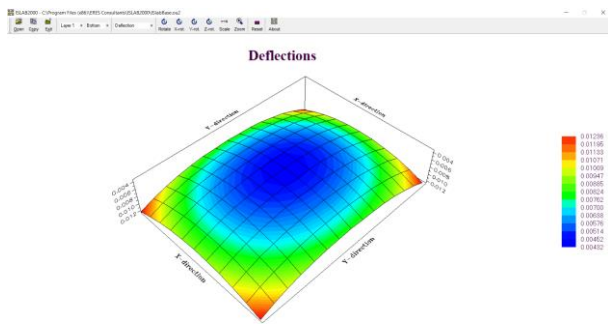
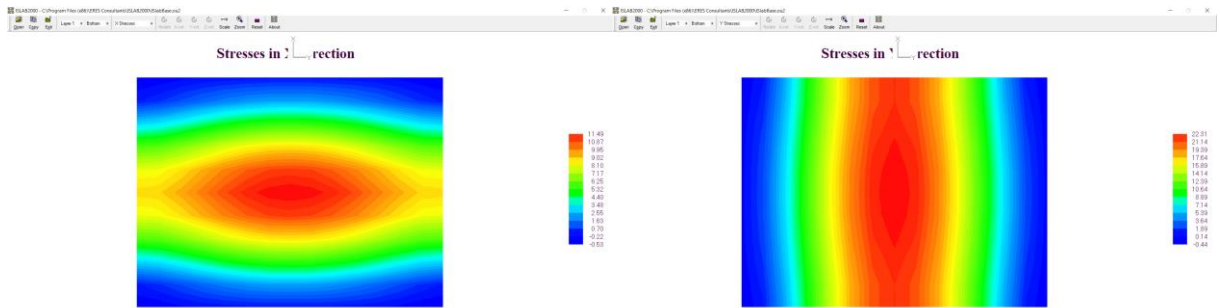
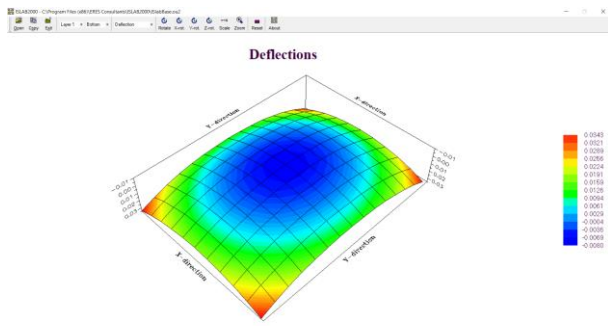
| T | | Variación de temperatura en la losa de concreto | |
|---|--|---|--------------------------|
| Hora | | 1:30 a. m. | |
| Lugar | | Bogotá D.C | |
| Temperatura Ambiente | | 10.4 ° C | |
| No Lectura | | Cara superior de la losa | Cara inferior de la losa |
| 1 | | 16.9 | 19.4 |
| 2 | | 16.9 | 18.2 |
| 3 | | 16.8 | 18.1 |
| Temp-promedio ° C | | 16.87 | 18.57 |
| Temp-promedio ° F (0 ° C x 9/5) + 32 = 32 ° F | | 62.37 | 65.43 |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | | Temp-promedio ° F (c)-Temp-promedio ° F (I) | |
| ΔT ° F gradiente térmico de temperatura | | -3.06 | |

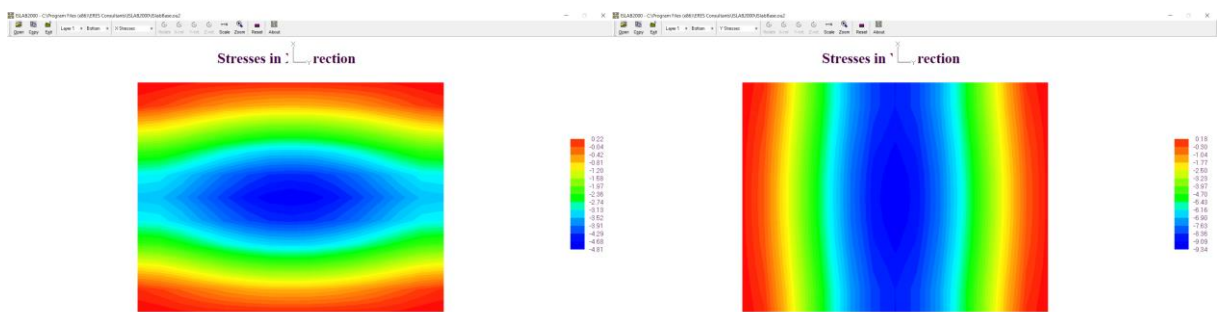
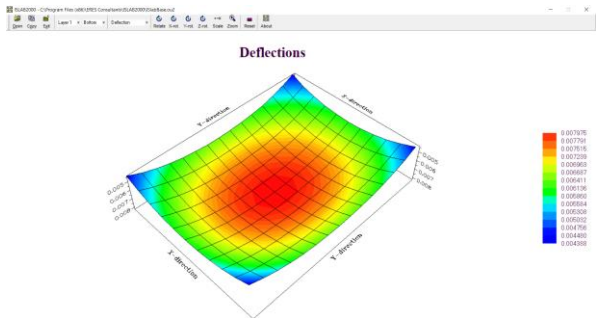
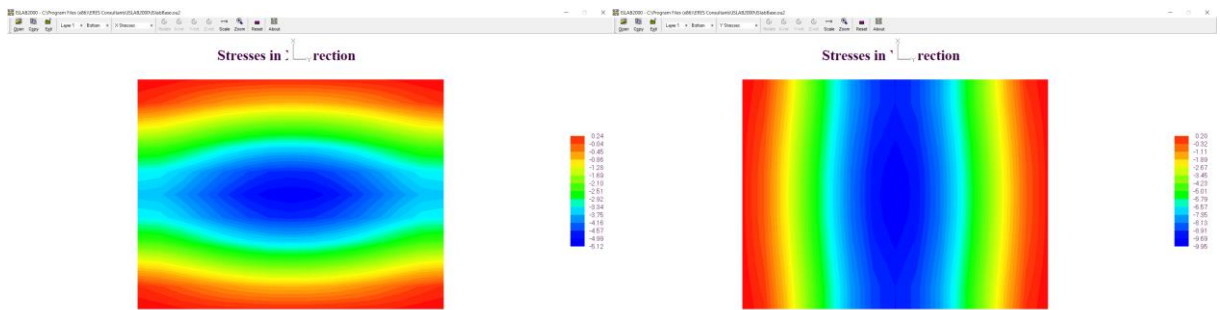
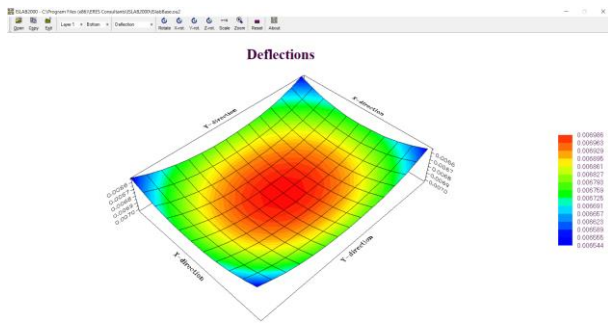
12.4. ANEXO 4. GRÁFICAS, EVALUACIONES Y DEFORMACIÓN LOSA DE A.)20, B.)10, Y C.)30 CM DE ESPESOR, 7.30 AM, 9:30 AM, 11:30 AM,3:30 PM, 5:30 PM: 7:30PM,11:30PM,1:30 AM.

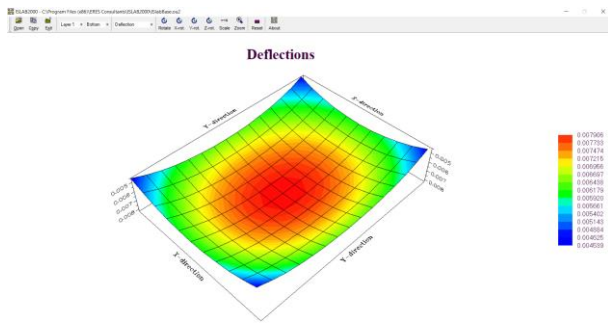
a. 20 cm



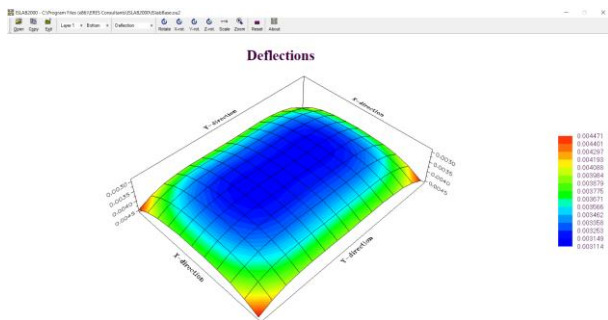
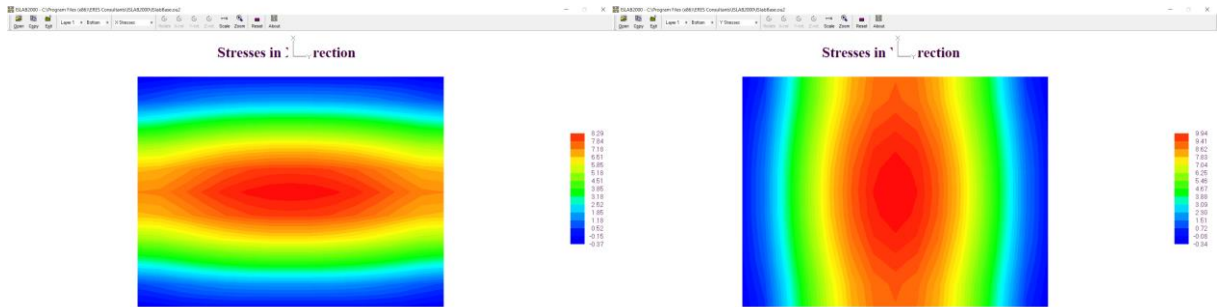


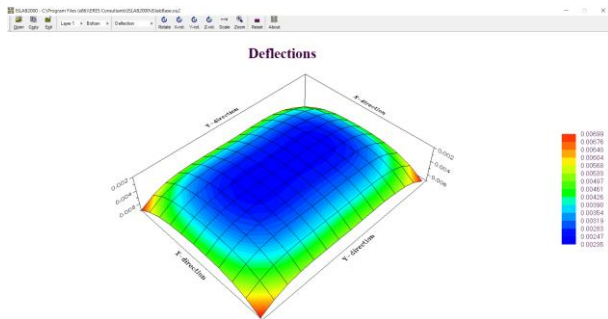
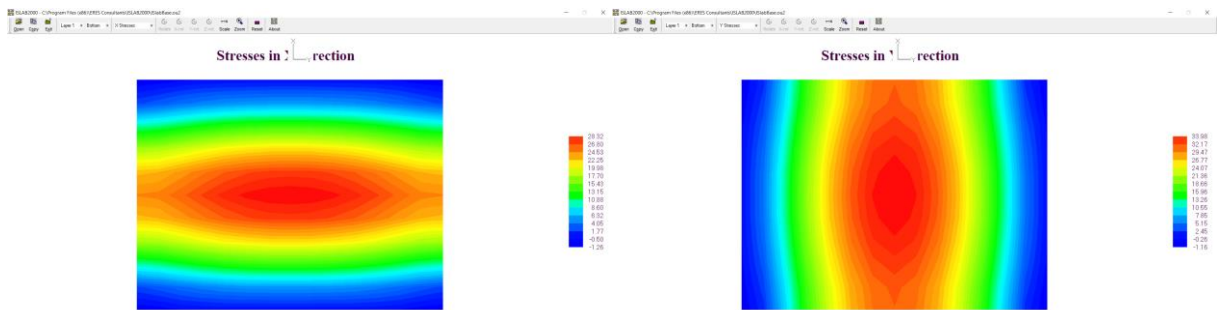
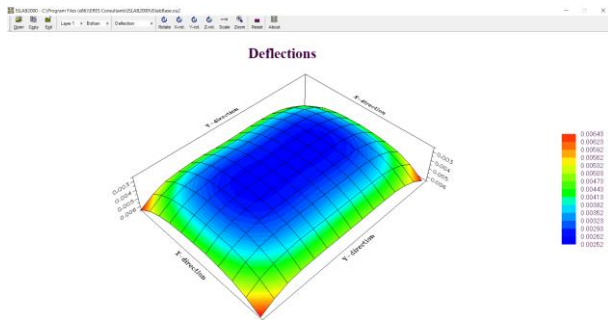
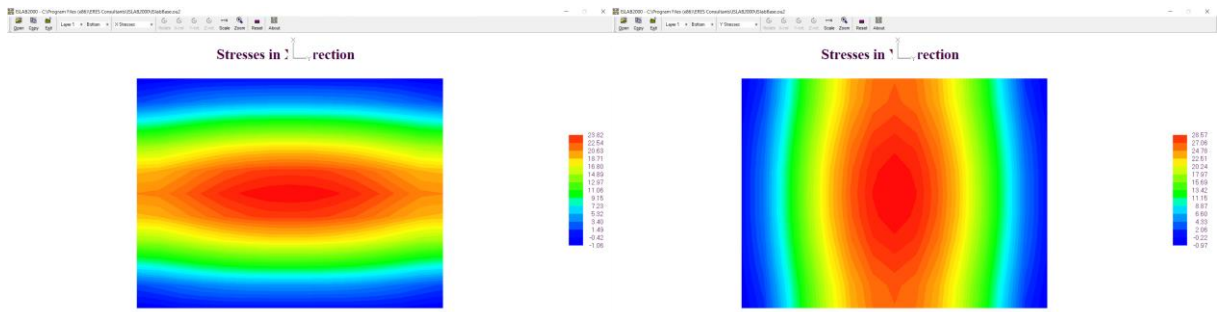


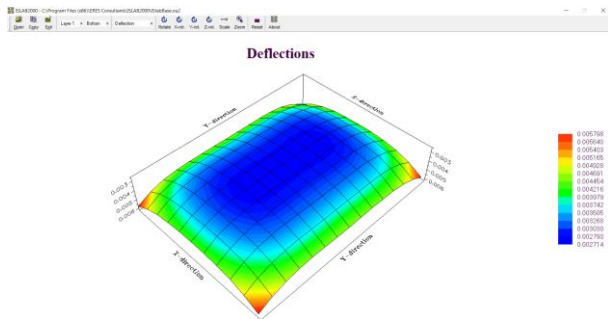
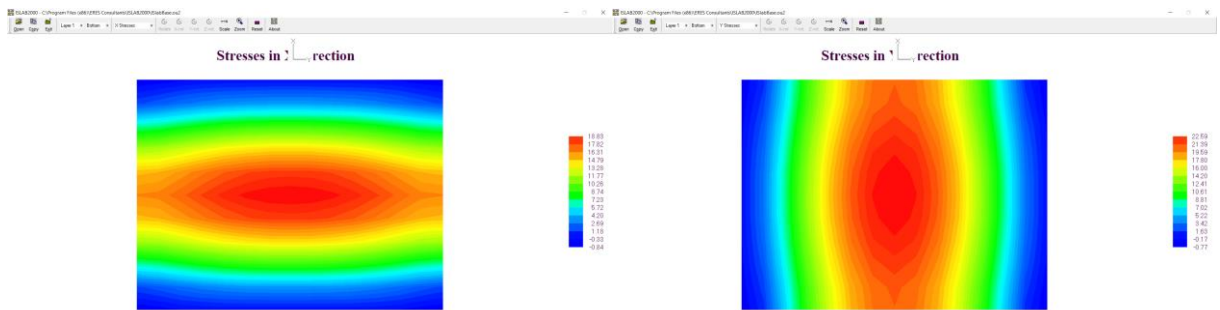
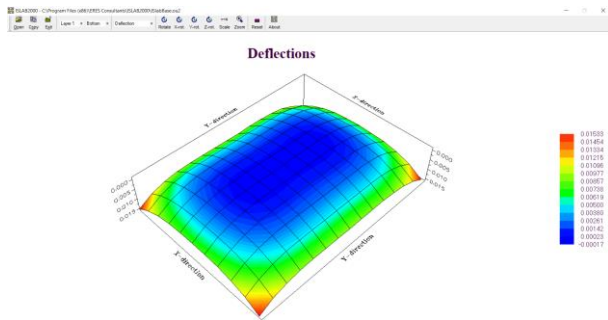
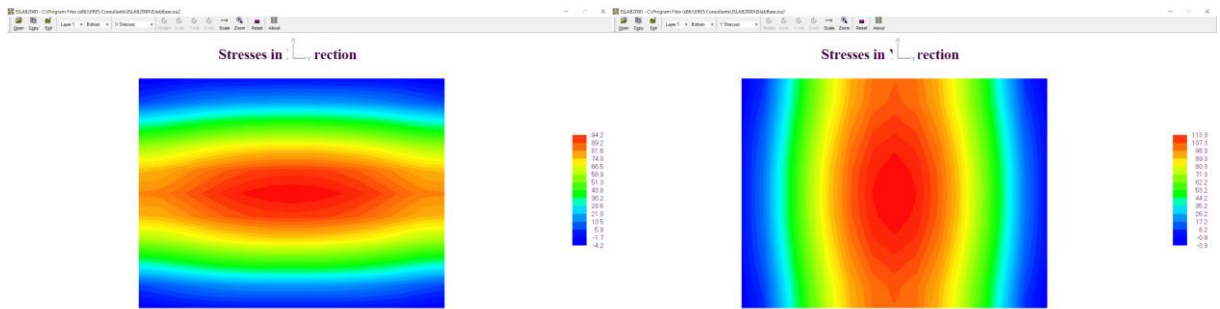


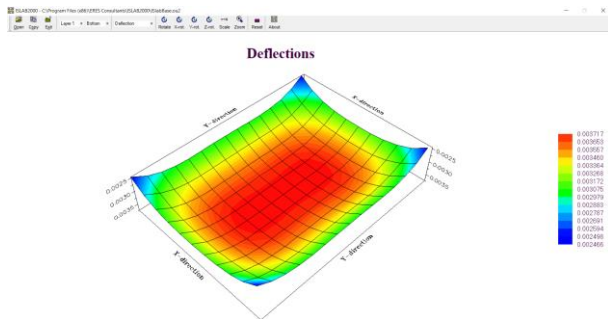
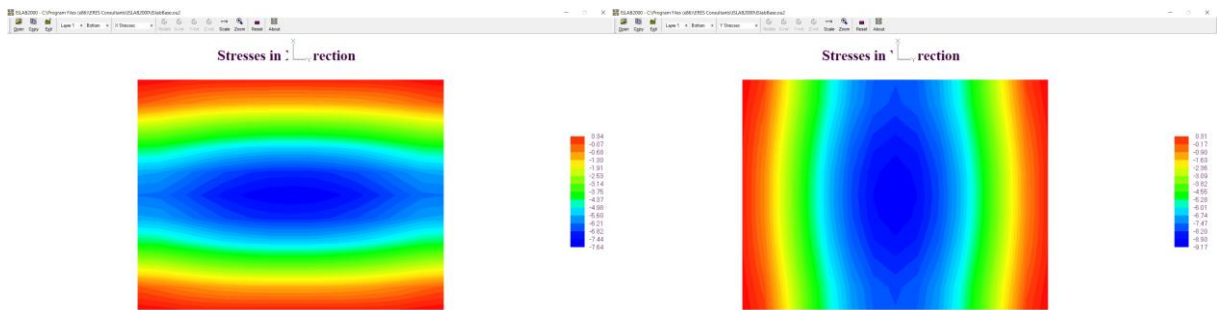
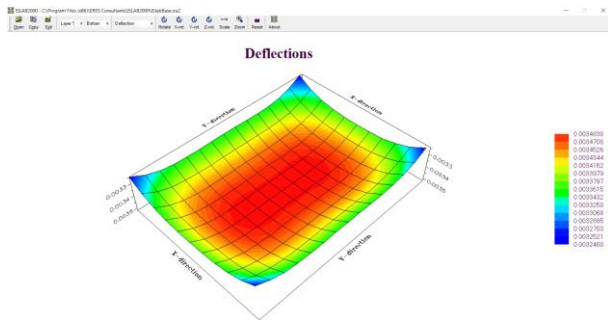
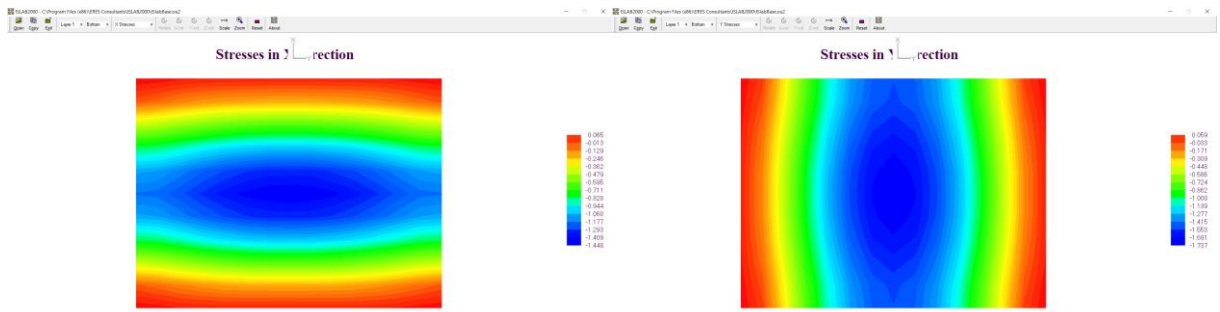


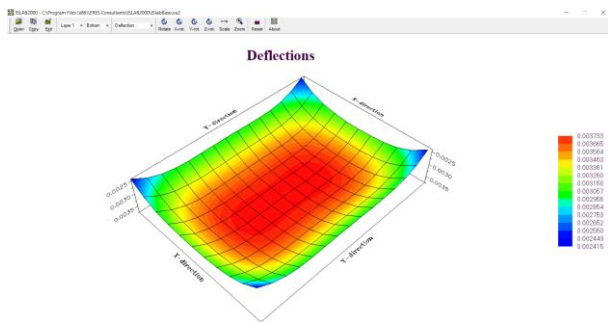
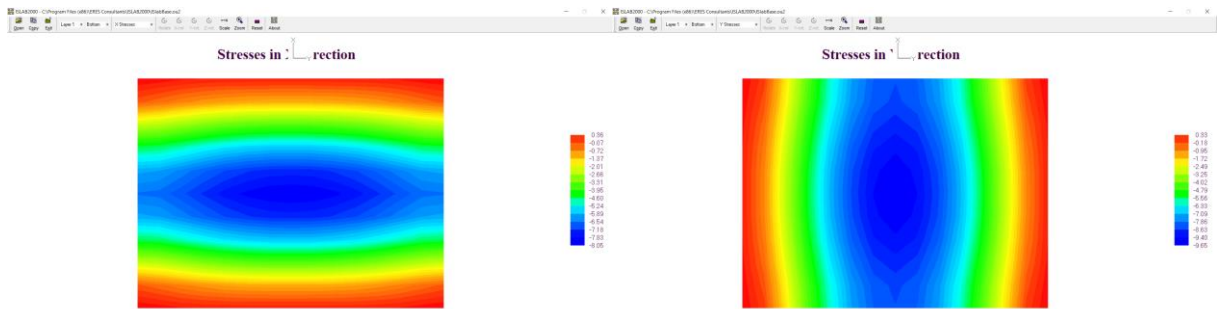
b.) 10 cm



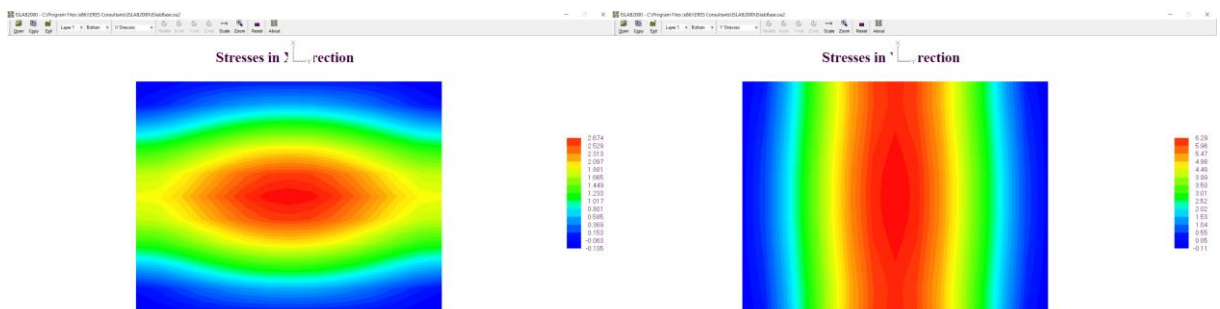


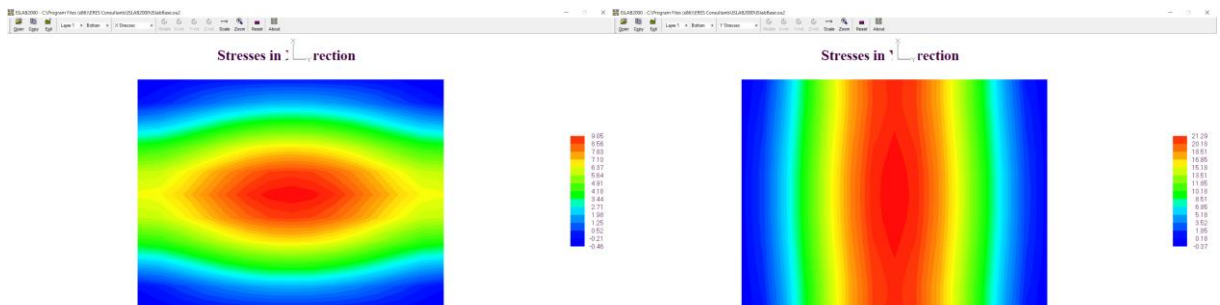
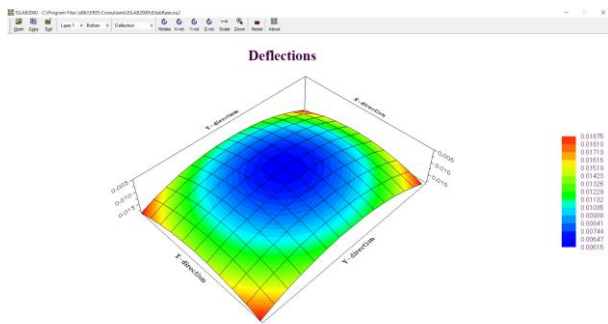
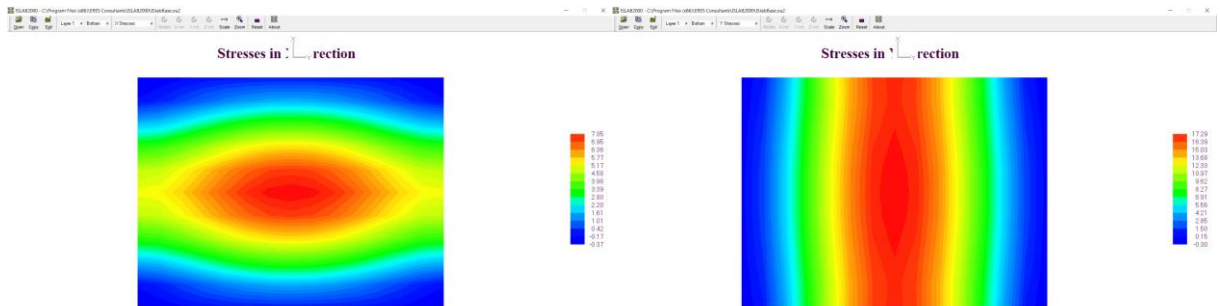
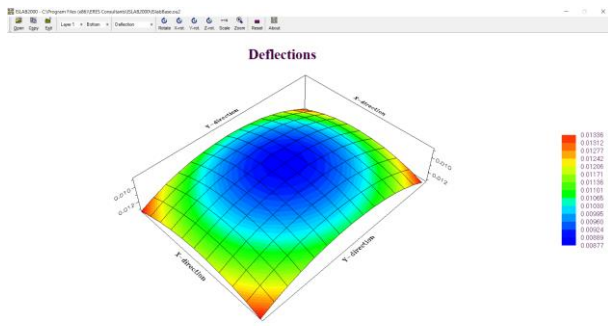


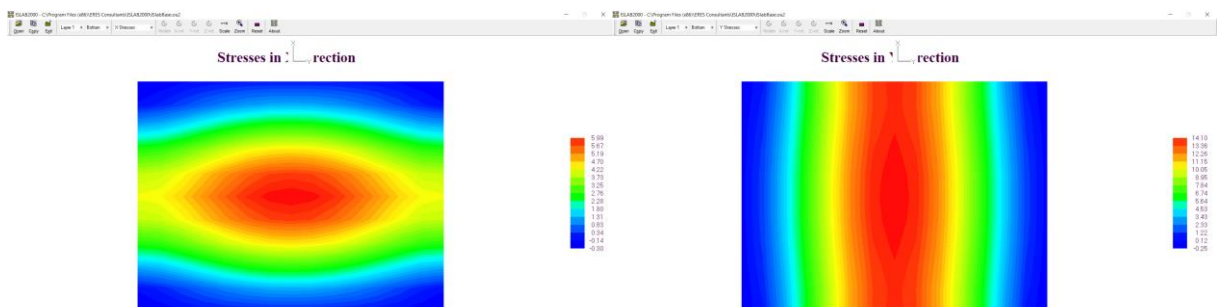
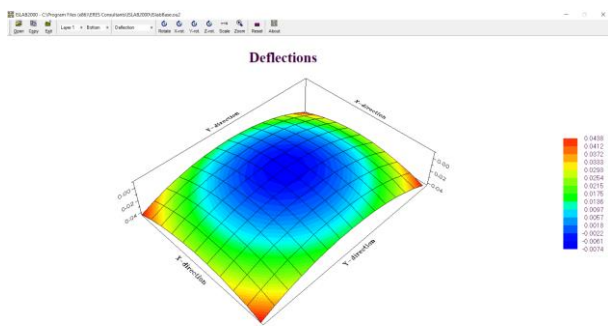
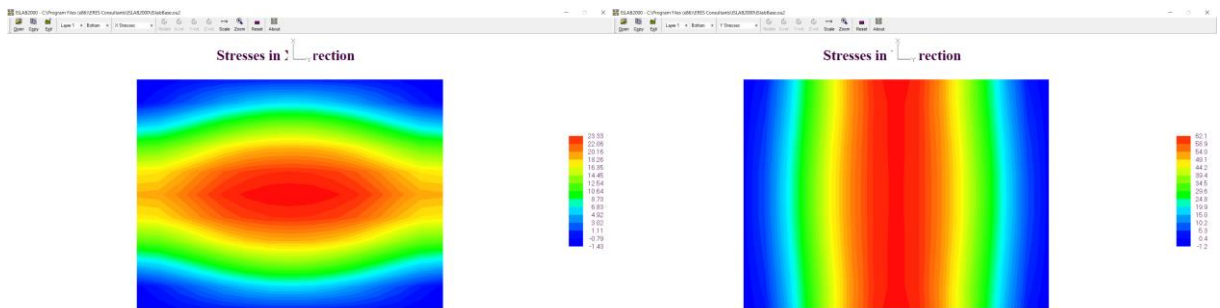
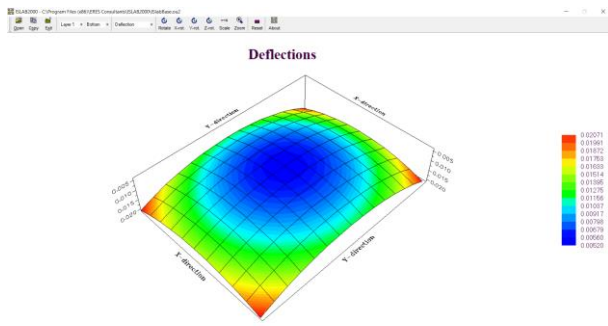




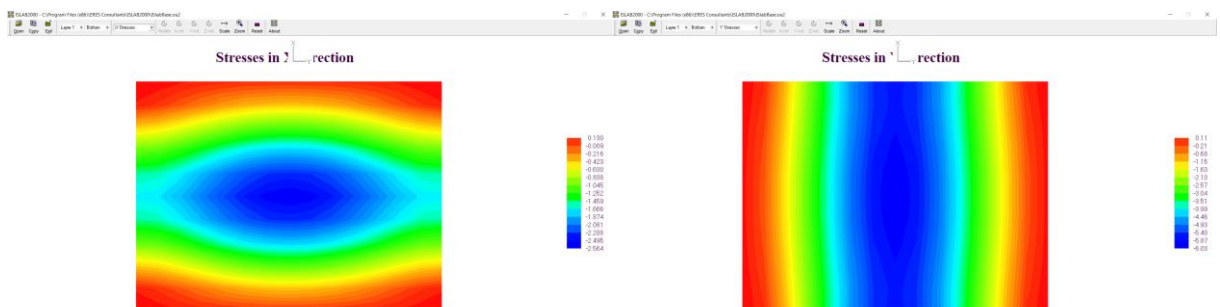
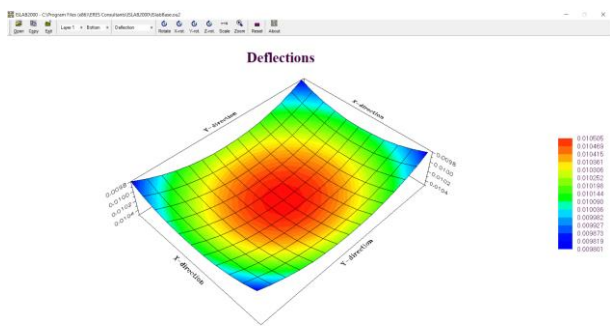
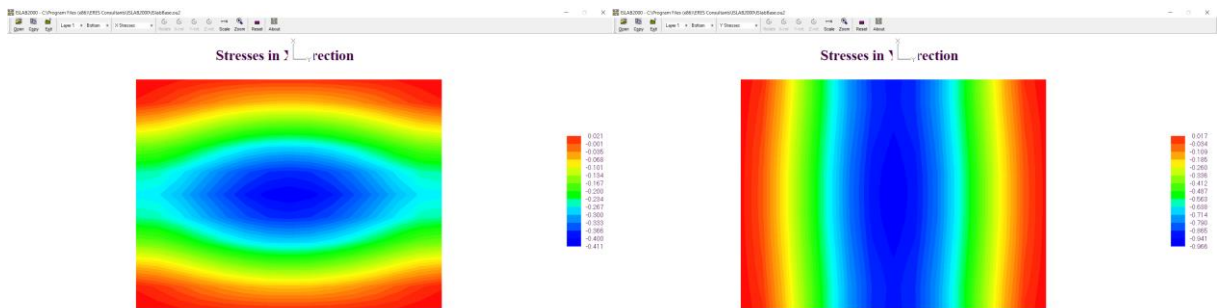
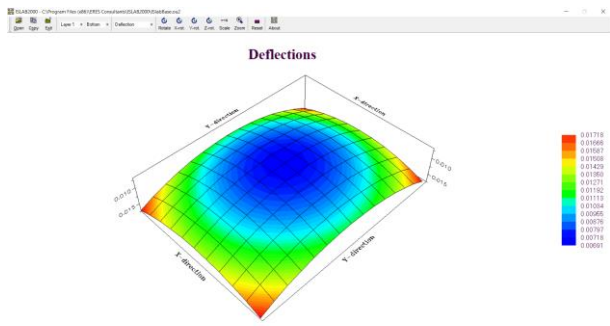
c.) 30 cm

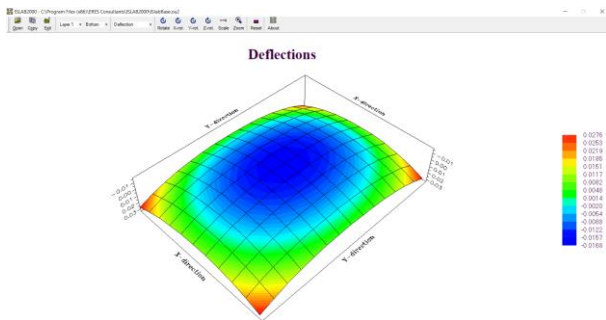
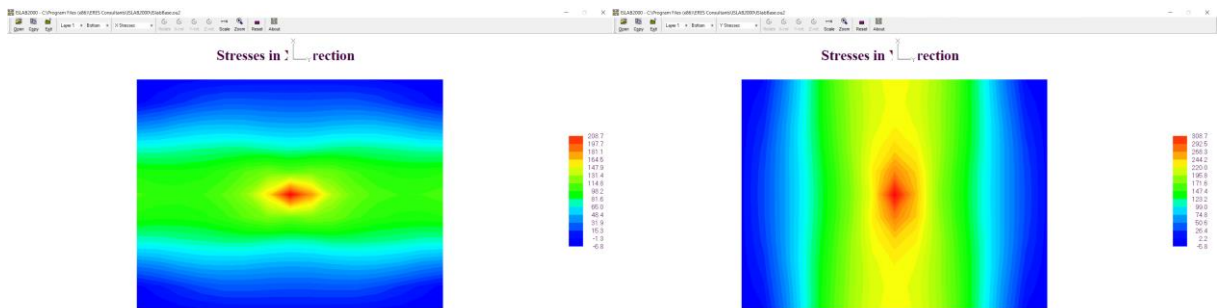
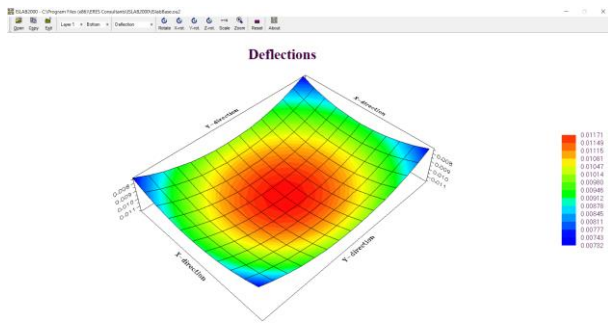






Closest Value = 2.81





12.5. FICHA TÉCNICA PRESIÓN DE INFLADO NEUMÁTICOS



Presión de inflado

Más que un simple «consumible», el neumático es el único punto de contacto entre el vehículo y el suelo. Es determinante para la seguridad del conductor, así como para la de la mercancía transportada.

Mantener la presión correcta es un factor esencial para obtener el máximo rendimiento de los neumáticos. Para una carga y un trabajo determinados, en unas condiciones perfectamente definidas, sólo existe una presión adecuada.

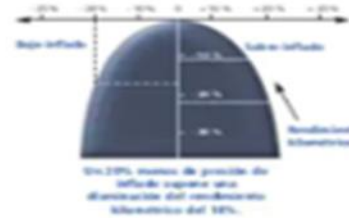
INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INFLADO EN LA DURACIÓN DEL NEUMÁTICO

Una presión de inflado excesiva perjudica:

- al confort de conducción
- a la adherencia
- a la duración del neumático, especialmente en las bandas motrices.

Una presión de inflado insuficiente implica:

- repercusiones sobre el comportamiento y la seguridad del vehículo,
- una disminución de la resistencia de la carcasa, limitando las posibilidades de recauchutado,
- un aumento de la resistencia a la rodadura, y en consecuencia, un mayor consumo del vehículo.



INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL COSTE

| Presión correcta | 20% menos de presión |
|---------------------------|---------------------------|
| Precio: 100 % | Precio: 100 % |
| Kilómetros: 100 % | Kilómetros: 81 % |
| Capital invertido = 100 % | Capital invertido = 100 % |
| Rendimiento km = 100 % | Rendimiento km = 81 % |
| $\frac{100}{100} = 1$ | $\frac{100}{81} = 1,23$ |

| Vehículos | | TRANSPORTE DE MERCANCÍAS | | | | | | | |
|-------------------|------------|--------------------------|-----|-----------------------------------|-----|--------|-----|-----|----|
| | | Obras | | | | Urbano | | | |
| | | Portadores | | Vehículos de Recogida de Residuos | | | | | |
| Dimensiones | | 6x4 - 6x6 | | 6x4 - 6x6 | | 6x2 | | 6x2 | |
| | | DT | AT | DT | AT | DT | AT | DT | AT |
| 8.5 R 17.5 X | 121/120L | | | | | | | | |
| 9.5 R 17.5 X | 129/127L | | | | | | | | |
| 9.5 R 19.5 X | 134/131K | | | | | 6,5 | 6,5 | | |
| 205/70 R 19.5 X | 143/141J | | | | | | | | |
| 305/70 R 19.5 X2U | 148/145J | | | | | 6,5 | 6,5 | | |
| 445/65 R 19.5 X | 165K | | | | | | | | |
| 12.00 R 20 X | 154/150G-K | 2,5 | 6,5 | 7,0 | 6,5 | 7,5 | 7,5 | | |
| 10 R 22.5 X | 144/142K | | | | | 6,5 | 6,5 | | |

12.6. VALORES K ESPECIFICACIONES GENERALES DE CARRETERAS INVIAS 2015

| Valor de k para subrasante | | Valor de k para la base | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|
| | | 100 mm | | 150 mm | | 225 mm | | 300 mm | |
| MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ |
| 20 | 73 | 23 | 85 | 26 | 96 | 32 | 117 | 38 | 140 |
| 40 | 147 | 45 | 165 | 49 | 180 | 57 | 210 | 66 | 245 |
| 60 | 220 | 64 | 235 | 66 | 245 | 76 | 280 | 90 | 330 |
| 80 | 295 | 87 | 320 | 90 | 330 | 100 | 370 | 117 | 430 |

Tabla 2-15. Influencia del espesor de la base granular en el valor de k

| Valor de k para subrasante | | Valor de k para la base | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|
| | | 100 mm | | 150 mm | | 225 mm | | 300 mm | |
| MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ | MPa/m | Lb/pulg ³ |
| 20 | 73 | 603 | 220 | 80 | 300 | 105 | 400 | 134 | 500 |
| 40 | 147 | 100 | 370 | 130 | 500 | 185 | 680 | 230 | 850 |
| 60 | 220 | 140 | 520 | 190 | 700 | 245 | 900 | | |

Tabla 2-16. Influencia del espesor de la base de suelo cemento en el valor de k

| Variables y su representación | | | | |
|-------------------------------|--|---|------------------------|--------------------|
| Suelos | Tránsito | Transferencia y confinamiento | Soporte | Concreto |
| S1 (CBR<2) | T0 (EALS <1x10 ⁶) | D y B (Dovelas y Bermas) | SN (Subrasante) | MR1 =38 MPa |
| S2 (2<CBR<5) | T1 (1x10 ⁶ <EALS <1,5x10 ⁶) | D y No B (Dovelas y No Bermas) | BG (15 cm BG) | MR2 =40 MPa |
| S3 (5<CBR<10) | T2 (1,5x10 ⁶ <EALS <5x10 ⁶) | No D y B (No Dovelas y Bermas) | BEC (15 cm BEC) | MR3 =42 MPa |
| S4 (10<CBR<20) | T3 (5x10 ⁶ <EALS <9x10 ⁶) | No D y No B (No Dovelas y No Bermas) | | MR4 =45 MPa |
| S5 (CBR>20) | T4 (9x10 ⁶ <EALS <17x10 ⁶) | | | |
| | T5 (17x10 ⁶ <EALS <25x10 ⁶) | | | |
| | T6 (25x10 ⁶ <EALS <100x10 ⁶) | | | |

Tabla 3-6. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

| En donde: | |
|--|---|
| S1 : "Clase de suelo con i variando desde 1 hasta 5" | BG : "Base granular" |
| T1 : "Clase de tránsito con i variando desde 0 hasta 6" | BEC : "Base estabilizada con cemento" |
| D : "Dovelas" | CBR : "Relación de soporte de California" |
| B : "Bermas" | EALS : Ejes equivalentes definidos con el procedimiento "Equivalent Axels Load System" |
| SN : "Suelo natural o subrasante" | |

12.7. MATERIAL GRANULAR ESPECIFICACIONES GENERALES DE CARRETERAS INVIAS 2015

Tabla 510. 1
Correspondencia entre clases de capas granulares, tipo de pavimento y categorías de tránsito

| Tipo de Capa | Categorías de Tránsito | | |
|--|------------------------|-------|-------|
| | T1 | T2 | T3 |
| Pavimento de concreto Asfáltico | | | |
| Base Granular | BG-B | BG-A | BG-A |
| Subbase Granular | SBG-B | SBG-A | SBG-A |
| Pavimento Concreto Hidráulico | | | |
| Base Granular | BG-A | NA | NA |

| Tipo de Capa | Categorías de Tránsito | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|
| | T1 | T2 | T3 |
| Subbase Granular | SBG-B | SBG-A | SBG-A |

NA = No Aplica. Para tránsitos T2 y T3, la capa de base para pavimentos de losas en concreto hidráulico requiere una mayor resistencia a la erosión que la ofrecida por las bases granulares; por lo tanto, la base no puede ser granular correspondiente a esta Especificación. Se recomienda utilizar materiales estabilizados o mezclas asfálticas para control de erosión, según lo establecido en los documentos del diseño.

| Ensayo | Norma de Ensayo | Clase | |
|---|-----------------|-------|------|
| | | BG-B | BG-A |
| Capacidad de Soporte | | | |
| CBR, % mínimo - Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E 142-13 (AASHTO T 180), método C, después de 4 días de inmersión. | INV E 148-13 | 80 | NA |
| Módulo Resiliente a $\theta=207$ kPa, MPa mínimo (Notas 2 y 3) | INV E 156-13 | NA | 100 |

NA = No Aplica.

12.8. ANEXO 5 CORREOS ELECTRÓNICOS SOFTWARE ISLAB2000

