



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

**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN,
DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE**

Jaime Daniel Toj López

Asesorado por el Ing. José Marcos Mejía Son

Guatemala, julio de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN,
DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAIME DANIEL TOJ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MARCOS MEJÍA SON

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|----------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova |
| VOCAL V | Br. Henry Fernando Duarte García |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|------------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero |
| EXAMINADORA | Inga. María del Mar Girón Cordón |
| EXAMINADOR | Ing. José Mauricio Arriola Donis |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, de fecha 29 de julio de 2015.



Jaime Daniel Toj López.

Guatemala 20 de Enero de 2016

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Planeamiento
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ing. Melini

Por este medio hago de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Jaime Daniel Toj López, titulado **PROPUESTA DE UNA GUIA PARA LA PLANIFICACION, DISEÑO E INSTALACION DE TECHO VERDE.**

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, considero que llena los requisitos exigidos para su aprobación final.

Agradeciendo de antemano la atención prestada a la presente, me suscribo de usted como su atento y seguro servidor.



Ing. José Marcos Mejía Son
Colegiado No. 7401

JOSE MARCOS MEJIA SON
INGENIERO CIVIL COL. 7401
COLEGIO DE INGENIEROS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
05 de mayo de 2016

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jaime Daniel Toj López, quien contó con la asesoría del Ingeniero José Marcos Mejía Son.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. civil, Guillermo Francisco Melini Salguero
Jefe Del Departamento de Planeamiento



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
PLANEAMIENTO
USAC

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. José Marcos Mejía Son y del Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Jaime Daniel Toj López, titulado PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, julio 2016
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

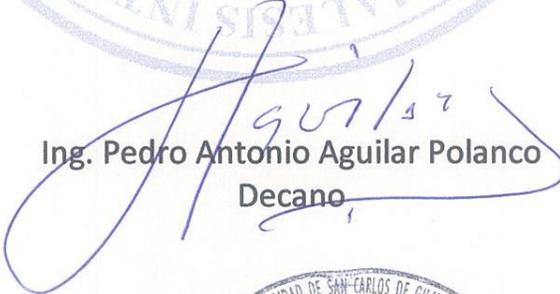


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 311.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA LA PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE**, presentado por el estudiante universitario: **Jaime Daniel Toj López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dios | Por ser el dador de la vida y la fuente de sabiduría. |
| Mis padres | Daniel Toj Mendoza y Cecilia López de Paz, por enseñarme con temor y amor a Dios valores con que viviré siempre. |
| Mi novia | Sucely de León. |
| Mis hermanos | Francisco, María, José, Iris, Jorge, Mónica, William, Cristian, Luis y Sandra Toj López. |
| Iglesia Dios de Pactos | Pastor Hugo González y familia, Faustino Morales, familias Sis, Vargas, Xulu, De León, Macario y Canil. |
| Mis tíos, primos y demás familiares | |
| Mis amigos de toda la vida, amigos y compañeros de trabajo, amigos de la Universidad | |
| Facultad de Ingeniería | |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | |

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Porque él es dueño y creador de todo cuanto existe, sin el nada soy, dándome el valor y la perseverancia para llegar a este momento.

Mi asesor

Ingeniero José Marcos Mejía Son, por haber apoyado el presente trabajo de graduación.

Mis amigos

Carlos Castillo y Carlos Samayoa.

**El ingeniero Guillermo
Francisco Melini Salguero,
coordinador de Área de
Planeamiento**

**La Facultad de Ingeniería,
Escuela de Ingeniería Civil
de la Universidad San Carlos
de Guatemala**

**A todas las personas que me
han dado sus conocimientos
en la elaboración del
presente trabajo de
graduación**

ÍNDICE GENERAL

| | |
|------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XI |
| GLOSARIO | XIII |
| RESUMEN..... | XVII |
| OBJETIVOS..... | XIX |
| INTRODUCCIÓN | XXI |
| | |
| 1. DESARROLLO URBANO..... | 1 |
| 1.1. Definición..... | 1 |
| 1.2. Generalidades | 1 |
| 1.3. Urbanización..... | 3 |
| 1.3.1. Definición | 4 |
| 1.3.2. Gestión | 4 |
| 1.3.3. Fases..... | 6 |
| 1.3.4. Tipos..... | 9 |
| 1.3.5. Aspectos ambientales..... | 11 |
| 1.4. Desarrollo urbano en Guatemala..... | 12 |
| 1.4.1. Antecedentes..... | 13 |
| 1.4.2. Actualidad y desarrollo | 13 |
| 1.5. Regulaciones aplicables | 14 |
| 1.5.1. En Guatemala..... | 14 |
| 1.5.2. Otros países | 16 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------|----|
| 2. | IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS EDIFICACIONES | 19 |
| 2.1. | Definición | 19 |
| 2.2. | Generalidades | 19 |
| 2.3. | Fases del proyecto | 20 |
| 2.3.1. | Diseño y planificación | 20 |
| 2.3.2. | Construcción | 21 |
| 2.3.3. | Operación y mantenimiento..... | 22 |
| 2.4. | Características | 23 |
| 2.5. | Tipos | 25 |
| 2.6. | Medidas de mitigación..... | 28 |
| 3. | TECHOS VERDES | 31 |
| 3.1. | Definición | 31 |
| 3.2. | Actualidad y desarrollo de los techos verdes | 31 |
| 3.3. | Características | 33 |
| 3.4. | Tipos | 35 |
| 3.5. | Regulaciones aplicables..... | 38 |
| 3.5.1. | En Guatemala | 38 |
| 3.5.2. | Otros países | 40 |
| 3.6. | Elementos que la componen..... | 42 |
| 3.6.1. | Soporte estructural | 43 |
| 3.6.2. | Sistema de desalojo de agua (drenaje)..... | 44 |
| 3.6.3. | Aislamiento térmico | 44 |
| 3.6.4. | Membrana antiraíz impermeabilizante | 45 |
| 3.6.5. | Capa drenante..... | 45 |
| 3.6.6. | Capa filtrante | 45 |
| 3.6.7. | Capa de sustrato | 45 |
| 3.6.8. | Capa de vegetación | 46 |
| 3.6.8.1. | Capa de vegetación extensiva | 46 |

| | | | |
|----|----------|---------------------------------------------------------------|----|
| | 3.6.8.2. | Capa de vegetación semiintensiva | 46 |
| | 3.6.8.3. | Capa de vegetación intensiva..... | 47 |
| | 3.6.9. | Naturación con sistemas fotovoltaicos o fototérmicos | 47 |
| | 3.6.10. | Acceso a la azotea | 47 |
| 4. | | CRITERIOS DE DISEÑO TECHOS VERDES..... | 49 |
| | 4.1. | Generalidades | 49 |
| | 4.2. | Tipo de naturación | 50 |
| | 4.3. | Requisitos mínimos para la instalación de un techo verde..... | 52 |
| | 4.3.1. | Requisitos previos para edificaciones nuevas | 52 |
| | 4.3.2. | Requisitos previos para edificaciones existentes.... | 54 |
| | 4.4. | Parámetros de naturación | 55 |
| | 4.4.1. | Pendiente del techo | 56 |
| | 4.4.2. | Consideraciones de carga | 56 |
| | 4.4.3. | Altura del techo y orientación al cielo | 57 |
| | 4.4.4. | Transporte y colocación del sustrato | 57 |
| | 4.4.5. | Drenaje | 58 |
| | 4.4.6. | Control de plagas..... | 58 |
| | 4.4.7. | Prevención de incendios..... | 59 |
| | 4.5. | Prevención de accidentes..... | 59 |
| | 4.6. | Operación y mantenimiento de un techo verde | 59 |
| 5. | | BENEFICIOS TECHOS VERDES | 61 |
| | 5.1. | Tipos..... | 61 |
| | 5.1.1. | Beneficios ambientales | 62 |
| | 5.1.1.1. | Calidad del aire..... | 62 |
| | 5.1.1.2. | Control de la humedad | 63 |
| | 5.1.1.3. | Creación de hábitats..... | 63 |

| | | | |
|--------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| | 5.1.1.4. | Regulación de la temperatura | 63 |
| | 5.1.1.5. | Retención de agua | 65 |
| 5.1.2. | | Beneficios económicos..... | 65 |
| | 5.1.2.1. | Aislamiento térmico | 66 |
| | 5.1.2.2. | Vida útil de la cubierta | 67 |
| 5.1.3. | | Beneficios estéticos..... | 67 |
| | 5.1.3.1. | Espacio útil | 67 |
| | 5.1.3.2. | Creación de hábitats..... | 68 |
| | 5.1.3.3. | Mejoramiento visual..... | 69 |
| 5.1.4. | | Beneficios fiscales..... | 70 |
| 5.1.5. | | Beneficios de salud | 70 |
| | 5.1.5.1. | Aislamiento térmico | 71 |
| | 5.1.5.2. | Aislamiento acústico..... | 71 |
| 5.1.6. | | Beneficios sociales..... | 72 |
| | 5.1.6.1. | Aislamiento acústico..... | 72 |
| | 5.1.6.2. | Retención de agua | 72 |
| 6. | | REVISIÓN ESTRUCTURAL | 75 |
| 6.1. | | Generalidades..... | 75 |
| 6.2. | | Edificación existente..... | 76 |
| | 6.2.1. | Tipo de cubierta..... | 77 |
| | 6.2.2. | Tipo de materiales..... | 78 |
| | 6.2.3. | Evaluación de grietas o fisuras..... | 79 |
| | 6.2.4. | Evaluación estructural | 80 |
| | | 6.2.4.1. Evaluación parámetros estructurales, estructura existente | 82 |
| 6.3. | | Edificación nueva | 91 |
| | 6.3.1. | Losas..... | 92 |
| | 6.3.2. | Características de los materiales | 93 |

| | | |
|----------------------|---------------------------------------------|-----|
| 6.3.3. | Descripción del sistema de naturación | 94 |
| 6.3.4. | Diseño estructural..... | 94 |
| 6.3.4.1. | Análisis de cargas..... | 95 |
| 6.3.4.2. | Peralte mínimo..... | 100 |
| 6.3.4.3. | Cortante de la losa..... | 101 |
| 6.3.4.4. | Acero de refuerzo | 101 |
| CONCLUSIONES | | 105 |
| RECOMENDACIONES..... | | 107 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 109 |
| APÉNDICES | | 111 |
| ANEXOS..... | | 113 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. | Evolución de la población urbana, 1975-2010. Datos de las Naciones Unidas | 3 |
| 2. | Usos de azoteas verdes | 32 |
| 3. | Azotea verde, Kawilal Hotel Guatemala | 39 |
| 4. | Usos de azoteas verdes en las grandes ciudades | 41 |
| 5. | Elementos que componen una azotea verde | 43 |
| 6. | Tipos de rebosaderos, para azoteas verdes | 44 |
| 7. | Accesos y caminamientos en azoteas verdes..... | 48 |
| 8. | Derrumbe de la cubierta de un centro comercial en la capital Letona, Riga, España..... | 53 |
| 9. | Proceso instalación azotea verde..... | 60 |
| 10. | Termofotografía de cubierta verde de edificio | 64 |
| 11. | Proyección del avance del uso de azoteas verdes en Buenos Aires .. | 68 |
| 12. | Impacto visual, proyecto de azoteas verdes..... | 69 |
| 13. | Planta de losas, edificación existente..... | 77 |
| 14. | Detalle sistema de naturación propuesto, edificación existente | 81 |
| 15. | Diagrama de momentos calculados, edificación existente | 85 |
| 16. | Diagrama de momentos balanceados, edificación existente..... | 88 |
| 17. | Planta de losas, edificación nueva | 93 |
| 18. | Resultados valores de momentos calculados, edificación nueva..... | 97 |
| 19. | Resultados valores de momentos balanceados, edificación nueva .. | 100 |

TABLAS

| | | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. | América latina y el caribe: concentración de la población en ciudades grandes, 1950-2010 | 2 |
| II. | Principales roles del ingeniero residente | 6 |
| III. | Principales elementos contaminantes que se pueden hallar en los edificios, sus efectos y las posibles soluciones | 24 |
| IV. | Características de cubiertas verdes..... | 34 |
| V. | Tipos de techos verdes..... | 37 |
| VI. | Fases de ciclo de vida de un sistema de techo verde..... | 50 |
| VII. | Criterios establecidos por IGRA para la naturación de una azotea verde | 51 |
| VIII. | Evacuación de agua pluvial en porcentaje según sistema de naturación | 58 |
| IX. | Pendientes mínimas en cubiertas de acuerdo con Agies | 76 |
| X. | Resumen de información de materiales, edificación existente | 79 |
| XI. | Resumen de información de edificación existente..... | 79 |
| XII. | Resumen de información de cargas, edificación existente | 83 |
| XIII. | Resumen de cálculo de momentos actuantes, edificación existente ... | 85 |
| XIV. | Resumen de resultados de valores de cargas y momentos, edificación existente (incluye sistema de naturación) | 86 |
| XV. | Resumen de valores de momentos balanceados, edificación existente (A)..... | 86 |
| XVI. | Resumen de valores de momentos balanceados, edificación existente (B)..... | 87 |
| XVII. | Resumen de resultados de acero refuerzo edificación existente (incluye sistema de naturación) | 90 |
| XVIII. | Espesor mínimo de losas macizas de acuerdo con Agies | 91 |
| XIX. | Resumen de información de materiales, edificación nueva | 94 |

| | | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| XX. | Resumen de información de cargas, edificación nueva | 95 |
| XXI. | Resumen de cálculo de momentos actuantes, edificación nueva | 96 |
| XXII. | Resumen de resultados de edificación nueva (incluye sistema de naturación) | 98 |
| XXIII. | Resumen de valores de momentos balanceados, edificación nueva (A)..... | 98 |
| XXIV. | Resumen de valores de momentos balanceados, edificación nueva (B)..... | 99 |
| XXV. | Resumen de resultados de acero refuerzo edificación nueva (incluye sistema de naturación)..... | 103 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------------|---------------------------------------------------------|
| A | Área |
| d | Día |
| F_y | Fluencia del acero, resistencia a la tensión |
| h | Hora |
| m | Metro |
| mg/L | Miligramos por litro |
| N, n | Número de casos y de años |
| W_c | Peso específico del concreto |
| % | Porcentaje |
| f_c | Resistencia a la compresión de un espécimen de concreto |
| Σ | Sumatoria |
| T | Tiempo |
| U | Unidad |

GLOSARIO

| | |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Azotea (techo) verde | Es el techo de una edificación que está parcial o totalmente cubierto de vegetación ambiental. |
| Carga muerta | Es la carga permanente que actúa sobre la estructura del techo. Este producto es el peso propio de todos los elementos del sistema de techo verde en estado de saturación, incluyendo la vegetación en su máximo estado de desarrollo. |
| Carga viva | Es la carga no permanente o variable que actúa sobre la estructura del techo. Esto incluye el peso total del agua que puede almacenar el sistema, el tránsito de personas y los equipos y elementos auxiliares de mantenimiento. |
| Conductividad térmica | Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. |
| Chaflán | Esquina cortada por un plano que forma un ángulo con cada una de sus caras. |
| Cubierta | Conjunto de elementos utilizados para el encerramiento de la última capa, la cual tendrá contacto con el exterior. |

| | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desarrollo sostenible | Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas. Esto sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. |
| Edificación existente | Cualquier edificación que se pretenda naturalar, la cual haya sido construida previo a la intención de naturalarla y consecuentemente, la naturación no es parte integral del proyecto inicial. |
| Edificación nueva | Cualquier edificación en la que el sistema de naturación forme parte integral del proyecto inicial. Esto previo a la etapa de construcción de la edificación en su conjunto. |
| Estanquidad | Capacidad de un elemento para un perfecto sellado entre uniones. |
| Formación de pendiente | Acción de generar pendiente, en un elemento constructivo dado. Esto por medio de elementos de espesor variable con el fin de facilitar la evacuación del agua hacia los sumideros, desagües o bajadas de agua. |
| Fotosíntesis | Proceso químico que tiene lugar en las plantas con clorofila y que permite, gracias a la energía de la luz, transformar un sustrato inorgánico en materia orgánica rica en energía. |

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Impermeabilidad | Propiedad de la unión de dos cuerpos para impedir el paso de líquidos a través de estos. |
| Inercia térmica | Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe del entorno. Depende de la masa, del calor específico de sus materiales y del coeficiente de conductividad térmica de estos. |
| Isla de calor | Es una situación urbana, de acumulación de calor por la inmensa mole de concreto, y demás materiales absorbentes de calor. Lo atmosférico que se da en situaciones de estabilidad por la acción de un anticiclón térmico. |
| Pretil | Muro de poca altura, formado por la elevación de los muros exteriores de un edificio que sobresale por encima de la cubierta. |
| Proyecto de construcción | Conjunto de cálculos y dibujos que se hacen para planificar y ejecutar lo que ha de ser una obra de arquitectura o de ingeniería. |
| Sedimentación | Es el proceso por el cual un sedimento se deposita en el fondo de un río, embalse, tanque, otras. |

| | |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de naturación | Es la instalación que se otorga a las superficies horizontales o inclinadas. Estas cuentan con diversas capas adaptadas a sus condiciones físicas y mecánicas de la estructura, creando una superficie vegetativa. |
| Soporte base | Elemento constructivo que recibe directamente el impermeabilizante antiraíz o membrana impermeabilizante antiraíz, puede coincidir o no con el elemento estructural (soporte estructural) y suele ser el elemento que forma la pendiente. |
| Soporte estructural | Elemento constructivo que soporta el peso de las demás capas del sistema de naturación y lo distribuye hacia las vigas, cadenas de cerramiento, muros de carga, y otros. para su posterior descenso hacia la cimentación. |
| Urbanización | Es un conjunto de construcciones delimitadas por los servicios básicos como calles de acceso, servicios de agua potable y drenaje y energía eléctrica. |
| POT | Plan de Ordenamiento Territorial. |

RESUMEN

El uso de vegetación en el ámbito urbano acarrea una gran cantidad de beneficios, como el mejoramiento del ambiente físico inmediato. Así también proporcionar bienestar físico y psicológico al ser humano. Una azotea verde es una técnica de ingeniería que logra el desarrollo de vegetación en el sector superior de las viviendas y edificios (ya sea en cubiertas o azoteas), conservando protegida su estructura. La cubierta es una estructura bajo gran cantidad de fluctuaciones térmicas y a una enorme exposición solar en verano.

Utilizar azoteas verdes contra el paso libre de calor y de ruido por las cubiertas hacia el interior de los edificios es un desafío que debe ser enfrentado en los diseños de las edificaciones. Como una opción a la construcción sostenible, se encuentran las azoteas verdes generadoras de nuevos espacios ajardinados en las grandes urbes, donde cada vez son más escasos.

Este estudio se enfoca en la construcción de las cubiertas verdes, en la exposición de sus sistemas y métodos de construcción. Además de identificar sus principales beneficios.

OBJETIVOS

General

Elaborar un documento que sirva de guía en la planificación, diseño e instalación de un techo verde de cualquier tipo, sin considerar el tipo de edificio (estructura) en el que se desee desarrollar el proyecto.

Específicos

1. Presentar y señalar la aplicación e importancia que la ingeniería civil tiene en la gestión ambiental de proyectos de urbanizaciones.
2. Identificar y presentar las diferentes fases que se presentan en la planificación, diseño e instalación de un techo verde.
3. Identificación de los aspectos e impactos ambientales significativos relacionados con la planificación, diseño e instalación de un techo verde.
4. Establecer la metodología para la revisión estructural de un inmueble sobre el cual se desee la instalación de un techo verde.
5. Conocer los diferentes tipos de beneficios que otorga la instalación de un techo verde en un inmueble.
6. Conocer las regulaciones existentes en Guatemala relacionadas con el tema propuesto.

7. Generar un documento que sirva de apoyo al estudiante y profesional de la ingeniería civil sobre el tema.

8. Generar una metodología para la planificación, diseño e instalación de un techo verde, impulsando la participación del ingeniero civil en dichas actividades.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano a nivel mundial y en Guatemala se enfrenta a grandes retos. Las cubiertas convencionales de los edificios constituyen superficies grises e impermeables que contribuyen al efecto de isla de calor en las ciudades e incrementan los problemas de inundaciones. La popularidad de los espacios verdes también se refleja en los valores inmobiliarios.

Las azoteas verdes tienen las mismas funciones tradicionales de cualquier otro sistema de cubierta (protección, impermeabilización, aislamiento acústico y térmico). Además ofrecen protección frente a la radiación solar, disminuyen la velocidad de permeabilidad y aprovechan el efecto amortiguador de la temperatura que tiene la tierra gracias a su inercia térmica. De este modo se reducen tanto las pérdidas como las ganancias excesivas de energía o calor a través de la cubierta.

Los techos verdes se pueden aplicar en cualquier bloque de edificios, vivienda particular, local comercial u otra construcción. Esto permite mejorar las condiciones de consumo energético del edificio, las condiciones ambientales del entorno y aumentar los necesarios espacios naturalizados en los entornos urbanos, tan faltos de espacios verdes.

El presente trabajo de graduación busca presentar las ventajas de las azoteas verdes, sobre los demás sistemas de cubiertas que benefician tanto a la construcción como al medio que la rodea.

1. DESARROLLO URBANO

1.1. Definición

Proceso de adecuación y ordenamiento, a través de la planeación del medio urbano, en sus aspectos físicos, económicos y sociales; implica además de la expansión física y demográfica, el incremento de las actividades productivas, la elevación de las condiciones socioeconómicas de la población, la conservación y mejoramiento del medio ambiente y el mantenimiento de las ciudades en buenas condiciones de funcionamiento. El desarrollo urbano persigue el equilibrio entre los aspectos físicos, económicos y sociales, siendo diferente del crecimiento parcial de algunos de estos que en ocasiones es interpretado como desarrollo. El desarrollo urbano debe ser concebido en forma integral con el desarrollo regional o territorial, ya que difícilmente se da en forma independiente.¹

1.2. Generalidades

El concepto del desarrollo urbano regional se relaciona con los temas del urbanismo y la planificación, diferentes actores sociales intervienen en el proceso de planificación urbana y desarrollo. El desarrollo urbano se considera como el aumento de los servicios básicos en las ciudades, especialmente para la población de bajos ingresos y la calidad de estos. El crecimiento de la población en la mayoría de las ciudades obliga a la expansión; el desarrollo urbano es un proceso consumidor de tiempo y de recursos (gubernamentales y privados).

Una ciudad es un área con una alta densidad de población y cuyos habitantes. Esto por lo general, no se dedica a las actividades agrícolas y presentan características como el predominio de las viviendas verticales y

¹ LANDA, Horacio. *Glosario desarrollo urbano*. http://www.hical.org/glosario_definicion.cfm?id_entrada=19. Consulta: febrero de 2015.

colectivas (los edificios), el poco terreno destinado a los espacios verdes y la buena infraestructura en materia de transportes y comunicaciones.

América Latina es la región más urbanizada del mundo en desarrollo. Dos tercios de la población latinoamericana vive en ciudades de 20 000 habitantes o más y casi un 80 % en zonas urbanas.

Tabla I. **América latina y el caribe: concentración de la población en ciudades grandes, 1950-2010**

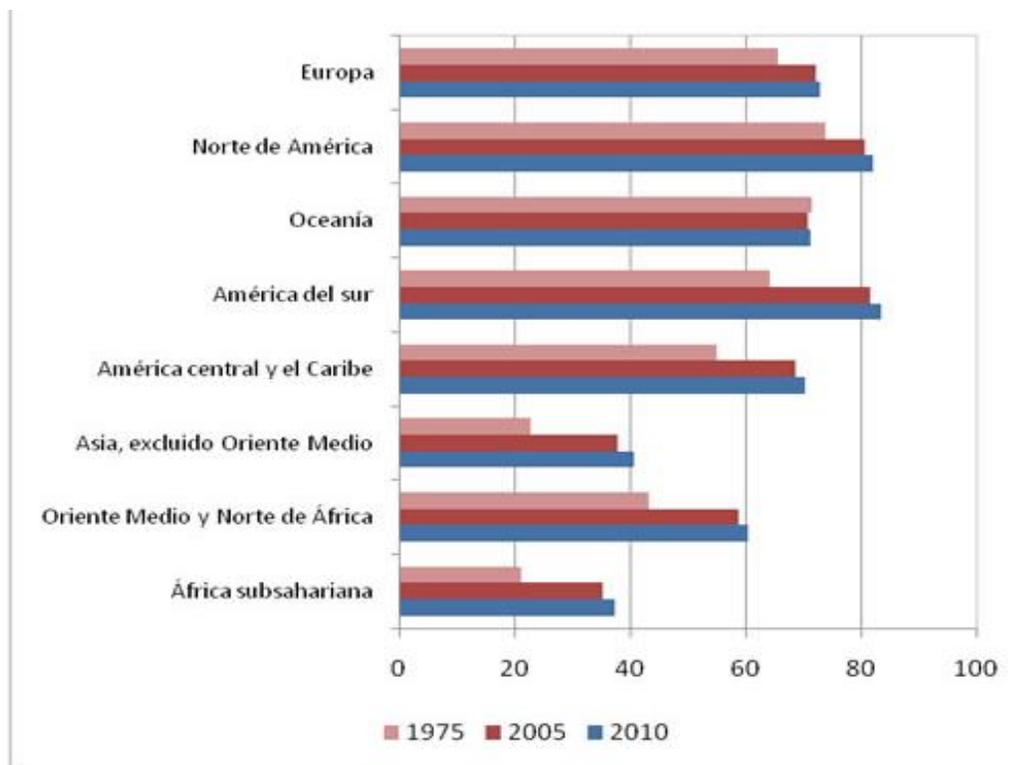
| | Ciudades de un millón o más de habitantes en | | | | | | |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 |
| Número de ciudades | 8 | 11 | 17 | 26 | 38 | 48 | 56 |
| Población (en miles de personas) | 17 981 | 30 070 | 53 965 | 86 003 | 119 737 | 156 623 | 186 185 |
| Porcentaje de la población total | 11,1 | 14,1 | 19,4 | 24,3 | 27,6 | 30,6 | 32,0 |
| Porcentaje de la población urbana | 26,8 | 28,7 | 33,8 | 37,1 | 38,9 | 40,5 | 40,2 |

Fuente: Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE) - División de Población de la CEPAL, sobre la base de Naciones Unidas, *Perspectivas de urbanización mundial: Revisión 2010* y *Perspectivas de urbanización mundial: Revisión 2007* <http://esa.un.org/unup>. Consulta: febrero de 2015.

1.3. Urbanización

Es un proceso que concentra a la población y las actividades en las ciudades, lo que conlleva cambios no solo demográficos, sino también económicos. La noción de urbanización varía según el país, sin embargo se vincula al desarrollo urbano planificado, con viviendas que comparten una estructura similar.

Figura 1. **Evolución de la población urbana, 1975-2010. Datos de las Naciones Unidas**



Fuente: Gobierno de Aragón. *El proceso de urbanización.*

http://www.aularagon.org/files/espa/espasociales/bloque2/Unidad_03/imagenes/125.jpg

Consulta: marzo de 2015.

Con el transcurso de los años han ido apareciendo diferentes tipos de actividades de planificación en los países en desarrollo. Últimamente se han realizado diversos proyectos de urbanizaciones ecológicas en varios países, y todos coinciden en dos objetivos primordiales: utilizar energías renovables y preservar la biodiversidad.

1.3.1. Definición

“Urbanización es la acción y efecto de urbanizar y el núcleo residencial urbanizado. El término suele utilizarse para nombrar al conjunto de construcciones levantadas en un antiguo medio rural.”²

“Proceso de desarrollo de las ciudades y de concentración de la población en los núcleos urbanos. La urbanización implica la transformación de un espacio natural o rural en un espacio urbano. Este proceso ha provocado en los últimos decenios tanto un incremento del número de ciudades, como un incremento del número de personas que viven en ellas.”³

1.3.2. Gestión

Es el conjunto de todas las tareas, organizaciones, técnicas y medios de dirección, para la completa realización de un proyecto. Actualmente se distinguen tres actores centrales en los procesos de planificación urbana: el Estado, la sociedad civil y el sector privado.

² *Definición de urbanización.* <http://definicion.de/urbanizacion/>. Consulta mayo de 2016.

³ JEREZ Óscar. *Vocabulario de términos geográficos.* <http://vocabulariogeografico.blogspot.com/2012/02/urbanizacion.html>. Consulta: enero de 2015.

La gestión urbanística es una especialidad dentro del campo del urbanismo y de la profesión de urbanista, tradicionalmente estudiada también por arquitectos, ingenieros y abogados. Comprende el conjunto de prácticas que establecen la forma técnico jurídica de ejecutar los planes urbanísticos.

La gestión ambiental urbana tiene como fin mantener y preservar el ambiente urbano, y redefinir en el tiempo y en el espacio las relaciones entre los seres humanos y su ambiente, en especial en relación a los patrones de vida y consumo. Esta redefinición procura revertir los efectos de la degradación del suelo, del aire y agua producidos por los modelos de desarrollo urbano insostenibles que reiteran la exclusión y empeoran las condiciones y calidad de vida de los seres humanos que habitan las ciudades. “La OMS recomienda de 10 a 15 m² de superficie verde por habitante.”⁴

El manejo de proyectos de magnitudes importantes como en el caso de una urbanización, requiere de conocimientos administrativos. El ingeniero residente debe verificar la obra para verificar su calidad y si esta cumple conforme las bases, especificaciones técnicas, económicas, disposiciones especiales y conforme a los planos de construcción.

⁴ Plataforma CAT-MED. *Indicadores*. <http://www.catmed.eu/dic/es/50/zonas-verdes-y-areas-de-esparcimiento>. Consulta: mayo de 2016.

Tabla II. **Principales roles del ingeniero residente**

| Categoría | Rol | Descripción |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Interpersonales | Líder | Responsable de guiar y capacitar a sus subordinados. |
| | Autoridad | Obligado de realizar sus deberes diarios de trabajo. |
| Informativo | Supervisor | Chequea, busca y recibe información. |
| | Difusor | Transmite información a sus subordinados. |
| De decisión | Manejo de problemas | Responsable de las acciones correctivas cuando existen problemas. |
| | Distribuidor de recursos | Distribución de recursos asignados al proyecto. |

Fuente: ROBBINS y COULTER (2005). *Administración*. p. 54.

1.3.3. Fases

Si se habla del proceso de urbanización, en general, puede decirse que presenta tres grandes fases:

- Una fase inicial de fuerte crecimiento, en la que una zona, una región o un país dejan de ser considerados rurales y pasan a serlo urbanos. Las causas de este fuerte desarrollo urbano son dos:
 - La existencia de una potente corriente migratoria que lleva población del campo a la ciudad. Esta población es adulta joven y busca mejores condiciones de vida.

- La acumulación de población joven (en edad de tener hijos) en las ciudades, como resultado de la emigración del campo a la ciudad, hace que su crecimiento natural sea mayor. Mientras que el mundo rural envejece (quedan los mayores, los que no tienen edad para emigrar) y tiene tasas de crecimiento menores o, incluso, negativas.
- Una larga fase posterior en la que las ciudades siguen creciendo pero de forma más lenta. En esta fase la corriente migratoria desde el mundo rural se suaviza y, a la vez, el porcentaje de población joven, en edad de tener hijos, de la ciudad tiende a estabilizarse.
- Una fase reciente en la que las grandes ciudades dejan de crecer, haciéndolo las localidades más pequeñas que se encuentran en la zona rural próxima y bien comunicada con la gran ciudad. En esta fase las corrientes migratorias cambian:
 - Sigue saliendo lentamente población desde una gran parte del mundo rural hacia el urbano, pero ahora lo hace hacia ciudades de tamaño medio o pequeño.
 - Comienza a salir población desde las grandes ciudades hacia las zonas rurales que se encuentran próximas a ellas, donde la población joven encuentra residencia precios más razonables o donde se ofrecen puestos de trabajo de fábricas, almacenes, entre otros. Estas sedes empresariales se encuentran en las ciudades, pero cuyas factorías, fábricas, naves de almacenaje, talleres, otros se alojan en ese mundo rural.

La mayor parte del mundo desarrollado ya ha pasado por la primera y segunda fase. Mientras que el mundo en desarrollo se encuentra en la primera o segunda, y el subdesarrollado, especialmente las zonas más pobres de Asia o del África subsahariana se encuentran en la primera.

Cuando se trata de proyectos de urbanización, en general, puede decirse que presenta las siguientes fases:

- Planificación: este proceso es el que define el control de la ejecución de la urbanización, desde que se genera la idea del proyecto.

- Construcción de un proyecto de urbanización: existe una serie de factores que afectan el buen resultado de la ejecución. Por ello es necesario controlar de manera exhaustiva cada uno de los recursos con los que se cuenta para llevar a cabo el desarrollo urbanístico.
 - Trabajos preliminares
 - Movimiento de tierras
 - Sistemas de drenajes
 - Instalación de agua potable
 - Instalaciones especiales
 - Canalización eléctrica
 - Pavimentos
 - Limpieza general

- Cierre, liquidación del proyecto.

1.3.4. Tipos

Ante el creciente desarrollo urbano, la delimitación de una zona urbana contempla diferentes factores que varían de acuerdo al país.

En el año 2000 aproximadamente 37 % de la población urbana del mundo vivía en ciudades de 1 millón o más de habitantes; 53 % vivía en centros urbanos con menos de 500 000 habitantes. Las Naciones Unidas proyecta que la mayor parte del aumento de la población urbana hasta 2015 será en dichas áreas urbanas pequeñas.⁵

Los tipos de urbanización varían según el criterio que se aplique. A continuación se presentan algunos:

- Según su funcionamiento:
 - Una urbanización puede ser un barrio o un minibarrío
 - Si es urbanización cerrada se convierte en condominio

- Según la densidad habitacional:
 - Baja densidad: son construcciones de viviendas unifamiliares, individuales y aisladas.
 - Alta densidad: son pequeños edificios de apartamentos o viviendas multifamiliares.

⁵ BOTTINO BERNARDI, Rosario. *La ciudad y la urbanización*. http://www.estudioshistoricos.org/edicion_2/rosario_bottino.pdf. Consulta: enero de 2015.

- Según tipo de servicio
 - Habitacional
 - Industrial
 - Mixto

A partir de la década de 1990, las urbanizaciones cerradas se han multiplicado en la mayoría de las grandes y medianas ciudades del mundo. Estas se caracterizan por contar con límites físicos, dispositivos de seguridad y una creciente privatización del espacio público y de la organización social dentro de las mismas.

Desde el punto de vista social y demográfico existen diferentes tipos de urbanización:

- Rururbanización: la ciudad influye sobre las zonas rurales que la rodean. La demanda de suelo provoca un aumento de los precios del terreno en el centro de la ciudad. Por eso, diversos usos tradicionalmente urbanos están situándose sobre suelo rural, que es mucho más barato. El avance de la ciudad sobre el medio rural se denomina rururbanización.
- Contra urbanización: se definir como el proceso de movimiento de personas y actividades económicas desde las áreas urbanas hacia las rurales. En ella se invierte la dirección de los tradicionales flujos migratorios campo-ciudad.

- Periurbanización: espacio periurbano es el espacio geográfico que ocupa el espacio intersticial dejado libre por el espacio urbano dentro de una aglomeración urbana. No cumple funciones propiamente urbanas (de una ciudad) ni propiamente rurales (de un núcleo rural).
- Suburbanización: el fenómeno de propagación de una ciudad y sus barrios hacia la tierra rural en la periferia de una zona urbana. La baja densidad de población es un indicador de la dispersión

1.3.5. Aspectos ambientales

El desarrollo de este tipo de proyectos resuelve parcialmente las necesidades demográficas. Estas se crean nuevas fuentes de riqueza, no solo por la construcción de las mismas, sino también por la actividad económica que se genera. No todo son ventajas en las urbanizaciones, hay urbanistas y sociólogos que ponen de relieve algunos inconvenientes: la pérdida de suelo rural y el crecimiento desmedido de las ciudades.

Cualquier intervención urbanística, cualquier edificación causa un impacto en el medioambiente. El crecimiento urbano, la necesidad de construir nuevas viviendas y la expansión de nuevos centros poblados ha generado la necesidad de dar nuevos usos a los suelos que en su época no tenían destino habitacional. Los impactos ambientales directos de la urbanización se dan a nivel regional, local y de sitio.

Miles de metros cuadrados han sido redestinados al uso, por parte de las personas, para emplazar sus nuevos destinos habitacionales. Las urbanizaciones mal diseñadas, aún en sitios esencialmente apropiados,

pueden ser dañinas para el medio ambiente, y poner en peligro la salud y bienestar de sus habitantes.

El tema ambiental en las ciudades, desde una perspectiva global es un fenómeno nuevo. Los esfuerzos por mejorar las condiciones ambientales se limitaron a la construcción progresiva de sistema de captación de agua y transporte de aguas servidas, sistemas de recolección de basura, entre otros.

La década de 1960, y con más fuerza en décadas posteriores, el creciente interés por la ecología, la temática ambiental y por último el desarrollo sostenible se consideró que incorporar la dimensión ambiental en la ciudad se traducía en obras de infraestructura de interés colectivo. La contaminación en las ciudades es mayor debido al tránsito, la congestión de vehículos y la generación y recolección deficiente de residuos.

Las urbanizaciones se relacionan con el aumento de la pobreza urbana y la gran desigualdad en las ciudades. Además la emigración a gran escala tiende a causar un deterioro a largo plazo de la infraestructura física y humana.

1.4. Desarrollo urbano en Guatemala

La razón principal de la urbanización de la población es la migración de áreas rurales a estas áreas urbanas. Para alcanzar el desarrollo urbano es necesaria una cautelosa planeación por ingenieros y diseñadores civiles, administradores de proyectos, arquitectos, planeadores ambientales y supervisores.

1.4.1. Antecedentes

Desde su fundación en 1776 en el Valle de la Ermita, el crecimiento de la ciudad de Guatemala ha seguido un proceso de acuerdo a sus características naturales propias. El valle estaba ubicado en la intersección de las carreteras que conectaban a las regiones del nororiente, oriente, occidente y sur del país que, a su vez, comunicaban a los países vecinos. El crecimiento se dio en los lugares aledaños a esas vías de comunicación y por la incorporación de infraestructura, entre otras causas.

1.4.2. Actualidad y desarrollo

El crecimiento físico del área Metropolitana del Departamento de Guatemala (AMG), ha sido promovido por medio de diferentes agentes sociales. Estos han establecido sus lógicas en la ocupación y producción de nuevos territorios urbanos y rurales.

La ciudad de Guatemala ha crecido más en la última década que en toda su historia previa. Esto según el último censo de población, el municipio de Guatemala tiene 942 348 habitantes (el 8,39 % del total del país), y ocupa un área de 184 km², el 0,17 % del territorio nacional. La densidad poblacional es de 5 121 personas por km², tres veces más que en la región metropolitana, y 50 más que el promedio nacional, de 103 habitantes en la misma proporción.

Como consecuencia de varios factores, la urbe afronta dificultades con el transporte colectivo, congestionamiento vial, dotación de servicios y contaminación ambiental. En los últimos años, la violencia urbana y vulnerabilidad ante desastres naturales. Guatemala se está transformando cada vez en más urbana y menos rural. En este momento el 52 % de

población vive en áreas urbanas y la tendencia es que se llegue al 75 % en los próximos 25 años.

Se genera una interacción entre las poblaciones urbanas y su medio ambiente, las personas que viven en zonas urbanas tienen un perfil de consumo muy diferente al de los residentes de áreas rurales.

Existe la opinión casi unánime que el aumento de la población urbana tiene grandes impactos en el medio ambiente, el mayor de los cuales es la contaminación de las aguas y los suelos, fruto, principalmente, de la inexistencia en algunos casos y la inadecuación en otros, de las redes de alcantarillado, de la falta de control sobre los residuos industriales y de la falta de regulación sobre los contaminantes químicos modernos.⁶

1.5. Regulaciones aplicables

La ejecución de cada proyecto se efectúa bajo especificaciones técnicas económicas, de disposición especial y de calidad. Esto construido por una empresa con la experiencia y la capacidad de llevar a cabo un proceso de control demostrando una buena administración y conforme normas, leyes y reglamentos de la construcción.

1.5.1. En Guatemala

Cada proyecto, de acuerdo a sus características tendrá que ser evaluado por diferentes instituciones. Es importante conocer que municipalidad tendrá a cargo el otorgamiento de las licencias de construcciones respectivas. A continuación se presentan las instituciones y reglamentos comunes que son aplicables a proyectos habitacionales en Guatemala:

⁶ Cátedra DOW/URV de Desarrollo Sostenible. *Aspectos medioambientales de la urbanización*. http://www.desenvolupamentsostenible.org/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=30&lang=es. Consulta: marzo de 2015.

- Ciudad de Guatemala: ante la falta de regulaciones sobre urbanismo, en la ciudad de Guatemala, se han diseñado distintos planes de ordenamiento y desarrollo urbano. Los más recientes, el Plan Metrópoli 2010 y el Plan 20-20. Con estas acciones la Municipalidad de Guatemala busca incentivar la construcción de proyectos más rentables, que lleven a construir una mejor ciudad con una mejor calidad de vida para todos los habitantes del municipio.

El nuevo Reglamento de Incentivos de Ordenamiento Territorial busca promover, en los desarrolladores de proyectos, acciones, conductas o iniciativas orientadas a mejorar la calidad de vida de los vecinos. Esto compensándolos con mayor rentabilidad en sus proyectos tiene carácter de disposición complementaria al Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

El POT es un cuerpo normativo básico de planificación y regulación urbana conformado por normas técnicas, legales y administrativas que la Municipalidad de Guatemala establece para regular y orientar el desarrollo de su territorio. Entre las acciones que la Municipalidad busca que los desarrolladores adopten se encuentran: proveer vialidades de alta calidad peatonal y ambiental, cumplir con las normas de accesibilidad para discapacitados, realizar proyectos de obra que provean un mayor porcentaje de área verde o la cesión urbanística de áreas de servicio público, entre otras.

- Reglamentos municipales: cada municipalidad tiene reglamentos para parcelamientos o urbanizaciones habitacionales, algunos más restrictivos que otros. Cada municipalidad tienen sus propios

parámetros. Cada vez las municipalidades están implementando nuevos reglamentos de acuerdo a la situación general.

- Reglamento del Fondo de Hipotecas Aseguradas (FHA): el FHA cuenta con sus normas de construcción de urbanizaciones. El Departamento Técnico es el encargado de calificar cada proyecto se incluyen también las normas para viviendas.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN): se tiene que contar con un estudio de impacto ambiental aprobado. Es importante conocer con anterioridad cuáles serán las imposiciones respecto a tratamientos de aguas negras y la conservación del recurso del agua subterránea.
- Reglamento de tala de árboles: generalmente es el Instituto Nacional de Bosques (INAB) el encargado de dictaminar respecto a la tala de árboles si así lo amerita el proyecto.

1.5.2. Otros países

Todos los países necesitan tener un cierto orden territorial y mantener un equilibrio entre las zonas rurales y las urbanas. El desarrollo urbano, la vivienda y la ecología constituyen espacios en que se manifiesta la calidad de vida de la población. Estos son reflejo y condición del desarrollo económico y social de un país; y en ella se sustentan las potencialidades de su desarrollo.

A continuación se presentan algunos antecedentes e información general sobre las regulaciones relacionadas con el tema de las urbanizaciones en diferentes países.

En 1909 Gran Bretaña aprobó ley de urbanismo, el mismo año se celebró el primer congreso Nacional sobre Urbanismo en los Estados Unidos. En 1931 en España se desarrollaron planes de renovación urbanística.

La necesidad de reconstrucción, después de la segunda guerra mundial, aportó un nuevo desarrollo al urbanismo y su regulación. Los países como Gran Bretaña, Holanda, Alemania, entre otros, establecieron mecanismos reguladores en cada país.

A finales de la década de 1960 la orientación del urbanismo fue más allá de los aspectos físicos; cubriendo temas de reglamentación social, económica y política. En la actualidad se utiliza el término neourbanismo, el que influye en las formas de pensar, construir y gestionar las ciudades. Este se apoya en una gestión más reflexiva adoptada a una sociedad compleja y un futuro incierto.

2. IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS EDIFICACIONES

2.1. Definición

Impacto ambiental: es la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada, en términos simples el impacto ambiental es la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.⁷

Impactos ambientales edificaciones: los edificios resultantes del proceso constructivo, así como las infraestructuras necesarias para favorecer la accesibilidad, ocupan y transforman el medio en el que se disponen.⁸

2.2. Generalidades

La ingeniería emplea la ciencia como herramienta para mejorar el desarrollo y bienestar del ser humano; el impacto causado por los edificios proviene de su construcción, de su uso y de su gestión como residuo tras la demolición. Tanto la construcción como la demolición son operaciones energéticamente intensas, pero poco significativas, si las comparamos con el uso del edificio a lo largo de su vida operativa.

Los impactos ambientales de las edificaciones influyen en el entorno en las distintas fases de su ciclo de vida:

⁷ Gestión en Recursos Naturales. *Impacto Ambiental*. <http://www.grn.cl/impacto-ambiental.html>. Consulta: diciembre de 2014.

⁸ Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. *Impactos Ambientales en el Sector de la Construcción*. http://www.construmatica.com/construpedia/Impactos_Ambientales_en_el_Sector_de_la_Construcci%C3%B3n. Consulta: enero de 2015.

- Producción: extracción y fabricación de materiales, diseño de la edificación y sus instalaciones.
- Ejecución: energético, visual, paisajístico.
- Operación: gasto energético consumo de agua, emisiones y residuos.
- Demolición o abandono: residuos de diferentes tipos.

Los impactos ocasionados no siempre son negativos. Se debe tener en cuenta que un estudio de impacto ambiental (EIA) permitirá identificar también aquellos positivos. Una correcta gestión permitirá evitar o amortiguar los primeros y potenciar los segundos.

2.3. Fases del proyecto

El impacto físico de los edificios en las ciudades genera un beneficio y también un problema, debiendo ser tenidos en cuenta en los criterios de definición del desarrollo urbano. Los edificios, a lo largo de su construcción, uso y demolición, ocasionan una gran cantidad de impactos ambientales. La gestión de un proyecto suele dividirse en diferentes etapas que conforman su ciclo de vida. Esto para la gestión del proyecto de construcción, primero habrá que concretar su ciclo de vida en etapas y procesos.

2.3.1. Diseño y planificación

Dentro de esta etapa se incluyen desde la idea del proyecto hasta la decisión definitiva de inversión. Cuando se decide si el proyecto se realiza o que los riesgos son demasiados para seguir.

Se debe concebir el diseño de las edificaciones de manera sostenible, buscando optimizar recursos naturales y sistemas de la edificación de tal modo que minimicen el impacto ambiental de los edificios sobre el medio ambiente y sus habitantes. Además una correcta interacción de elementos y sistemas constructivos que permita una desconstrucción racional.

La actividad de construcción estricta no es muy intensiva en consumo energético, no consume mucha energía en comparación con otras actividades humanas. Sin embargo, indirectamente la construcción y utilización de edificios e infraestructuras constituye una de las actividades humanas más intensivas en consumo energético.

2.3.2. Construcción

La construcción de edificios para viviendas y para oficinas, así como la edificación de infraestructuras de obra civil, son de las actividades humanas que consumen más materiales. Además crean problemas ambientales de contaminación atmosférica. En esta fase los sitios, donde se ubican los proyectos, se encuentran particularmente vulnerables a la alteración ambiental:

- La vegetación es eliminada, exponiendo el suelo a la lluvia, el viento, y otros elementos. La excavación y nivelación empeoran aún más esta situación.
- Aumenta el escurrimiento, resultando en la erosión y sedimentación. La maquinaria pesada y el almacenaje de materiales, compactan el suelo, haciéndolo menos permeable y destruyendo su estructura.

- La vegetación no eliminada puede ser dañada por el equipo de construcción; la actividad de construcción afecta además a las cercanías inmediatas del sitio. Por ejemplo, por la congestión de los caminos y puntos de acceso existentes y el mayor ruido y suciedad.

La construcción es una de las mayores consumidoras de los recursos naturales así como una de las causantes principales de la contaminación atmosférica. Por lo tanto se deben construir inmuebles sustentables. Se tiene que considerar que no todos los materiales de construcción tienen los mismos impactos ambientales. En el balance ambiental de los materiales se deben considerar diversos aspectos.

2.3.3. Operación y mantenimiento

Esta es una etapa que no siempre es considerada adecuadamente. Cada día está tomando más relevancia pues es fundamental para el buen funcionamiento y durabilidad de la estructura y debería ser considerada desde la etapa de diseño.

Durante la vida útil del edificio se utiliza gran cantidad de agua. Para el funcionamiento del edificio se necesita energía en forma de electricidad. Se utilizan, en una proporción importante, energías fósiles aumentando el riesgo del efecto invernadero.

El consumo de energía que supone mantener los ambientes interiores en unas condiciones adecuadas es el gasto energético más importante de los edificios. Esto causa uno de los mayores impactos sobre el medio ambiente, ya que se produce durante todo el período de funcionamiento de los edificios. Por ese motivo, el diseño de esas instalaciones está muy relacionado con el

diseño del edificio en cuanto a la ventilación, la circulación interior del aire y los cerramientos exteriores.

2.4. Características

Hay muchos factores que inciden en el bajo impacto ambiental de una construcción en general. Estos son el emplazamiento, la orientación, la ventilación, las instalaciones eléctricas, las aguas servidas, la calidad y el origen de los materiales.

El impacto de la construcción de un edificio en el medio ambiente se produce desde la fabricación de los materiales hasta la gestión de los residuos generados por su demolición. Esto es pasando por la fase de construcción y de utilización del edificio.

- El agua: los impactos relacionados con el agua incluyen todo los ámbitos relacionados con su ahorro y su posible contaminación al realizar vertidos de residuos.
- Las emisiones: las emisiones generadas por los edificios pueden afectar a la atmósfera, lo que se traduce en un impacto local o global.
- La energía: cualquier actuación que conlleve un ahorro energético supone a su vez una reducción de los impactos, ya sea por el ahorro de recursos no renovables (petróleo, carbón, otros) o por la reducción de emisiones de dióxido de carbono.
- Los recursos: es preferible utilizar materiales procedentes de recursos renovables. La reutilización y el reciclaje también son opciones válidas.

- Los residuos: el hecho de que un material se pueda reciclar al término de su vida útil, o que contenga otros materiales reciclables, es un aspecto que debe tenerse en cuenta. Deben rechazarse los materiales que se convierten en residuos tóxicos o peligrosos al final de su vida útil.

Tabla III. **Principales elementos contaminantes que se puede hallar en los edificios, sus efectos y las posibles soluciones**

| Material/Sustancia | Problema | Recomendación |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aglomerado de madera, <i>hardboard</i> | Emanaciones de formaldehído de las resinas ureicas y fenólicas. | Evitar principalmente los productos a base de formaldehído ureico. Es preferible el contrachapado. |
| Aislamiento de espuma plástica (poliuretano o PVC) | Emanaciones de componentes orgánicos volátiles. Humo muy tóxico al inflamarse. | Evitar su uso. Buscar sustitutos como la viruta de madera o el corcho aglomerado. |
| Aislamiento de fibra de vidrio | El polvo de lana de vidrio es un carcinógeno, la resina plástica ligante contiene fenol formaldehído. | Sellar, evitando el contacto de la fibra con el aire interior. |
| Alfombras sintéticas | Acumulan polvo, hongos y producen emanaciones de componentes volátiles. Los adhesivos aplicados también emiten gases nocivos. Se cargan fácilmente de estática. | Es preferible evitarlas, en especial en lugares donde pudieran humedecerse. Si deben usarse, no emplee adhesivos. Pedir bases de yute o lana y no de látex sintético. |
| Tuberías de cobre para agua (que requieran soldadura de plomo) | La soldadura de plomo (ya prohibida en muchos países) desprende partículas de este metal. | Solicitar soldadura sin plomo y contraflujo de vapor o agua sobrecalentada por el sistema antes de habilitar la instalación |
| Tuberías de plástico (PVC) para agua | Los solventes de los plásticos y adhesivos e hidrocarburos clorados se disuelven en el agua. | No utilizar cañerías de PVC para el agua potable. |

Continuación de la tabla III.

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cemento/concreto | Las gravas graníticas empleadas como áridos suelen ser radiactivas. | Existe la alternativa del bio-concreto; el cemento blanco es más sano que el gris. |
| Ladrillos refractarios | Contienen distintos porcentajes de aluminio tóxico. | Elegir los colores más claros, que contienen menos aluminio. |
| Pinturas sintéticas de interior | Emanan componentes orgánicos volátiles y gases de mercurio. | Exigir pinturas al agua, libres de mercurio y de baja toxicidad. Ventilar bien el edificio antes de ocuparlo. |
| Pisos vinílicos o plastificados | Producen emanaciones tóxicas del material y de los adhesivos. | Se puede sustituir por linóleo o corcho. El hidrolaqueado es menos tóxico que el plastificado. La cerámica es completamente no-tóxica. |
| Sistemas de aire acondicionado | Los filtros mal mantenidos desarrollan hongos, las parrillas de condensación albergan gérmenes aero patógenos, el sistema distribuye contaminantes. | Es mejor acondicionar el edificio que acondicionar el aire. Sistemas de calefacción y refrigeración solar pasiva son más sanos. |

Fuente: elaboración propia.

2.5. Tipos

El reto a superar por la industria de la construcción, en cualquiera de sus tipologías, sigue siendo fundamentalmente el empleo de materiales de construcción de bajo impacto ambiental. Esto dado que son los que más repercuten sobre el medio natural, sin descartar otros impactos relacionados con el consumo de energía o los residuos.

Los materiales con menor impacto ambiental, para su empleo en la edificación, deben incorporar criterios de sostenibilidad ambiental. Estos como alta eficiencia energética, durabilidad, recuperabilidad, recursos renovables, empleo de tecnología limpia y valorización de residuos.

Existen diversos tipos de impactos ambientales se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios.

- De acuerdo a su origen:
 - Impacto ambiental provocado por el aprovechamiento de recursos naturales ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal; o no renovables. Por ejemplo, la extracción del petróleo o del carbón.
 - Impacto ambiental provocado por la contaminación: todos los proyectos producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmósfera o vierten líquidos al ambiente.
 - Impacto ambiental provocado por la ocupación del territorio: los proyectos modifican las condiciones naturales por acciones tales como tala rasa, compactación del suelo y otras.

- De acuerdo a sus atributos:
 - Impacto ambiental positivo o negativo: el impacto se mide en términos del efecto resultante en el ambiente.

- Impacto ambiental directo o indirecto: si el impacto es causado por alguna acción del proyecto o es resultado del efecto producido por la acción.
- Impacto ambiental acumulativo: si el impacto es el efecto que resulta de la suma de impactos ocurridos en el pasado o que están ocurriendo en el presente.
- Impacto ambiental sinérgico: si el impacto se produce cuando el efecto conjunto de impactos, supone una incidencia mayor que la suma de los impactos individuales.
- Impacto ambiental residual: si el impacto persiste después de la aplicación de medidas de mitigación.
- Impacto ambiental temporal o permanente: el impacto es por un período determinado o es definitivo.
- Impacto ambiental reversible o irreversible: impacto que depende de la posibilidad de regresar a las condiciones originales.
- Impacto ambiental continuo o periódico: impacto que depende del período en que se manifieste.

2.6. Medidas de mitigación

En todo proyecto, para alcanzar los objetivos ambientales, se hace necesario el desarrollo de la política de gestión definida y clara. Apoyándose en las siguientes estrategias:

- Minimización y prevención
- Valorización
- Eliminación de residuos
- Protección del medio ambiente
- Colaboración, flexibilidad, información y comunicación.
- Tecnología e investigación

La mitigación es el resultado de la aplicación de un conjunto de medidas tendientes a reducir el riesgo y a eliminar la vulnerabilidad física, social y económica. Esto se constituye en una de las actividades más importantes, ya que permite llevar a cabo las acciones anticipadas, con el propósito de reducir significativamente las consecuencias esperadas por un evento. Las acciones de mitigación deben ser incorporadas en los programas de planificación y desarrollo del área afectada.

De acuerdo a la información disponible se pueden realizar las siguientes observaciones relacionadas con la mitigación: la primera opción. Por lo tanto, es prevenir en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda reutilizar, y valorizar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar.

- **Ubicación:** para evitar áreas ecológicamente frágiles, difíciles o inseguras, es la mejor manera, y con la mejor relación costo/eficiencia o costo/beneficio, de minimizar los impactos ambientales. Para evaluar correctamente las elecciones disponibles, se debe elaborar una base de datos que identifique y trace los principales recursos ambientales. Esto como importantes patrones de sistemas de drenaje natural de los suelos, tierras húmedas de agua dulce y salada, bosques y otros importantes hábitats naturales, tierra agrícola de primera calidad, entre otros.

La información de satélite, fotografía aérea, datos provenientes de fuentes académicas o comerciales, o información anecdótica local, puede proporcionar una aproximación útil. Tales análisis pueden eliminar de futura consideración a los sitios menos apropiados.

- **Análisis y evaluación del sitio:** la selección inicial de un sitio, su análisis y evaluación identificarán potenciales impactos ambientales. Usualmente, solo unos pocos factores son críticos para brindar este vistazo básico del terreno, su régimen hidráulico, suelo y vegetación. Un buen mapa topográfico es esencial para el análisis del sitio y debe ser un requisito para todo proyecto.
- **Estrategias flexibles:** existen varios métodos posibles para asegurar que un proyecto es ecológicamente sano. Se deben diseñar estrategias ecológicamente flexibles, incluidas en los proyectos desde un principio.

Para todo proyecto, los desarrolladores deben escribir lineamientos simplificados de urbanización. Esto a fin de facilitar el trabajo de elaboración y diseño según las características naturales del sitio. La meta es integrar la conciencia ambiental en todo el diseño del proyecto, minimizando así la necesidad posterior de costosas medidas.

- Normas de diseño y planificación: la evaluación de las normas de diseño y planificación aplicables a un proyecto, puede también ser necesarias a fin de lograr una ejecución ecológicamente sostenible. Las normas de construcción y planificación, en muchos países en desarrollo, se basaron originalmente en modelos provenientes de los países industrializados, y pueden no ser apropiadas.
- Los techos verdes también pueden hacerle frente varios problemas que tienen las ciudades por falta de vegetación. Como ejemplo las inundaciones, efecto isla de calor, contaminación (aire, agua, suelo, auditiva y visual), malos olores, hábitat para la fauna y flora, entre otros.

3. TECHOS VERDES

3.1. Definición

Azotea verde: es el techo de un edificio que está parcial o totalmente cubierto de vegetación, ya sea en suelo o en un medio de cultivo apropiado.⁹

Un techo verde, azotea verde o cubierta ajardinada es el techo de un edificio que está parcial o totalmente cubierto de vegetación, ya sea en suelo o en un medio de cultivo apropiado. No se refiere a techos de color verde, como los de tejas de dicho color ni tampoco a techos con jardines en macetas. Se refiere en cambio a tecnologías usadas en los techos para mejorar el hábitat o ahorrar consumo de energía, es decir tecnologías que cumplen una función ecológica.¹⁰

Sistema de naturación: es el tratamiento técnico de superficies edificadas horizontales o inclinadas, individuales o agrupadas mediante el cual se incorpora en un elemento o grupo de elementos constructivos tradicionales capas de medio de crecimiento y vegetación especialmente adaptada a las condiciones físicas y climáticas del sitio en que se instala, creando una superficie vegetal inducida.¹¹

3.2. Actualidad y desarrollo de los techos verdes

Su uso se remonta a varios siglos atrás, el primer antecedente del que se tiene registro son los *Jardines colgantes de Babilonia*, creados en los siglos VII y VIII a.C. Los romanos incluyeron también en sus palacios y mausoleos, azoteas jardinizadas.

⁹ *Techo verde*. http://es.wikipedia.org/wiki/Techo_verde. Consulta: marzo de 2015.

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ Gobierno del Distrito Federal. *Norma ambiental para el distrito federal*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Normas/DFNORM23.pdf>. Consulta: marzo de 2015.

A partir de 1920 el arquitecto suizo nacionalizado francés Charles Édouard Jeanneret-Grisb fue el primero en incluir el concepto de azotea verde en Europa Occidental. La naturación de la era moderna comienza en Alemania en la década de los sesenta al desarrollar la técnica de las azoteas verdes, la cual se difundió posteriormente a lo largo de toda Europa.

Actualmente se tiene una visión más amplia ya que se incorpora el enfoque artístico de paisaje, a los beneficios (servicios ambientales) que brindan las azoteas verdes. En el continente asiático destaca Japón. En la ciudad de Tokio se incluyó como requisito que todo aquel nuevo edificio con un área mayor a 1 000 m² sobre el suelo, tendrá que contar con una azotea verde del 20 % del total de la edificación.

Figura 2. Usos de azoteas verdes



Fuente: HUERTA, David. *Azoteas verdes*.

<http://davidhuerta.typepad.com/blog/2010/09/mejora-el-medio-ambiente-azoteas-verdes.html>.

Consulta: marzo de 2015.

En la actualidad se calcula que alrededor del 40 % de las ciudades alemanas ofrecen algún tipo de incentivo para la instalación de azoteas verdes en sus edificaciones. También la mayoría de los países europeos cuentan con azoteas verdes en sus edificaciones. La ciudad de Madrid, España cuenta con una de las azoteas verdes más grandes del continente europeo, la cual está instalada en el Banco Santander con más de 100 000 m².

Actualmente en Guatemala hay un caso conocido y es el hotel Kawilal que opera bajo los estándares de la certificación *US Green Building Council* (USGBC). Este se encuentra ubicado a orillas del lago de Amatitlán.

3.3. Características

Las azoteas verdes (techos verdes) no son más que la vegetación instalada adecuadamente sobre ellas. Esto mediante un proceso detallado de diseño e instalación, pueden ser instaladas en edificaciones nuevas y ya existentes, siempre llevando a cabo un diseño adecuado. Su uso implica un tratamiento especial al techo.

Los avances en la tecnología han dado lugar al desarrollo de nuevos sistemas que no se ajustan a la clasificación tradicional de los tipos de cubiertas verdes. Por ejemplo, techos verdes integrales incluyen las cualidades de extensivos e intensivos juntos.

- Azotea verde extensiva: es la más económica, la que menor cuidado necesita y es la más ligera, la vegetación de ésta se compone por lo regular de plantas del género *sedum*, crasuláceas y suculentas. Las características de las plantas hacen necesario el riego, la fertilización y un mantenimiento en general mínimo. El espesor del sustrato vegetal es

de entre doce y veinte centímetros. Su peso máximo completamente saturado de agua no supera los 200 kg/m²; su proceso de maduración dura alrededor de cuatro a seis meses.

- Azotea verde intensiva: puede tener una amplia gama de árboles, plantas y flores con una posibilidad de diseños casi ilimitado. La única recomendación para este tipo de azoteas es que la vegetación se adapte a las condiciones climáticas del lugar. Su mantenimiento es el mismo que el de un jardín tradicional, requiere de riego, fertilización y mantenimiento. La capa de sustrato vegetal es de 35 cm hasta más de 1 m. Para tener una en casa se necesita contemplar una carga estructural que pueda alcanzar los 1 200 kg/m². La maduración puede tardar varios años.
- Azotea verde semiintensiva o mixta: combina ambos diseños dividiendo la carga de acuerdo con las características estructurales del inmueble. El peso de las instalaciones puede variar entre los 200 y los 900 kg/m².

Tabla IV. **Características de cubiertas verdes**

| | Extensivas | Semi intensivas | Intensivas |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Espesor del sustrato | 7 y 19 cm | 15 y 30 cm | 40 y 50 cm |
| Características de la cobertura vegetal | Plantas de porte bajo, tipo tapete grama, pastos, hierba, plantas del género <i>sedum</i> . Su crecimiento no supera los 12 cm. | Plantas de porte medio, que crecen de 40 a 50 cm de altura. Proyectos de agricultura urbana. | Plantas de porte alto, arbustos y flores. Se planta en contenedores y se ubican sobre las vigas de soporte de la estructura. |

Continuación de la tabla IV.

| | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Carga sobre la estructura | Son las más livianas, pesan entre 85 y 110 kg/m ² | Tienen una carga aproximada de 200 a 700 kg/m ² | Un metro de sustrato pesa cerca de 800 kg, mientras que el árbol alcanza los 600 kg. |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|

Fuente: Construdata. *Normativa cubiertas verdes.*

http://www.construdata.com/Bc/Otros/Documentos/especificaciones_tecnicas_y_arquitectonicas.asp. Consulta: enero de 2015.

3.4. Tipos

El diseño de una azotea verde depende del uso específico que se le dará y del presupuesto con el que cuente. Si solo se desea una azotea con fines ecológicos se puede optar por el diseño extensivo; si se cuenta con un espacio amplio donde se convivirá con varias personas, se puede utilizar el intenso o semiintensivo; la única restricción es la capacidad estructural del hogar.

El uso y la construcción de azoteas verdes persiguen objetivos de recreo, de gestión de aguas pluviales, objetivos medioambientales y ecológicos. Además del objetivo estético. Existen diferentes tipos de techos verdes de acuerdo al criterio que se aplique, la región o el país.

- En los Estados Unidos dividen las cubiertas verdes en dos tipos (se diferencian en el propósito, materiales de construcción y sobre todo en el acceso):

- Techos verdes (*green roof*): el acceso es limitado y solamente es para hacerle mantenimiento. Su construcción es principalmente para funciones ambientales y estéticas.
- Jardines techo (*rooftop garden*): las personas pueden entrar fácilmente y disfrutar socialmente como si fuera un jardín o una terraza. Su construcción es más costosa, más pesada.
- En Alemania, los techos verdes se consideran de dos tipos (se diferencian por el espesor del sustrato, el mantenimiento, el tipo de planta, y los materiales):
 - Los extensivos (*green roof*, en la clasificación de EE.UU)
 - Los intensivos (*roof garden*, en la clasificación de EE.UU)
- De acuerdo al sistema de manejo y colocación.
 - Plantando semillas o plantas directamente en una capa de tierra.
 - Colocando sobre el tejado alfombras de vegetación ya listas.
- En función del grueso de terreno
 - Cubiertas extensivas
 - Cubiertas intensivas
 - Cubiertas semiintensivas
- De acuerdo a la pendiente del techo

- Techos horizontales
- Techos con pendiente: el declive reduce el riesgo de mal drenaje del agua, si bien presenta también mayores problemas para mantener la humedad en la tierra.

Tabla V. **Tipos de techos verdes**

| Tipos techo verde | Descripción |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Directo | Es el uso de un techo verde directamente o continuo a la estructura del inmueble (sea teja, cemento, otros) requiere adecuación del techo, permeándolo para que no haya infiltraciones y que las raíces de las plantas no afecten el inmueble. |
| Indirecto | Cuenta con recipientes o materas. El sustrato y la planta no entran en contacto directamente con el techo del inmueble. |
| Intensivo | El espesor del sustrato es mayor de 30 cm, por lo que se considera un “techo verde pesado”. Requiere que la estructura del edificio soporte dicho peso. El costo de instalación y mantenimiento es mayor por las exigencias en prácticas culturales (riego, insumos, podas, sembrado, entre otras) constantes. |
| Semi-intensivo | Tipo intermedio entre los otros (intensivo y extensivo), por espesor del sustrato (12 a 30 cm), y la densidad de plantas. Requieren menos prácticas culturales y poco mantenimiento. |
| Extensivo | Considerado de bajo mantenimiento y generalmente se instalan en lugares de difícil acceso. Especies de plantas muy limitadas debido al sustrato (5 a 15 cm) y a las condiciones del ambiente. Vegetación de porte bajo con bajo mantenimiento; es el más apto para ser utilizado en construcciones existentes. |

Fuente: de RHODES VALBUENA, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de Honda, Tolima (Colombia)*. p. 21.

3.5. Regulaciones aplicables

En la actualidad las regulaciones relacionadas con las azoteas verdes son escasas en el ámbito internacional. Sin embargo, la mayoría de los países aún no cuentan con legislación propia sobre este tema. Por tal situación se crearon dos grandes asociaciones internacionales:

- Techos verdes para ciudades saludables (*Green Roofs for Healthy Cities*, GRHC).
- Asociación Internacional de Azoteas Verdes (*International Green Roof Association*, IGRA).

A continuación se presentan una serie de disposiciones, reglamentos y lineamientos, existentes en el entorno internacional y nacional. Estos regulan el uso de las azoteas verdes.

3.5.1. En Guatemala

En Guatemala es poca la información y leyes que existen sobre el tema. También son pocas las instituciones y empresas que se ocupan por la instalación de azoteas verdes. Sin embargo, algunos edificios comerciales y residenciales han tomado la iniciativa de implementar el sistema.

Es necesario que los diferentes sectores de la sociedad relacionados impulsen la investigación, capacitación e información sobre los beneficios ambientales, económicos y sociales. Estos representan tener una azotea verde, a todos los interesados.

En Guatemala el hotel Kawilal forma parte de los conocidos baños termales Santa Teresita, en Amatitlán. Este opera bajo los estándares de la certificación *Leed Gold*, otorgada por *US Green Building Council (USGBC)*. Esa certificación asegura que una construcción es sostenible y califica, mediante un sistema de puntuación por el nivel de respeto medioambiental y de salud que tienen las edificaciones que se someten a ese proceso.

Figura 3. **Azotea verde, Kawilal Hotel Guatemala**



Fuente: Kawilal Hotel. <http://www.kawilalhotel.com/instalaciones.html>

Consulta: mayo de 2016.

La Municipalidad de Guatemala busca incentivar la construcción de proyectos más rentables. Esto por medio del nuevo Reglamento de Incentivos de Ordenamiento Territorial tiene carácter de disposición complementaria al

POT. Este busca promover en los desarrolladores de proyectos, acciones, conductas o iniciativas orientadas a mejorar la calidad de vida de los vecinos, compensándolos con mayor rentabilidad en sus proyectos.

El POT es un cuerpo normativo básico de planificación y regulación urbana conformado por normas técnicas, legales y administrativas que la Municipalidad de Guatemala establece para regular y orientar el desarrollo de su territorio.

Entre las acciones que la Municipalidad busca que los desarrolladores adopten se encuentran: proveer vialidades de alta calidad peatonal y ambiental. Así como cumplir con las normas de accesibilidad para discapacitados, realizar proyectos de obra que provean un mayor porcentaje de área verde o la cesión urbanística de áreas de servicio público, entre otras.

3.5.2. Otros países

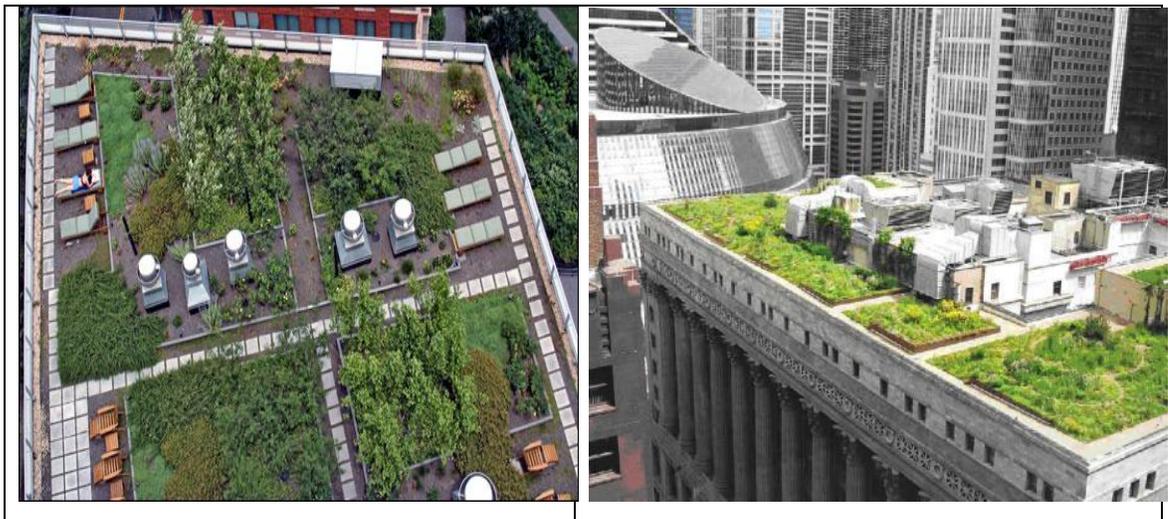
Algunos países europeos incluyendo Alemania, Suiza, Holanda, Hungría, Suecia y el Reino Unido. Estos tienen asociaciones que fomentan los techos verdes. En Dinamarca se obligará a tener vegetación en las azoteas de los edificios de nueva construcción y las viejas no se quedarán vacías, puesto que ya existe un plan para cubrirlas de vegetación (Copenhague tiene unos 20 000 m² con azoteas que se convertirán en cubiertas vegetales en un futuro). Otros países como Suiza han copiado la idea y las azoteas verdes son obligatorias en todos los edificios nuevos.

La organización de Techos Verdes para Ciudades Saludables fue fundada como resultado del proyecto de investigación sobre los beneficios de las azoteas verdes y las barreras para el desarrollo de la industria. Es integrada

por organizaciones públicas y privadas. Esta asociación rige principalmente a América del Norte.

La Asociación Internacional de Azoteas Verdes (IGRA) regula los requisitos técnicos con respecto a la instalación de azoteas verdes. Esto principalmente a los países europeos, asimismo da a conocer los diversos tipos de azoteas verdes, los tipos de vegetación, conservación y mantenimiento. También establece lineamientos preventivos para que cada país pueda contar con lineamientos básicos y de esta manera desarrollar leyes y normas propias sobre azoteas verdes. La IGRA tiene políticas que proponen dar diversos incentivos a los propietarios de los inmuebles que tienen instalada una azotea verde.

Figura 4. **Usos de azoteas verdes en las grandes ciudades**



Fuente: CRUZ MARTÍNEZ, Susana. *Las Azoteas verdes, una alternativa sustentable ante la acelerada.* <https://ecotecnologiasparaelbienestar.wordpress.com/eco-tecnologias/azoteas-verdes/>. Consulta: enero de 2015.

La certificación *Leed Gold*, otorgada por *US Green Building Council* (USGBC) asegura que una construcción es sostenible y califica. Esto mediante un sistema de puntuación por el nivel de respeto medioambiental y de salud que tienen las edificaciones que se someten a ese proceso.

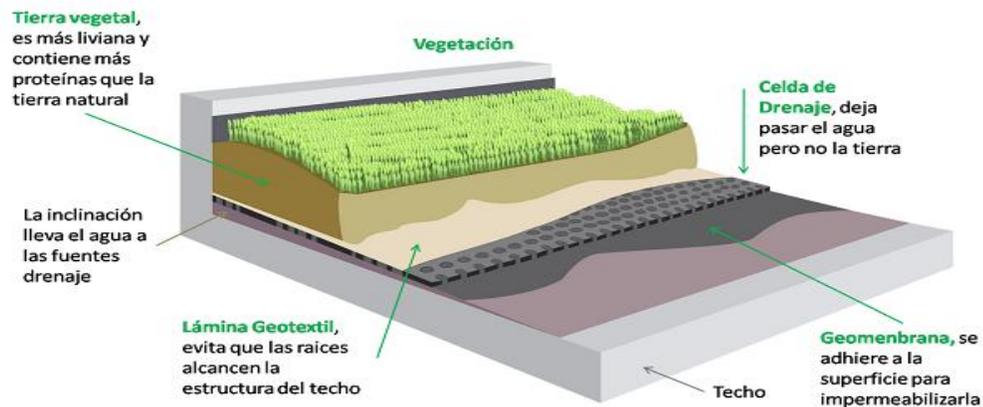
En Europa, la Federación de Asociaciones de Techos Verdes (EFB) promueve el uso de tejados y fachadas verdes en sus países miembros (Alemania, Italia, Austria, Hungría, Holanda, Suiza, Suecia, Noruega, Bélgica, Polonia, República Checa y Reino Unido).

A nivel mundial, la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) reglamentó algunos aspectos de las cubiertas verdes. Esto como las cargas vivas, las cargas muertas para su diseño estructural, las capas de drenaje, los métodos para la comprobación de retención de agua en capas de drenaje, los estándares para permeabilidad y materiales granulares. En la actualidad se desarrollan nuevos códigos de construcción de techos verdes. Estos están siendo escritos por la ASTM *International Green Roof Task Group*.

3.6. Elementos que la componen

Existen diferentes formas de instalación de acuerdo a las características en cada caso. La azotea verde es un sistema integral conformado por varias capas de diferentes materiales, dispuestos para proteger el inmueble contra daños por la exposición al medio ambiente y a su vez promover el crecimiento de vegetación.

Figura 5. Elementos que componen una azotea verde



Fuente: Hildebrandt. *Cómo funciona un techo verde*. <https://www.google.com.gt/> . Consulta: enero de 2015.

El instalar una azotea verde reemplaza cualquier acabado que pudiera tener el techo.

3.6.1. Soporte estructural

Es el elemento donde se apoyan los otros componentes. Está constituido por elementos estructurales, tales como vigas y el armado de la losa. Estos están adaptados para conectarse entre sí, teniendo como función soportar su propio peso. Así como a los elementos arquitectónicos, cargas vivas, capas y muebles.

El sistema más difundido es el monolítico. El otro sistema está basado en la tecnología modular. Este emplea bandejas elaboradas en plástico reciclado y pueden ser adaptables a cubiertas planas, inclinadas y tejas onduladas.

3.6.2. Sistema de desalojo de agua (drenaje)

El desalojo del agua acumulada por precipitación pluvial se realiza mediante varios elementos, deben asegurar que no exista acumulación de agua sobre la superficie naturada. Al instalar coladeras en la zona de naturación se deberán colocar rejillas sobre estas. Para evitar que elementos sólidos al ser desalojados bloqueen el flujo del agua y de esta manera generen almacenamiento de agua.

Figura 6. Tipos de rebosadero, para azoteas verdes



Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México. *Rebosaderos*. <https://www.google.com.gt/>
Consulta: mayo de 2016.

3.6.3. Aislamiento térmico

La capa de aislante térmico tiene como función disminuir la temperatura del inmueble en época de verano y elevar la temperatura del inmueble en época de invierno.

3.6.4. Membrana antiraíz impermeabilizante

El elemento antiraíz controla y soporta el crecimiento radical de las especies vegetales. Esto tiene como función evitar el paso de agua que puede filtrarse de la capa drenante así como evitar el paso de la raíz al aislante térmico y posteriormente al soporte estructural; es conveniente poner una capa impermeabilizante para evitar filtraciones.

3.6.5. Capa drenante

Elemento que sirve para recibir las precipitaciones y conducir las hacia los desagües de la cubierta. Esta se encuentra por encima de la membrana antiraíz impermeabilizante y por debajo de la capa filtrante.

3.6.6. Capa filtrante

Elemento que evita el paso de las partículas finas del sustrato hacia la capa drenante. De esta manera el agua puede fluir libremente y así tener un funcionamiento adecuado.

3.6.7. Capa de sustrato

Elemento que sirve de soporte físico a la capa de vegetación, suministrándole los nutrientes necesarios para su crecimiento. Está diseñada para soportar la vegetación, siendo esta capa directamente proporcional al tipo de naturaleza a instalar.

3.6.8. Capa de vegetación

Consiste en el material vegetal (plantas) usado para la cobertura de la azotea verde. Para elegir correctamente la vegetación se deben considerar algunos criterios:

- Inclinação del techo
- Exposición al viento
- Espesor del sustrato
- Orientación al cielo
- Períodos de sequía
- Gastos de mantenimiento
- Aspecto visual

3.6.8.1. Capa de vegetación extensiva

Se refiere al uso de plantas de tipos comunes y fáciles de conseguir. Esta naturación deberá contar con un espesor entre 3 hasta 15 cm, a este tipo de vegetación no es necesario suministrarle nutrientes ni gran cantidad de agua. Por ello, debe tener buena capacidad de retención.

3.6.8.2. Capa de vegetación semiintensiva

Puede estar integrada por una gran variedad de especies. Esto como pastos, arbustos, y depende directamente del nivel de mantenimiento que se brinde a la vegetación.

3.6.8.3. Capa de vegetación intensiva

En este tipo de configuración de la capa de vegetación, se puede colocar una gran variedad de especies de flora. Por ello, es necesario realizar un alto nivel de mantenimiento, así como un gran suministro de agua.

3.6.9. Naturación con sistemas fotovoltaicos o fototérmicos

Cuando se usan estos sistemas se deberán tomar en cuenta las siguientes indicaciones:

- Las celdas de captación solar deberán ser colocadas 20 cm por encima de la capa de vegetación.
- Los soportes deberán ser forrados como se indicó en descripción de la membrana antiraíz impermeabilizante.
- Se debe colocar a una distancia considerable de la vegetación, y así para evitar que produzca sombra sobre las celdas solares.

3.6.10. Acceso a la azotea

Durante la etapa de planificación de la azotea verde, se debe tomar en cuenta el acceso. Este es de suma importancia, ya que permitirá realizar el mantenimiento y disfrutar de una estadía en la misma.

Figura 7. **Accesos y caminamientos en azoteas verdes**



Fuente: Noticias de Arquitectura. *Techo verde dentro de un paisaje verde.*
http://noticias.arq.com.mx/Detalles/16806.html#.VKa_XdKG8Zw. Consulta: febrero de 2015.

4. CRITERIOS DE DISEÑO TECHOS VERDES

4.1. Generalidades

El elemento más importante de cualquier techos, sea verde o no, es asegurar que el agua no comprometa de ninguna manera la integridad del edificio. Debido a que un buen cálculo es imprescindible y fundamental para el éxito de la estructura que llegará a albergar a las azoteas verdes, un mal diseño puede tener consecuencias catastróficas. La carga adicional a la que se somete la estructura al construir una cubierta verde para la cual no estaba calculada, debe ser considerada.

La estructura se debe diseñar para soportar el peso de la azotea verde o su peso muerto. Se deben tomar en consideración, además del peso de la membrana de aislamiento, el peso de las plantas y de la tierra. El peso de los componentes se expresa típicamente como un peso saturado o húmedo.

Además de la capacidad de carga del techo se deben incluir otros requisitos estructurales como la altura, el tamaño y la inclinación de la cubierta. El techo verde debe soportar la carga del viento, la presión del viento puede variar a través de un techo dependiendo de su ubicación.

Tabla VI. **Fases de ciclo de vida de un sistema de techo verde**

| 1. PLANEACIÓN DE UN TECHO VERDE | | |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Características inmueble | Propósito Techo verde | Factores climáticos y medioambientales |
| Generales | Clasificación primaria y secundaria | Intensidad y duración de exposición solar |
| Estática | Tiempo de vida útil | Precipitación anual y mensual |
| Tipo o sistema constructivo de cubierta | Transitabilidad | Intensidad de lluvia |
| Pendiente de la cubierta | Perfil del usuario | Cantidad de eventos de lluvia al año |
| Accesibilidad a la cubierta | Requerimientos de mantenimiento | Temperatura promedio del aire mínima y máxima |
| Red de suministros de agua | Elementos complementarios requeridos | Humedad relativa |
| Red eléctrica | | Frecuencia dominante del viento |
| Red de evacuación de aguas lluvias | | Velocidad del viento |
| Construcción | | Mes del año con mayor y menor número de días de lluvia |
| 2. PREPARACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TECHO VERDE | | |
| 3. IMPLEMENTACIÓN DE UN TECHO VERDE | | |
| 4. SEGUIMIENTO DE UN TECHO VERDE RECIÉN IMPLEMENTADO | | |
| 5. MANTENIMIENTO DE UN TECHO VERDE | | |

Fuente: GUERRERO USUGA Ginna Zamara, GÁMEZ TABIMBA Paola Andrea. *Evaluación y pre diseño de techos verdes para la reutilización de aguas lluvias en la UMNG: una perspectiva desde universidad saludable.* p. 61.

4.2. Tipo de naturación

De acuerdo al desarrollo en el uso de azoteas verdes. En la actualidad se consideran tres tipos, los cuales son:

- Naturación extensiva: capas de crecimiento de vegetación arriba de un sistema de cubierta tradicional. Su mantenimiento es bajo, el espesor no debe ser mayor a los 8 cm, con un carga permanente entre los 110 y 140 kg/m² en estado saturado.
- Naturación semiintensiva: capas de crecimiento de vegetación arriba de un sistema de cubierta tradicional. Esto con mantenimiento normal, con un mínimo de 15 cm de espesor, con una carga permanente en estado saturado entre 150 y 250 kg/m².
- Naturación intensiva: capas de crecimiento de vegetación arriba de un sistema de cubierta tradicional, necesita mantenimiento frecuente, espesor mínimo de 20 cm, peso en estado saturado mayor a los 250 kg/m².

Tabla VII. **Criterios establecidos por IGRA para la naturación de una azotea verde**

| | Naturación extensiva | Naturación semi-intensiva | Naturación intensiva |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Mantenimiento | Bajo | Periódicamente | Alto |
| Riego | No | Periódicamente | Regularmente |
| Vegetación | Hierbas y pastos | Hierbas y arbustos | Césped, arbustos y árboles |
| Sistema de acumulación | 60 a 200 mm | 120 a 250 mm | 150 a 400 mm; en garajes subterráneos > 1000 mm |
| Peso | 110 a 140 kg/m ² | 150 a 250 kg/m ² | Mayor a 250 kg/m ² |
| Costos | Bajo | Medio | Alto |
| Uso | Capa de protección ecológica | Techo verde diseñado | Parque como jardín |

Fuente: elaboración propia.

4.3. Requisitos mínimos para la instalación de un techo verde

La naturación y sus elementos constituyentes deberán satisfacer por lo menos los requerimientos siguientes:

- Estabilidad y resistencia mecánica: los sistemas de naturación y sus componentes deben ser estables y resistir las cargas consideradas en el cálculo estructural de la edificación. Es necesario garantizar el correcto comportamiento estático y estructural en su conjunto.
- Impermeabilidad: el sistema de naturación debe tener las características adecuadas que impidan que el agua llegue al interior de la edificación.
- Resistencia a la acción de las raíces sobre la estructura: el sistema de naturación debe diseñarse y construirse con los materiales adecuados, que cumplan con las especificaciones aplicables. Esto se debe garantizar que las raíces de la capa de vegetación no penetren la membrana impermeabilizante para evitar daños a la estructura de la edificación.

4.3.1. Requisitos previos para edificaciones nuevas

En construcciones nuevas se contempla el diseño de la losa desde el cálculo estructural, para que de esta manera se considere en la memoria de cálculo. Se debe incluir el peso de la naturación en estado saturado en el cálculo y diseño estructural de las mismas.

En la siguiente figura se observa el fallo de una losa por un mal diseño estructural.

Figura 8. **Derrumbe de la cubierta de un centro comercial en la capital Letona, Riga, España**



Fuente: Agromática. *Aspectos constructivos de las cubiertas vegetales.*

<http://www.agromatica.es/aspectos-constructivos-de-las-cubiertas-vegetales/>. Consulta: enero de 2015.

La cubierta a implementar el sistema de naturación deberá tener una pendiente mínima de 2 %, así como contar con pretilos o muros perimetrales de por lo menos 20 cm; inclinaciones a 45° de por lo menos 8 cm de altura en puntos de encuentro con elementos verticales.

Las instalaciones que se encuentran en la cubierta deberán estar separadas de la misma por lo menos 40 cm o estar ubicadas a una altura por encima del sustrato para facilitar la colocación del impermeabilizante. Los equipos que se encuentren sobre la cubierta de la edificación deberán colocarse en bases a una altura de por lo menos 15 cm sobre el nivel del sustrato.

Los desagües y bajadas de agua deberán ser dimensionados y calculados de acuerdo a los procedimientos conocidos. De este modo se asegura su capacidad para desalojar la totalidad del agua pluvial. En todos los casos la cubierta deberá contar con rebosaderos con una altura de 5 cm, por arriba del nivel de substrato.

4.3.2. Requisitos previos para edificaciones existentes

Antes de determinar y diseñar una cubierta verde para una azotea o techo hay que realizar una evaluación de la capacidad estructural del edificio. A partir de esta evaluación se determinará si se puede o no implantar este tipo de cubiertas y los tipos y grosores de sustratos que podrá soportar el edificio (en estructuras o edificaciones existentes no se podrá sobrepasar la carga máxima permitida). En caso de que la edificación no pueda soportar la carga adicional del sistema de naturación, deberán realizarse los trabajos de refuerzo estructural necesarios.

Deberán verificarse la capacidad de carga y las condiciones estructurales particulares en cada caso, según planos y en acuerdo con personal técnico. Se debe considerar que no todas las terrazas de las edificaciones están preparadas para soportar el gran peso que proporciona este tipo de cubiertas vegetales. Esto mucho más aún en aquellas azoteas donde se ubican piscinas.

La cubierta deberá contar con pretilos o muros perimetrales de por lo menos 20 cm en toda la periferia para contener el sistema. Si no existen deberán construirse antes de iniciar los trabajos de naturación.

Debe verificarse que los desagües y bajadas de aguas funcionen correctamente y tengan la capacidad suficiente para desalojar toda el agua de las precipitaciones sobre la cubierta. En todos los casos la cubierta deberá contar con rebosaderos con una altura de 5 cm, por arriba del nivel de sustrato. En caso de encontrar alguna anomalía o insuficiencia deberán tomarse las medidas correctivas correspondientes.

En muchos casos, sobre todo en edificios comerciales o de oficinas, en los tejados hay varios elementos que limitan el espacio que se puede establecer como cubierta verde. Estos son tanques de agua, sistemas de climatización y otros equipos necesarios para el funcionamiento del edificio.

4.4. Parámetros de naturación

A continuación se presentan los principales parámetros de acuerdo al tipo de naturación.

- Extensiva
 - Altura de crecimiento de plantas 5 – 50 cm
 - Substrato: 10 – 15 cm
 - Carga adicional: 110 - 140 kg/m²
 - Cobertura vegetal: crasuláceas, pastos y arbustos

- Semiintensiva
 - Altura de crecimiento de plantas: 5 – 100 cm
 - Substrato: 15 – 30 cm
 - Carga adicional: 120 a 210 kg/m²

- Cobertura vegetal: crasuláceas, pastos y arbustos
- Intensiva
 - Altura de crecimiento de plantas: 5 – 400 cm
 - Diámetro de copa: 300 cm máximo
 - Substrato: > 40 cm
 - Carga adicional: > 250 kg/m²
 - Cobertura vegetal: crasuláceas, pastos, arbustos y arboles

4.4.1. Pendiente del techo

Es un dato fundamental para el proceso de construcción, mantenimiento y elección del tipo de vegetación de la azotea verde. Al no contar con una adecuada pendiente se pueden producir diversos problemas, como dañar las raíces de las plantas del sistema.

4.4.2. Consideraciones de carga

La determinación de las cargas que inciden es de suma importancia, ya que en las edificaciones existentes se debe tomar en cuenta los cálculos previos, y en los nuevos inmuebles en el diseño de la losa. En cualquier caso debe evitarse el sobrepasar puntualmente la capacidad de carga admisible, ya sea por transporte de los elementos y materiales o por almacenaje de los mismos.

4.4.3. Altura del techo y orientación al cielo

La altura del techo y su orientación al cielo son importantes debido a que influyen en la carga del viento y la radiación solar sobre las plantas. La carga del viento sobre las plantas es directamente proporcional con la altura de la edificación.

La orientación e inclinación del techo influyen en la radiación solar, al acelerar la evaporación del agua dentro de las plantas. Por lo cual también influyen en su elección. En techos inclinados orientados hacia el sol, como la radiación solar es más fuerte, se secan antes y de modo que allí se instalarán otras especies de plantas.

4.4.4. Transporte y colocación del sustrato

Para este renglón se consideran las diferentes características de cada proyecto y las alternativas del tipo de sistema a utilizar:

- Los techos ubicados a baja altura se pueden efectuar con una grúa de carga pequeña, o por medio del camión repartidor del producto.
- El material suelto, a granel generalmente, se transporta con la excavadora o por medio de un elevador con una carretilla para transportarlo al techo.

Es necesario verificar que el sustrato instalado corresponda con el especificado en el diseño. Este se tiene que colocar con mucho cuidado, para evitar problemas como: deslizamiento del sustrato, espacios vacíos, entre otros.

4.4.5. Drenaje

Es importante tener un buen sistema de drenaje. Estos se deben considerar aspectos como: el espesor, tipo de naturación e intensidad de la lluvia; la capacidad de retención y acumulación de agua de la azotea naturada, tiene que ser ajustado a la precipitación promedio local.

Los sistemas de naturación ayudan al manejo de las aguas pluviales; en la siguiente tabla se muestran los porcentajes de desagüe de agua pluvial, en las superficies de azoteas naturadas (el porcentaje expresado es el que no puede ser retenido por la vegetación).

Tabla VIII. **Evacuación de agua pluvial en porcentaje según sistema de naturación**

| Tipo de naturación | % de evacuación |
|---------------------------|------------------------------------------|
| Extensivo | Espesor mayor a 10 cm, 30 % de desagüe. |
| | Espesor menor de 10 cm, 50 % de desagüe. |
| Semi-intensivo | 40 % de desagüe |
| Intensivo | 70 % de desagüe |

Fuente: elaboración propia.

4.4.6. Control de plagas

Es necesario mantener libre de plagas las azoteas verdes. Esto debido principalmente a los costos que representa una fumigación, además del peligro

que representa el posible brote de cualquier tipo de plaga. En lo posible evitar el uso de insecticidas químicos, pues contienen contaminantes que modifican la estructura de los suelos.

4.4.7. Prevención de incendios

Es importante prevenir la ocurrencia de incendios en las azoteas verdes con naturación intensiva, ya que es la que presenta mayor densidad de vegetación. Este se debe tener el mayor cuidado en época de sequía, ya que al secarse la vegetación puede producir un incendio debido a que se convierte en un material inflamable. Se deben instalar zonas libres de vegetación en todos los perímetros y accesos.

Una azotea verde ofrece una protección ideal contra incendio para techos propensos a tomar fuego. En Alemania los techos verdes son válidos como incombustibles y son clasificados como cerramientos superiores pesados.

4.5. Prevención de accidentes

Para evitar accidentes al subir a una azotea es fundamental colocar elementos de protección (barandillas, andamios o redes, así como cuerdas y cadenas, entre otros).

4.6. Operación y mantenimiento de un techo verde

Una vez instalada la azotea verde es necesario garantizar su funcionamiento correcto, para así obtener el mayor tiempo de vida útil. Es fundamental realizar las tareas de operación y mantenimiento de forma adecuada para todos los elementos que la conforman.

Los costos y el mantenimiento son claves en una azotea verde; el costo puede variar en función de su tamaño, ubicación y complejidad. En términos de mantenimiento los techos extensivos requieren un mínimo mantenimiento, algunos tan solo anualmente un riego y un deshierbado. Los sistemas intensivos requieren un mantenimiento regular como cortar el césped, desmalezar, regar y fertilizar.

Figura 9. **Proceso instalación azotea verde**



Fuente: IngenieríaReal.com. *Instalación del Roof Garden o Jardín de Techo.*
<http://ingenieriareal.com/instalacion-roof-garden-jardin-techo/>. Consulta: enero de 2015.

5. BENEFICIOS TECHOS VERDES

En Europa durante la década de 1980-1990, se dio un proceso de difusión del uso de techos verdes y los beneficios que brinda. La ciudad de Stuttgart, en Alemania, fue la primera en otorgar beneficios fiscales para la implementación de techos verdes desde 1980, Berlín toma medidas similares en 1988. Actualmente en Alemania se calcula que un poco más del 10 % de las cubiertas de los inmuebles tienen una cobertura vegetal, es decir, tienen techos verdes. El gobierno fomenta y da incentivos a este tipo de cubierta en las construcciones.

En los Estados Unidos, la ciudad de Chicago inició un programa basado en que la adición de plantas y árboles a las zonas urbanas reduce el efecto isla de calor urbano. El Departamento del Medio Ambiente de la Ciudad de Chicago empezó a promover los techos verdes a mediados de 1990; se concedieron subvenciones para construir techos verdes. En Maryland, si un arquitecto quiere aumentar el área que puede absorber el agua de lluvia en un 20 %, el estado puede renunciar a los requisitos de calidad para la gestión de aguas pluviales.

5.1. Tipos

Las azoteas verdes proporcionan importantes beneficios en aquellas ciudades que apuestan por un desarrollo urbano sostenible. Esto por su incuestionable atractivo estético, su aportación social y económica en el entorno en el que se desarrolla, y su contribución al medio ambiente.

El uso de azoteas verdes genera grandes beneficios de diferentes tipos generalmente asociados al tamaño del techo verde. De esta manera general se pueden mencionar: fiscales, ambientales, sociales, económicos, de salud, estéticos, entre otros.

5.1.1. Beneficios ambientales

La inmensa mayoría de la superficie de las grandes ciudades del mundo (en realidad de cualquier espacio urbano) se encuentra recubierta de asfalto, concreto, entre otros. La respuesta de estos materiales a la radiación solar, a la lluvia y a los contaminantes difiere sensiblemente de la que presenta la superficie terrestre sin alterar (cubierta de vegetación).

En general los techos verdes tienen un impacto neto positivo sobre el ambiente: capturan agua de lluvia, reduciendo así inundaciones y niveles de contaminación. Además mejoran la aislación térmica de los edificios y enfrían el aire. Estos representan un hábitat para especies nativas o migratorias; y pueden ayudar a mejorar la calidad de vida.

5.1.1.1. Calidad del aire

Sobre una azotea impermeabilizada se depositan diminutas partículas sólidas contaminantes que posteriormente son devueltas al ambiente con el viento y mezcladas con el aire que respiramos. Los sistemas de azoteas verdes contribuyen a fijar y retener el polvo y las partículas suspendidas. Las plantas retienen estos elementos y los integran a su proceso de fotosíntesis. Esto ayuda además a disminuir problemas de alergia, asma e infecciones respiratorias comunes.

Las azoteas verdes consumen dióxido de carbono y liberan oxígeno; 1 m² de azotea verde genera el oxígeno necesario para una persona en un año.

5.1.1.2. Control de la humedad

Las plantas reducen las variaciones de humedad, particularmente cuando el aire está seco evaporan una considerable cantidad de agua y elevan así la humedad relativa del aire. Por otra parte, las plantas pueden disminuir la humedad del aire con la formación de rocío.

5.1.1.3. Creación de hábitats

Los ambientes naturales en zonas urbanas desaparecen con una velocidad alarmante. Las azoteas verdes son parte de la solución para recuperar estos espacios. Esto mediante la selección de diferentes especies de plantas y flores se puede atraer aves y mariposas.

Las azoteas verdes pueden ser diseñadas para promover las condiciones ideales para el refugio y supervivencia de distintas especies. Esto porque proveen alimento, agua y un espacio protegido para su reproducción.

5.1.1.4. Regulación de la temperatura

En la actualidad uno de los fenómenos más destacados de las ciudades es lo que se ha venido a denominar Isla de calor. Esto consiste en que el ambiente de las ciudades mantiene una temperatura varios grados más elevados que en las zonas circundantes; “la ciudad más grande del mundo, Tokio, ha elevado su temperatura media anual en 2,8 °C en el último siglo,

mientras que el aumento en el resto de la isla ha sido de “solo” 0,5 C.”¹²

La menor transformación de la radiación solar en calor supondrá un menor traspaso del calor de la azotea al interior del edificio, la instalación de azoteas ajardinadas evita este problema. Esto repercute directamente en verano en la temperatura en el interior de las viviendas (particularmente de los pisos superiores), que se mantendrá más fresca. Por lo que se requerirá un mucho menor uso de los sistemas de aire acondicionado (la capacidad aislante de la tierra también repercutirá favorablemente en el invierno y en el ahorro en calefacción).

Figura 10. **Termofotografía de cubierta verde de edificio**



Fuente: sitiosolar.com. *La ley de techos y terrazas verdes de Buenos Aires (Argentina)*.
<http://www.sitiosolar.com/la-ley-de-techos-y-terrazas-verdes-de-buenos-aires-argentina/>.

Consulta: enero de 2015.

¹² sitiosolar.com.<http://www.sitiosolar.com/la-ley-de-techos-y-terrazas-verdes-de-buenos-aires-argentina/>. Consulta: enero de 2015.

El Consejo de Investigación Nacional de Canadá señaló que los techos verdes reducen más del 75 % el promedio de energía utilizada en una casa de 400 metros cuadrados. Otro estudio realizado por la Agencia Ambiental de Canadá señala que plantando al menos un 6 % de las azoteas de la ciudad, se podría reducir entre 1 y 2 °C la temperatura del aire de la ciudad en verano.¹³

5.1.1.5. Retención de agua

Debido a que el asfalto y el concreto son materiales impermeables. Al ser estas las superficies imperantes en las ciudades, la mayoría del agua que cae por la lluvia no se filtra al subsuelo, sino que comienza a fluir por la superficie y es recogida por los sistemas de drenaje hasta el sistema de alcantarillado. A menudo los drenajes son insuficientes para una correcta captación y drenaje del agua de lluvia.

Las azoteas verdes tienen la capacidad de retener en el sustrato de las plantas una parte muy importante del agua de lluvia (el 50 % de una precipitación de 30 mm según algunas investigaciones) y permite que esta se escurra poco a poco evitando la saturación del sistema de drenaje; es decir, que en vez de llegar toda a la vez al sistema de drenaje, esta lo va haciendo lentamente.

5.1.2. Beneficios económicos

Las azoteas y los muros verdes son herramientas mercantiles efectivas. Estos pueden convertir un espacio no utilizado en un atractivo jardín o en un entorno tranquilo, para descansar del trabajo o simplemente para relajarse en un entorno sereno.

¹³ sitiosolar.com. <http://www.sitiosolar.com/la-ley-de-techos-y-terrazas-verdes-de-buenos-aires-argentina/>. Consulta: enero de 2015.

En los Estados Unidos, Canadá y en diversos países de Europa se ha probado que la calidad en el diseño de la arquitectura de paisaje y en las características ecológicas de un inmueble logran aumentar su valor entre 15 al 25 %. En soluciones residenciales y comerciales, una azotea verde añade un valor significativo al inmueble ya que aumenta directamente su área aprovechable.

En la ciudad de Guatemala, el reglamento de incentivos es un complemento al POT, el cual permitirá crear un balance entre los intereses de los desarrolladores (mayor rentabilidad de sus proyectos) y los intereses de los vecinos (mejor calidad de vida). Esto permite así crear la ciudad para vivir, uno de los principales objetivos de la Municipalidad.

Incluye los siguientes beneficios con base en el uso de azoteas verdes:

El cumplimiento de estas prácticas, que son de carácter voluntario, generará la mayor rentabilidad de un proyecto por medio de dos tipos de incentivos: el de mayor edificabilidad en su construcción, lo que implica mayor cantidad de m² construibles, o el de reducción de los costos de licencias municipales, este último cobra vigencia a partir de octubre del 2011.¹⁴

5.1.2.1. Aislamiento térmico

El efecto de aislamiento térmico reduce el gasto en energía eléctrica por que disminuyen las necesidades de uso de los sistemas de aire acondicionado. Reducen costos de aire acondicionado del edificio, ya que disminuyen la temperatura manteniendo más fresco el interior de las edificaciones.

¹⁴ Municipalidad de Guatemala. *Plan de Ordenamiento Territorial*.

5.1.2.2. Vida útil de la cubierta

Las azoteas verdes protegen las estructuras de los edificios aumentando su duración. Las cubiertas tradicionales de concreto, tejas, madera, entre otras, son afectadas por los rayos ultravioletas, lo que causa que se deterioren aumentando los costos por mantenimiento e impermeabilización. Generalmente los sistemas de azotea verde ofrecen una garantía de por lo menos 15 años contra cualquier filtración de agua en la losa. Está diseñado para una vida útil de más de 35 años y los gastos de impermeabilización desaparecen.

5.1.3. Beneficios estéticos

Estos beneficios son los que se reflejan a simple vista. Por ello la instalación de una azotea verde en cualquier edificación modifica de forma considerable la percepción arquitectónica de dicha edificación. A continuación se presentan los principales beneficios estéticos relacionados con el uso de azoteas verdes.

5.1.3.1. Espacio útil

Al contar con un área naturalizada en una estructura esta ofrece armonía al paisaje y confort a la gente que habita en ella. La construcción de azoteas verdes permite también que las superficies infrautilizadas de las ciudades se conviertan en lugares que coadyuvan a una mejora del medio ambiente y de la eficiencia energética.

Una azotea verde convierte un área no utilizada en un espacio disfrutable que promueve el confort y mejora la calidad de vida de las personas que lo disfrutan. Esto aumenta las áreas verdes en espacios que antes no podían aprovecharse.

Figura 11. **Proyección del avance del uso de azoteas verdes en Buenos Aires**



Fuente: Plataforma de arquitectura. *Techos verdes en arquitectura.*

<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/tag/cubiertas-verdes>. Consulta: febrero de 2015.

5.1.3.2. Creación de hábitats

Los techos verdes pueden convertirse en hábitats de fauna menor, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad en áreas urbanas. La utilidad de las cubiertas verdes para los voladores pequeños ha sido comprobada. Las cubiertas verdes también proporcionan espacio para anidación de comunidades de aves nativas.

5.1.3.3. Mejoramiento visual

Una azotea verde se ajusta más fácilmente al entorno, se integra con el paisaje mejor que una edificación sin espacios verdes. Esto particularmente cuando el techo llega hasta el nivel del jardín y por lo tanto la vegetación de este sube directamente a la del techo. Los techos verdes proveen beneficios psicológicos y físicos relacionados con relajación, regeneración, reducción de estrés y provisión del aire más limpio.

Figura 12. **Impacto visual, proyecto de azoteas verdes**



Fuente: Plataforma de arquitectura. *Techos verdes en arquitectura.*

<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/tag/cubiertas-verdes>. Consulta: febrero de 2015.

5.1.4. Beneficios fiscales

En los países desarrollados, la inversión en la instalación de sistemas de azoteas puede ser tratada como un gasto de mantenimiento del inmueble. Obteniendo así el beneficio de hacerlo deducible de impuestos.

5.1.5. Beneficios de salud

La contaminación del aire en el ambiente urbano es uno de los problemas de mayor importancia para la salud humana, la vegetación puede contribuir significativamente a la reducción de la contaminación del aire en las ciudades. Entre los beneficios para la salud que se relacionan con el uso de azoteas verdes se pueden mencionar:

- Un metro cuadrado genera el oxígeno requerido por una persona en todo un año.
- Un metro cuadrado atrapa 130 gramos de polvo al año.
- Mejora el desempeño y reduce malestares de las personas que tiene vegetación en su lugar de trabajo.
- Se puede instalar techos verdes casi en cualquier superficie como entresijos o terrazas ya sean planas o inclinadas.

5.1.5.1. Aislamiento térmico

La vegetación sobre las azoteas tiene un alto efecto de aislamiento térmico, ya que la capa de sustrato funciona como un colchón que no permite que el techo se caliente. Las cubiertas verdes reducen la temperatura del ambiente por medio de procesos fisiológicos de la vegetación. Estos son la evapotranspiración, la fotosíntesis y la capacidad de almacenar calor de su propia agua.

Este beneficio es fundamental, ya que las azoteas verdes tienen un excelente efecto de aislamiento térmico. Esto se traduce que en época de primavera la temperatura en el exterior es alta. Mientras que en el interior de la edificación es del alrededor del 20 % menor que la exterior. Esto evitará la deshidratación, insolación entre otras enfermedades.

En caso contrario, en época invernal, la temperatura exterior es bastante baja. Mientras que en el interior de la edificación es casi del 20 % mayor que la exterior. Con esto se pueden evitar enfermedades, tales como la gripe, resfriados, entre otros.

5.1.5.2. Aislamiento acústico

En las zonas urbanas los niveles de ruido son altos. Esto principalmente por el uso del transporte público, excavaciones, entre otras. Esto produce problemas auditivos en los habitantes. El tener una azotea verde reduce el nivel de decibeles (dB) y esto conlleva a prolongar la salud auditiva.

5.1.6. Beneficios sociales

La instalación de techos verdes promete convertirse en una opción cada vez más importante para los propietarios de edificios y los planificadores de la comunidad. Permite mejorar las condiciones de la ciudad y favorece la cohesión social y el encuentro entre personas a través de parques, plazas, áreas recreativas, zonas comunales, entre otros.

5.1.6.1. Aislamiento acústico

Las cubiertas vegetales aíslan acústicamente hasta 3 dB y son capaces de mejorar la insonorización hasta 8 dB, siendo una protección eficaz para edificios situados en entornos con alta contaminación. Esto es adecuado en viviendas situadas en la huella sonora de los aeropuertos, llegan a atenuar el ruido aéreo en 40 dB. Las plantas reducen el ruido mediante la absorción (transformación de la energía sonora en energía de movimiento y calórica), reflexión y deflexión (dispersión).

5.1.6.2. Retención de agua

En muchas grandes ciudades de Latinoamérica y Asia existe el peligro de que después de una lluvia torrencial las calles queden inundadas. Por su poder de retención de agua, los techos verdes llevan a la disminución de los "altos picos de agua". Un techo verde con 20 cm de sustrato de tierra y arcilla expandida puede, almacenar 90 mm de agua (90 litros por m²).

Los techos verdes, mediante su efecto de parachoques y retardo, alivian considerablemente las redes de alcantarillado. Estos siempre deben ser dimensionados para las precipitaciones máximas. Por lo tanto, se podría

redimensionar el sistema de alcantarillado, enjardinando grandes urbanizaciones y zonas industriales y así abaratar costos. En los sistemas separativos de desagüe podrían suprimirse las redes de alcantarillas para aguas pluviales, si el resto del agua se pudiera filtrar en el terreno.

6. REVISIÓN ESTRUCTURAL

6.1. Generalidades

Es importante en la etapa de estudio preliminar recolectar información. Esto con el fin de garantizar la compatibilidad del sistema de techo verde. Esto empleando edificación, el propósito y las condiciones climáticas medioambientales del lugar de implementación.

Construir una azotea verde sin considerar los requisitos mínimos y sus especificaciones técnicas, puede ocasionar problemas como goteras, humedades, inseguridad estructural, mantenimientos, reparaciones interminables, otros. El proceso constructivo debe cumplir con ciertos principios básicos. Esto como cualquier proyecto, debe prestarse una especial atención a la calidad, manejo y almacenamiento de los materiales.

La instalación debe ser cuidadosamente realizada por especialistas. Esto considerando aspectos de seguridad y salud específicos como la accesibilidad segura al techo, la protección al trabajar cerca de los límites de la azotea, el riesgo de caída, entre otros.

Tabla IX. **Pendientes mínimas en cubiertas de acuerdo con Agies**

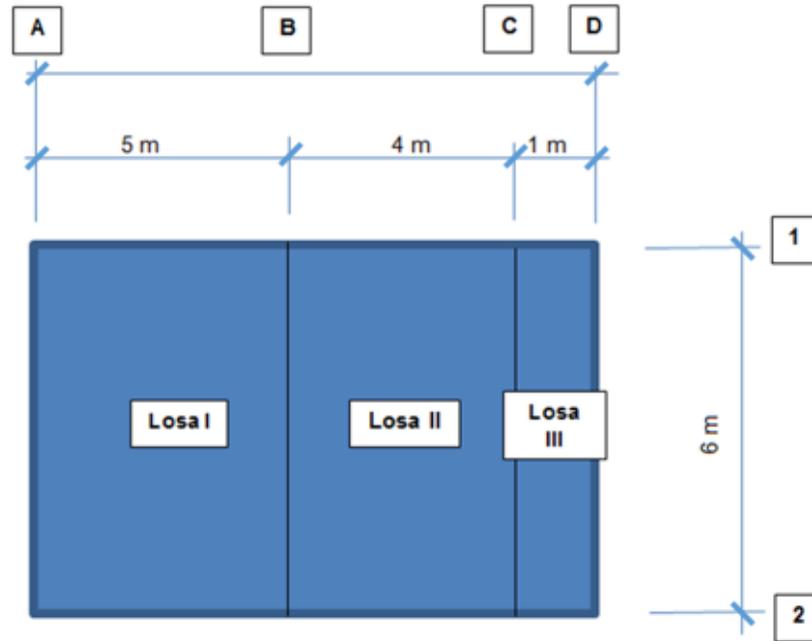
| Tipo de cubierta | Pendiente mínima |
|-------------------------|-------------------------|
| Teja de barro cocido | 42% |
| Fibro-cemento | 27% |
| Plástica | 20% |
| Metálica | 15% |
| Losa de concreto | 2% |

Fuente: Asociación guatemalteca de ingenieros estructurales y sísmicos. *Agies N SE 4-10 Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles. Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala. p. 77.*

6.2. Edificación existente

La instalación del sistema de techo verde debe garantizar el correcto funcionamiento del mismo. La edificación evaluada cuenta como soporte estructural sistema de losa maciza, vigas y columnas de concreto armado. Con esto se cuenta con la información para realizar los cálculos necesarios.

Figura 13. **Planta de losas, edificación existente**



Fuente: elaboración propia, empleando word.

6.2.1. **Tipo de cubierta**

La estructura soportante proporciona la superficie que sirve de soporte a la cubierta vegetal y es necesaria para poder instalar el sistema. Esta tendrá un borde perimetral de una hilera de *block* de 14x19x40 cm, lo que define las condiciones de impermeabilización necesarias. Debido a su ubicación la edificación cuenta con buen acceso de sol directo durante todo el año, aun estando ubicada en un área de la ciudad densamente construida.

De acuerdo a las características de la edificación a evaluar, se tiene la siguiente información sobre el tipo de cubierta:

- Losas I y II: losa maciza, soporte perimetral con placa de espesor constante; se apoya en vigas, muros y columnas.
- Losa III: losa maciza, en voladizo, con placa de espesor constante; se apoya en vigas.

6.2.2. Tipo de materiales

Los componentes en la construcción de un techo verde son similares tanto para techos planos como inclinados. Esto con las previsible alteraciones en la composición del sustrato para facilitar el drenaje. Es necesario considerar los siguientes aspectos de los materiales del techo:

- Los acabados de las losas existentes garantizan la homogeneidad, para evitar daños en la impermeabilización o problemas de infiltraciones o estancamientos de agua.
- Los materiales utilizados en el sistema de drenajes son adecuados. El sistema garantiza el manejo de las aguas de lluvia; cuenta con acceso a la cubierta para el mantenimiento necesario e inspecciones periódicas.
- De acuerdo a la información existente se consideran las siguientes características de los materiales:

Tabla X. **Resumen de información de materiales, edificación existente**

| Tipo de material | Dato |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Concreto | Resistencia 210 kg/cm ² Peso 2 400 kg/m ³ |
| Acero No. 3, grado 40 | Resistencia 2 810 kg/cm ² |
| Agregados | Grueso, fino; de acuerdo a la aplicación |
| Acabados | De acuerdo a la aplicación |

Fuente: elaboración propia.

6.2.3. Evaluación de grietas o fisuras

Para esto se realiza revisión externa e interna de los elementos estructurales principales (muros, losas, columnas y vigas). Esto considerando las grietas o fisuras en muros y losas; los tabiques no revisten ningún problema para la estabilidad de la estructura.

De acuerdo a las condiciones del proyecto no existen grietas o fisuras que pueden afectar el correcto funcionamiento del sistema de techo verde. En la cubierta se cuenta con pendientes adecuadas para asegurar el drenaje del sistema y evitar estancamientos de agua.

Tabla XI. **Resumen de información de edificación existente**

| | |
|--------------------|------------------------------------------------------|
| Material losa | Concreto armado |
| Tipo de estructura | Mampostería, marcos rígidos. |
| Tipo de losa | Cubierta, losa maciza, reforzada en dos direcciones. |

Continuación de la tabla XI.

| | |
|------------------|--------------------------------------|
| Área total losas | 60 metros cuadrados |
| Espesor de losa | 0,12 m |
| Pendiente techo | Menor a 2 % |
| Características: | Uso de techo: tanque de agua, otros. |

Fuente: elaboración propia.

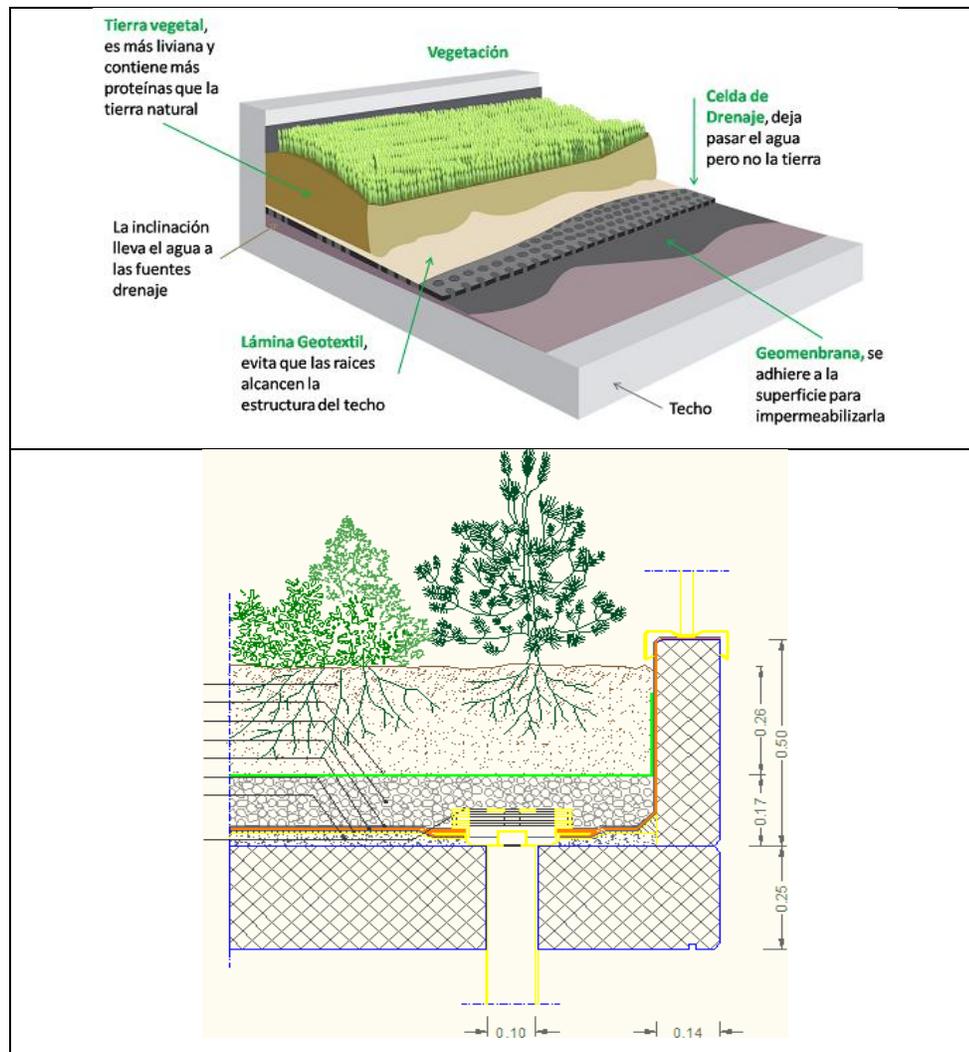
6.2.4. Evaluación estructural

Las consideraciones más importantes (o limitaciones) a la hora de realizar el diseño de una cubierta verde son: la pendiente de la azotea y la capacidad de la edificación de aguantar una nueva carga. Sin embargo cada vez hay cubiertas verdes más livianas. Los criterios de evaluación estructural se dividieron en cualitativos y cuantitativos. Estos se consideraron los siguientes aspectos:

- Limitar el acceso al techo únicamente para actividades de mantenimiento y limpieza.
- Para que una losa se le pueda implementar un techo verde, debe resistir una carga viva adicional de 110 kg/m².
- Identificación de las pendientes de la losa a ser usada como soporte estructural.
- Identificación del tipo de losa a ser usada como soporte estructural.

- Definición sistema de naturación a implementar (vegetación extensiva); no es necesario suministrarle nutrientes ni gran cantidad de agua. Esto debe tener buena capacidad de retención; su mantenimiento es bajo, con una carga adicional de $110,0 \text{ kg/m}^2$ en estado saturado.

Figura 14. **Detalle sistema de naturación propuesto, edificación existente**



Fuente: elaboración propia, empleando word.

Cuando no se cuente con la suficiente información se puede requerir la realización de ensayos. Esto para determinar las características mecánicas de materiales, de componentes estructurales y estructuras.

6.2.4.1. Evaluación parámetros estructurales, estructura existente

Los límites de la cubierta se consideran definidos por los paramentos exteriores e interiores y por las pendientes existentes. A manera de garantizar el normal escurrimiento del agua de lluvia hacia los drenajes existentes.

Para el sistema de naturacion se utilizará un 60 % del área de las losas, quedando el 40 % restante para actividades de mantenimiento (accesos y caminamientos). El análisis de cargas unitarias rara vez tiene que ver con las dimensiones. Se sacan a cada metro cuadrado, para propósitos de este trabajo se considera el área total del techo.

En el análisis se usaron hojas electrónicas con base en Excel; las cargas muertas corresponden al peso de los elementos fijos de la estructura y el peso de la estructura. Las cargas vivas corresponden al peso de los elementos que no son fijos en la estructura ($W_{v\text{diseño}}$ y $W_{v\text{sistema de naturacion}}$).

Tabla XII. **Resumen de información de cargas, edificación existente**

| Tipo de carga | | Dato | |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| | | Losa | |
| | | Estructura existente | Estructura existente + sistema naturación |
| W_v diseño | | 200,0 kg/m ² | 80,0 kg/m ² |
| W adicional sistema techo verde | | -- | 120,0 kg/m ² |
| Carga muerta | $W_{concreto}$ | 2 400 kg/m ³ | |
| | W_m acabados | 25,0 kg/m ² | |

Fuente: elaboración propia.

- Análisis como trabaja la losa
 - Losa I caso 6
 - Losa II caso 5
 - Losa III voladizo
 - Lado corto a /Lado largo b
 $m = a/b$; si $m \geq 0,5$ trabaja en dos direcciones, $m < 0,5$ trabaja en una dirección
- Integración de cargas (incluye sistema de naturación)

$$W_{v \text{ última}} = 1,7 * 200,0 \text{ kg/m}^2 = 340,0 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{m \text{ última}} = 1,4 * ((2400,0 \text{ kg/m}^3 * 0,12 \text{ m}) + 25 \text{ kg/m}^2) = 438,2 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{Tu} = 778,2 \text{ kg/m}^2$$

- Momentos actuantes: para determinar los momentos negativos y positivos actuantes en la losa, se utilizan tablas de coeficientes que consideran la relación de luces como las características de continuidad sobre los soportes. Las tablas de coeficientes cubren varios casos de continuidad de la losa (ver anexos).

- Losas I y II

$$M_{a+} = C_{adL} * W * a^2 + C_{aLL} * W * a^2$$

$$M_{a-} = C_{a-} * W * a^2$$

$$M_{b+} = C_{bdL} * W * a^2 + C_{bLL} * W * b^2$$

$$M_{b-} = C_{b-} * W * b^2$$

- Losa III

$$M = \frac{W * L^2}{2} = \frac{778,2 \text{ kg/m}^2 * (1 \text{ m})^2}{2} = 389,0 \text{ kg*m}$$

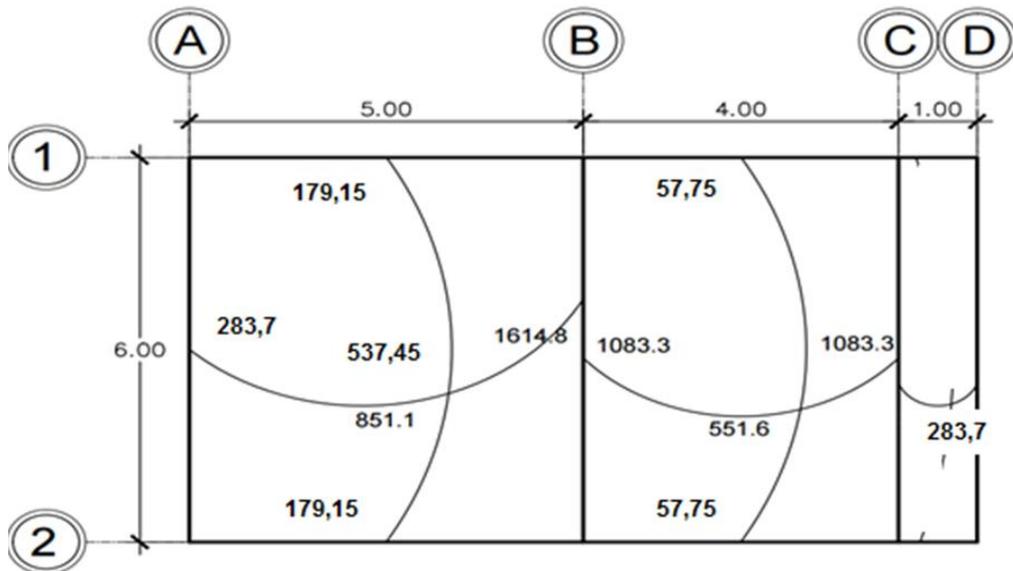
A continuación se presentan los resultados y el diagrama de momentos calculados, de acuerdo a cada caso.

Tabla XIII. **Resumen de cálculo de momentos actuantes, edificación existente**

| | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Losa I | $Ma+=0,042*438,2\text{kg/m}^2*25\text{m}^2+0,046*340,0\text{kg/m}^2*25\text{m}^2=851,1\text{kg-m}$ |
| | $Ma- = 0,083*778,2\text{kg/m}^2*25\text{m}^2 = 1614,8 \text{ kg-m}$ |
| | $Mb+=0,017*438,2\text{kg/m}^2*36\text{m}^2+0,022*340,0\text{kg/m}^2*36\text{m}^2=537,5 \text{ kg-m}$ |
| | $Mb- = 1/3 \text{ del momento positivo}$ |
| Losa II | $Ma+=0,036*438,2\text{kg/m}^2*16\text{m}^2+0,055*340,0\text{kg/m}^2*16\text{m}^2=551,6\text{kg-m}$ |
| | $Ma- = 0,087*778,2\text{kg/m}^2*16\text{m}^2 = 1083,3\text{kg-m}$ |
| | $Mb+=0,004*438,2\text{kg/m}^2*36\text{m}^2+0,009*340,0\text{kg/m}^2*36\text{m}^2=173,3\text{kg-m}$ |
| | $Mb- = 1/3 \text{ del momento positivo}$ |
| Losa III | $M=\frac{W*L^2}{2}=\frac{754,1\text{kg/m}^2*(1\text{m})^2}{2}=389,1\text{kg-m}$ |

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Diagrama de momentos calculados, edificación existente**



Fuente: elaboración propia, empleando word.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los cálculos, de acuerdo a cada caso.

Tabla XIV. **Resumen de resultados de valores de cargas y momentos, edificación existente (incluye sistema de naturación)**

| Losa | A | B | m (a/B) | Caso | T *perímetro/180 **L/10 | t _{final} (m) | CV _u (kg/m ²) | CM _u (kg/m ²) | CT _u (kg/m ²) | Momento (kg-m) | | | |
|------|---|---|------------|----------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | | | | | | M _{a+} | M _{a-} | M _{b+} | M _{b-} |
| I | 5 | 6 | 0,83 | 6 | 0,12 | 0,12 | 340,0 | 438,2 | 778,2 | 851,11 | 1614,76 | 537,45 | 1/3 + |
| II | 4 | 6 | 0,67 | 5 | 0,11 | | | | | 551,60 | 1083,25 | 173,26 | 1/3 + |
| III | 1 | - | - | Voladizo | 0,10 | | | | | 389,1 | | | |

Fuente: elaboración propia.

- Balanceo de momentos: debido a que en los puntos señalados en la figura los momentos son distintos, es necesario balancear los momentos en estos puntos antes de determinar el refuerzo sobre la losa.

Tabla XV. **Resumen de valores de momentos balanceados, edificación existente (A)**

Entre losas I y II

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| M ₂ = 1614,8 kg-m | M ₁ = 1083,3 kg-m |
| K ₂ = 1/5 m = 0,2 | K ₁ = 1/4 m = 0,25 |
| $FD = \frac{0,2}{0,2+0,25} = 0,444$ | $FD = \frac{0,25}{0,2+0,25} = 0,555$ |
| 0,44*531,52=236,227 | ,586*531,52=295,284 |
| M _B = 1378,538 kg-m | M _B = 1378,538 kg-m |

Continuación de la tabla XV.

Entre losas II y III

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| $M_2 = 1083,3 \text{ kg-m}$ | $M_1 = 389,1 \text{ kg-m}$ |
| $K_2 = 1/4 = 0,25$ | $K_1 = 1/1 \text{ m} = 1,0$ |
| $FD = \frac{0,25}{0,25+1} = 0,2$ | $FD = \frac{1,0}{0,25+1,0} = 0,8$ |
| $0,2 * 694,154 = 138,83$ | $0,8 * 694,154 = 555,32$ |
| $M_B = 944,424 \text{ kg-m}$ | $M_B = 944,424 \text{ kg-m}$ |

Fuente: elaboración propia.

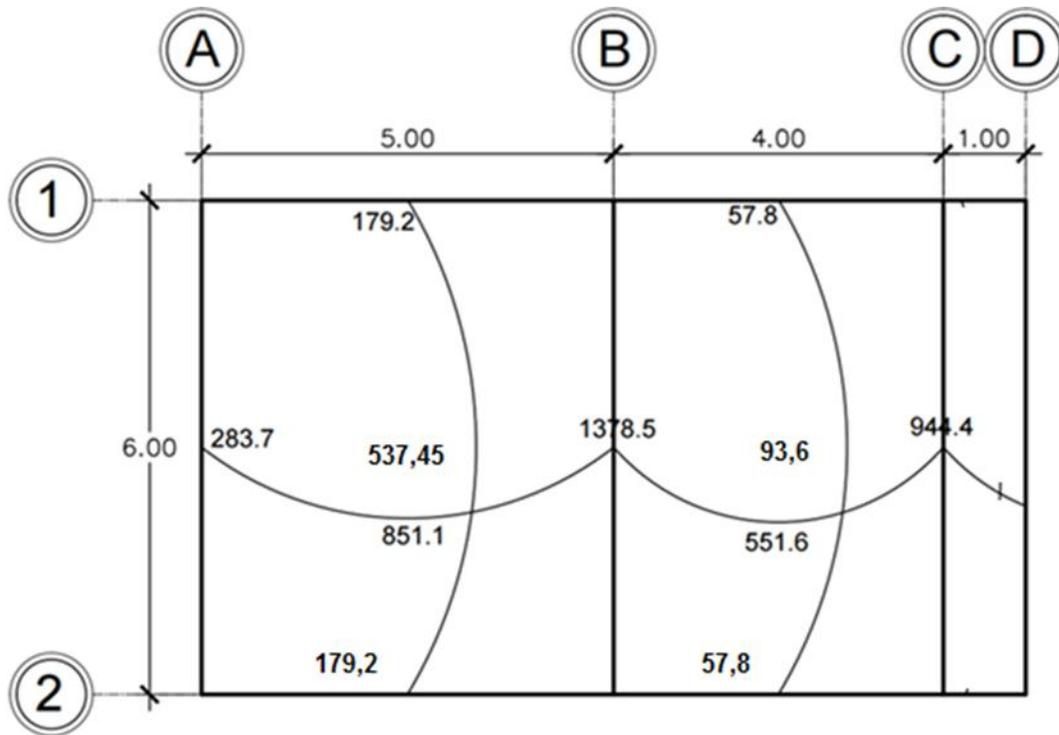
- Momentos máximos en la luz de 6 m

Tabla XVI. **Resumen de valores de momentos balanceados, edificación existente (B)**

| Losa | Valor momento |
|------|---------------|
| I | 537,45 kg-m |
| II | 173,26 kg-m |

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Diagrama de momentos balanceados, edificación existente



Fuente: elaboración propia, empleando word.

- Área de acero (ver planos en anexo núm.4)
 - Peralte efectivo de la losa
 - d = espesor de losa – recubrimiento – radio de la barra de refuerzo (núm. 3)
 - d = 12,0 – 2,0 – 0,5 = 9,5 cm

- Acero mínimo refuerzo por retracción y temperatura

$$A_{s_{\min}} = \frac{0,4 * 14\text{cm} * 100\text{cm} * 9,5\text{cm}}{2810,0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 1,8932\text{cm}^2$$

$$A_{s_{\text{temp}}} = 0,002 * 100\text{cm} * 12\text{cm} = 2,4 \text{ cm}^2$$

- Separación máxima del refuerzo

$$S_{\max} = 3t \text{ o } 30 \text{ cm} = 36 \text{ o } 30 \text{ cm}$$

- Espaciamiento (S): con el área de acero mínimo, se calcula un espaciamiento

$$S = \frac{\text{Área varilla} * 100}{A_{s_{\min}}}$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{0,71\text{cm}^2 * 100\text{cm}}{1,8932} = 37,50 \text{ cm}$$

- Análisis espaciamiento acero refuerzo: el espaciamiento encontrado (S) es mayor/menor al espaciamiento máximo permitido (Smax).

Se adopta el espaciamiento máximo y se determina el área de acero respectiva para dicho espaciamiento, se diseña con este último.

Tabla XVII. **Resumen de resultados de acero refuerzo edificación existente (incluye sistema de naturación)**

| | Valor momento (kg*m) | As* (cm ²) | S** (cm) | Acero mínimo (cm ²) |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|----------|---------------------------------------------------|
| Losa existente | 1378,538 | 5,96 | 11,91 | As _{min} 1,893 As _{tem} 2,40 |
| + sistema naturacion | 537,458 | 2,27 | 31,27 | |
| | 173,261 | 0,72 | 98,6 | |

$$* As = (b * d - \sqrt{(b * d)^2 - \frac{Mu * f'c}{0.003825 * f'c}}) * 0.85 * \left(\frac{f'c}{2810}\right)$$

$$**S = (As \Phi * 100 / >As)$$

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la información existente, la losa evaluada cuenta con el siguiente acero de refuerzo:

- Cubriendo la luz de 6,0 m

núm. 3 @ 30,0 (losas I y II)

núm. 3 @ 29,6 cm (losa III)

- Cubriendo con un solo armado las losas I, II y III

núm. 3 @ 11,91 cm

6.3. Edificación nueva

Los proyectos de instalación y construcción de techos verdes tienen un fuerte componente de ingeniería civil. Esto porque cuentan con todas las etapas de un proyecto de ingeniería.

La cubierta tendrá una pendiente de 5 %, cuenta con pretilas de por lo menos 20 cm y chaflanes a 45° de por lo menos 8 cm de altura en puntos de encuentro con elementos verticales. Debe incluirse acceso y caminamiento que permita transitar de manera segura de un lado al otro de la cubierta verde. Esto con materiales que no afecten las características del diseño paisajístico de la misma.

Al final de los trabajos del sistema de techo verde, los residuos deberán ser depositados y manejados conforme a lo establecido en las normas vigentes.

Tabla XVIII. **Espesor mínimo de losas macizas de acuerdo con Agies**

| Tipo de losa | Simplement e apoyada | Condición de apoyo | | |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | Un apoyo continuo | Ambos extremos continuos | Continuo con voladizo |
| Maciza en una dirección | L/20 | L/24 | L/28 | L/10 |
| Con viguetas en una dirección | L/16 | L/18.5 | L/21 | L/8 |

Fuente: Agies N SE 7.3.1.3. *Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles. Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala. p. 77.*

6.3.1. Losas

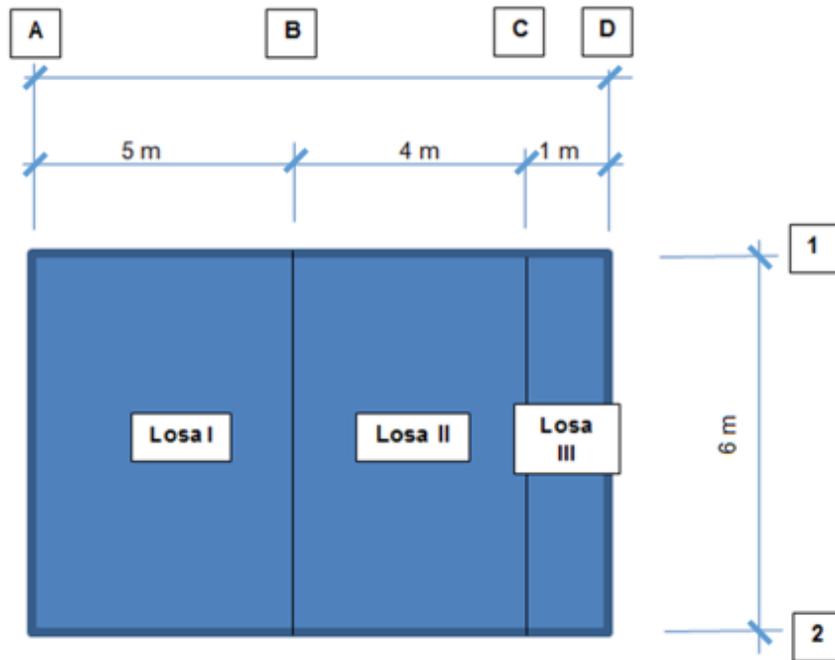
El diseño corresponde a una losa maciza, con espesor constante, ya que constructivamente ofrece ventajas por su facilidad de armado. Sin embargo, resulta ser poco eficiente con la utilización de material. Esto debido a que la sección que este por debajo del eje neutro está sometida a esfuerzos de tracción.

La losa tiene una pendiente del 5 %, así como las instalaciones necesarias, para el funcionamiento del sistema de naturación.

Se presenta el diseño de acuerdo al tipo de cada losa. Se integra por los siguientes elementos:

- Losas I y II: losa maciza, perimetral con placa de espesor constante; se apoyan en vigas, muros y columnas.
- Losa III: losa maciza, en voladizo, con placa de espesor constante; se apoya en vigas, muros y columnas.

Figura 17. **Planta de losas, edificación nueva**



Fuente: elaboración propia, empleando word.

6.3.2. **Características de los materiales**

En todo proyecto es importante el proceso de selección de los materiales a utilizar. De estos depende la resistencia y vida útil de la losa, así como los criterios de diseño.

Tabla XIX. **Resumen de información de materiales, edificación nueva**

| Tipo de material | Dato |
|-------------------------|------------------------------------------|
| Concreto estructural | Resistencia 280 kg/cm ² |
| Acero núm. 3, grado 40 | Resistencia 2810 kg/cm ² |
| Agregados | Grueso, fino; de acuerdo a la aplicación |
| Acabados | De acuerdo a la aplicación |

Fuente: elaboración propia.

6.3.3. Descripción del sistema de naturación

De acuerdo a las condiciones del proyecto. Este se utilizará el sistema de naturación semiintensivo (vegetación extensiva). Este puede estar integrado por una gran variedad de especies, tales como pastos, arbustos. Esto depende directamente del nivel de mantenimiento que se brinde a la vegetación. Por ello, es necesario el mantenimiento adecuado, con una carga adicional de 250,0 kg/m² en estado saturado.

6.3.4. Diseño estructural

El diseño de la losa se realizará para una azotea verde semi extensiva y con un espesor propuesto de 14 cm.

- Análisis como trabaja la losa
 - Losa I caso 6
 - Losa II caso 5

- Losa voladizo III
- Lado corto a /Lado largo b
 $m = a/b$; si $m \geq 0,5$ trabaja en dos direcciones, $m < 0,5$ trabaja en una dirección.

6.3.4.1. Análisis de cargas

De acuerdo a lo establecido en los criterios de diseño se necesita contar con una pendiente mínima del 5 % en la losa. Aquí se va instalar la azotea verde. Por esta razón, en el diseño de la losa, se tomaron en cuenta las cargas muertas, vivas y vivas máximas con la pendiente indicada.

Tabla XX. Resumen de información de cargas, edificación nueva

| Tipo de carga | | Dato |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| W_v diseño | | 125,0 kg/cm ² |
| Carga muerta | W_{concreto} | 2 400 kg/m ³ 0,14 m espesor |
| | W_m adicional sistema techo verde | 250,0 kg/m ² |
| | W_m acabados | 25,0 kg/m ² |

Fuente: elaboración propia.

- Integración de cargas (incluye sistema de naturación)

$$W_{v \text{ última}} = 1,7 * 125 = 212,5 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{m \text{ última}} = 1,4 * ((2400,0 \text{ kg/m}^3 * 0,14 \text{ m}) + 25 \text{ kg/m}^2 + 250 \text{ kg/m}^2) = 855,4 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{Tu} = 1067,9 \text{ kg/m}^2$$

- Momentos actuantes

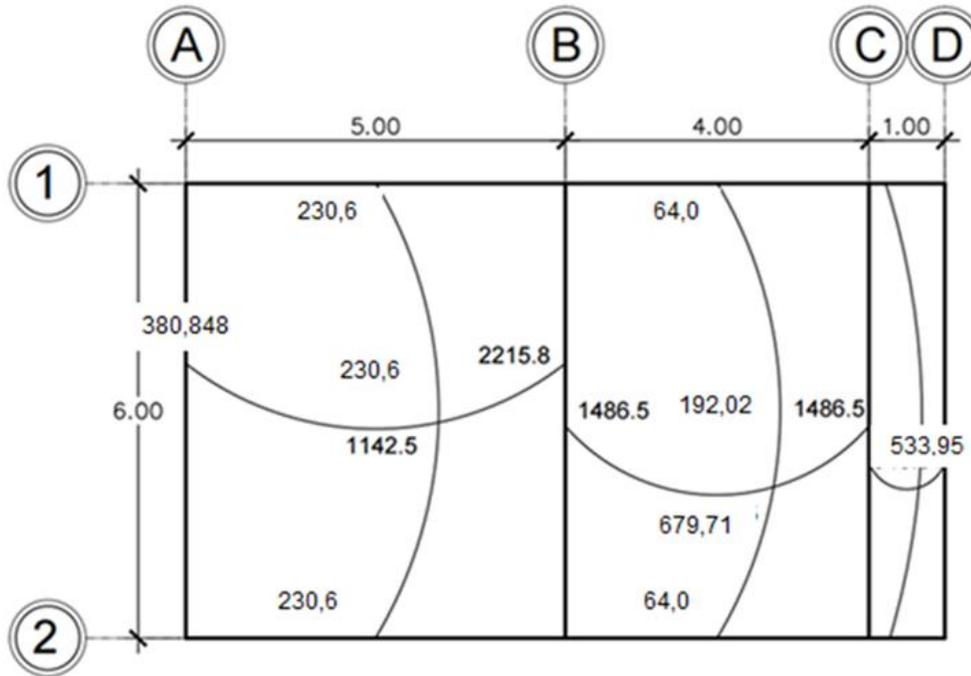
A continuación se presentan los resultados de los valores de momentos calculados, de acuerdo a cada caso.

Tabla XXI. **Resumen de cálculo de momentos actuantes, edificación nueva**

| | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Losa I | $Ma+=0,042*855,4 \text{ kg/m}^2*25\text{m}^2+0,046*212,5\text{kg/m}^2*25\text{m}^2= 1142,545 \text{ kg-m}$ |
| | $Ma- = 0,083*1067,9\text{kg/m}^2*25\text{m}^2 = 2215,893\text{kg-m}$ |
| | $Mb+=0,017*855,4\text{kg/m}^2*36\text{m}^2+0,022*212,5\text{kg/m}^2*36\text{m}^2= 691,80\text{kg-m}$ |
| | Mb- = 1/3 del momento positivo |
| Losa II | $Ma+=0,036*855,4\text{kg/m}^2*16\text{m}^2+0,055*212,5\text{kg/m}^2*16\text{m}^2= 679,7104\text{kg-m}$ |
| | $Ma- = 0,087*1067,9\text{kg/m}^2*16\text{m}^2 = 1486,517\text{kg-m}$ |
| | $Mb+=0,004*855,4*36\text{m}^2+0,009*212,5*36\text{m}^2= 192,028\text{kg-m}$ |
| | Mb- = 1/3 del momento positivo |
| Losa III | $M= \frac{W*L^2}{2} = \frac{1067,9\text{kg/m}^2*(1\text{m})^2}{2} = 533,95 \text{ kg-m}$ |

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Resultados valores de momentos calculados, edificación nueva**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los cálculos, de acuerdo a cada caso.

Tabla XXII. **Resumen de resultados de edificación nueva (incluye sistema de naturación)**

| Losa | A | B | m (a/B) | Caso | T *perímetro/180 **L/10 | t _{final} (m) | CV _u (kg/m ²) | CM _u (kg/m ²) | CT _u (kg/m ²) | Momento (kg-m) | | | |
|------|---|---|------------|----------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | | | | | | | M _a + | M _a - | M _b + | M _b - |
| I | 5 | 6 | 0,63 | 6 | 0,12 | 0,14 | 212,5 | 855,4 | 1067,9 | 1142,545 | 2215,8925 | 691,8048 | 1/3 + |
| II | 4 | 6 | 0,67 | 5 | 0,11 | | | | | 679,7104 | 1486,5168 | 192,0276 | 1/3 + |
| III | 1 | - | - | Voladizo | 0,10 | | | | | 533,95 | | | |

Fuente: elaboración propia.

- Balanceo de momentos: debido a que en los puntos señalados en la figura los momentos son distintos, es necesario balancear los momentos en estos puntos antes de determinar el refuerzo sobre la losa.

Tabla XXIII. **Resumen de valores de momentos balanceados, edificación nueva (A)**

Entre losas I y II

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $M_2 = 2215,893 \text{ kg-m}$ | $M_1 = 1486,517 \text{ kg-m}$ |
| $K_2 = 1/5 \text{ m} = 0,2$ | $K_1 = 1/4 \text{ m} = 0,25$ |
| $FD = \frac{0,2}{0,2+0,25} = 0,444$ | $FD = \frac{0,25}{0,2+0,25} = 0,556$ |
| $0,44 * 729,376 = 324,1671$ | $0,556 * 729,376 = 405,2088$ |
| $M_B = 1891,7258 \text{ kg-m}$ | $M_B = 1891,7258 \text{ kg-m}$ |

Continuación de la tabla XXIII.

Entre losas II y III

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| $M_2 = 1486,5168 \text{ kg-m}$ | $M_1 = 533,95 \text{ kg-m}$ |
| $K_2 = 1/4 = 0,25$ | $K_1 = 1/1 \text{ m} = 1,0$ |
| $FD = \frac{0,25}{0,25+1} = 0,2$ | $FD = \frac{1,0}{0,25+1,0} = 0,8$ |
| $0,2 * 952,5668 = 190,5133$ | $0,8 * 952,5668 = 762,0534$ |
| $M_B = 1296,0034 \text{ kg-m}$ | $M_B = 1296,0034 \text{ kg-m}$ |

Fuente: elaboración propia.

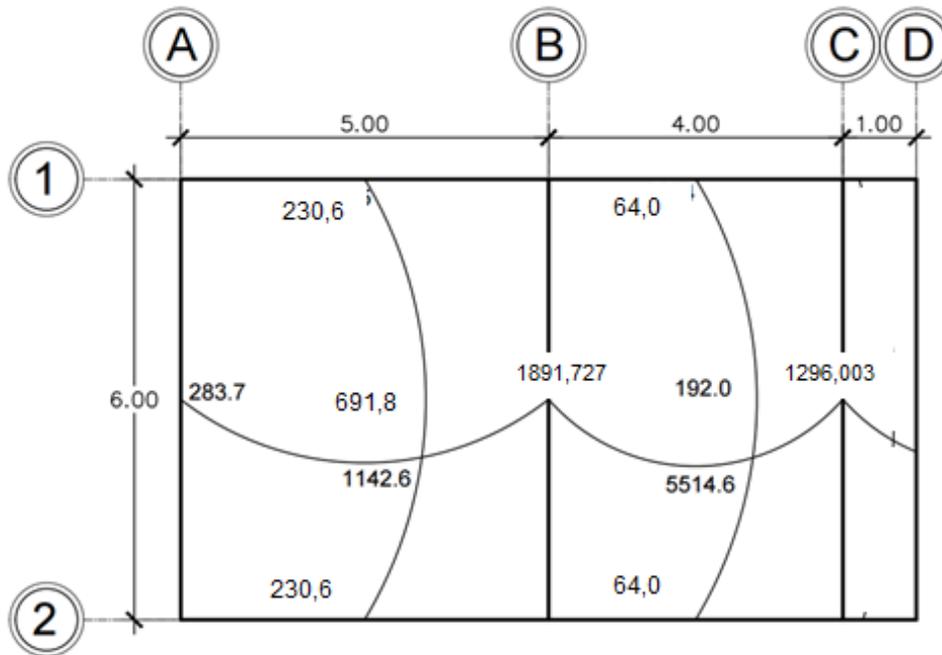
- Momentos máximos en la luz de 6 m

Tabla XXIV. **Resumen de valores de momentos balanceados, edificación nueva (B)**

| Losa | Valor momento |
|-------------|----------------------|
| I | 691,8048 kg-m |
| II | 192,0276 kg-m |

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Resultados valores de momentos balanceados, edificación nueva**



Fuente: elaboración propia, empleando word.

6.3.4.2. Peralte mínimo

Para la obtención del peralte mínimo se tomó el tablero más desfavorable de la losa. Esto se indica anteriormente y se utilizaron las siguientes expresiones según cada caso:

- $t = \text{perímetro} / 180$, para losas I y II
- $t = L / 10$, para losa III
- $d = t - 2,0 \text{ cm}$

6.3.4.3. Cortante de la losa

En el cálculo de la fuerza cortante se consideraron los esfuerzos internos. El cortante debe resistir las fuerzas resultantes de las tensiones paralelas de una sección transversal de la viga.

6.3.4.4. Acero de refuerzo

En el diseño de una losa perimetral es necesario consultar la tabla de coeficientes de momentos, para tableros rectangulares. El diseño cumple con el peralte mínimo, la cantidad de acero mínimo, la separación máxima.

- Área de acero (ver planos anexo núm. 4)
 - Peralte efectivo de la losa
d = espesor de losa – recubrimiento – radio de la barra de acero
núm. 3
d = 14,0 – 2,0 -0,5 = 11,5 cm
 - Acero mínimo refuerzo por retracción y temperatura

$$A_{s_{\min}} = \frac{0,4 \cdot 14 \cdot 100 \text{cm} \cdot 11,5 \text{cm}}{2810,0} = 2,292 \text{cm}^2$$

$$A_{s_{\text{temp}}} = 0,002 \cdot 100 \text{cm} \cdot 14 \text{cm} = 2,8 \text{cm}^2$$

$$S_{\text{temp}} = \frac{0,71 \text{cm}^2 \cdot 100 \text{cm}}{2,8 \text{cm}^2} = 25,35 \text{cm}, \text{ espaciamiento para el refuerzo por temperatura}$$

- Separación máxima del refuerzo.

$$S_{\max} = 3t \text{ o } 30 \text{ cm} = 42 \text{ o } 30 \text{ cm}$$

- Espaciamiento (S): con el área de acero mínimo, se calcula un espaciamiento.

$$S = \text{Área varilla} * 100 / A_{s_{\min}}$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{0,71 \text{ cm}^2 * 100 \text{ cm}}{2,292 \text{ cm}^2} = 30,98 \text{ cm}$$

- Análisis espaciamiento acero refuerzo: el espaciamiento encontrado (S) es mayor/menor al espaciamiento máximo permitido (S_{\max}).

Se adopta el espaciamiento máximo y se determina el área de acero respectiva para dicho espaciamiento y se diseña con este último.

De acuerdo a los resultados, la losa evaluada cuenta con el siguiente acero de refuerzo:

Tabla XXV. **Resumen de resultados de acero refuerzo edificación nueva (incluye sistema de naturación)**

| | Valor momento (kg*m) | As (cm²) | S (cm) | Acero mínimo (cm²) |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------------------------|
| Losa nueva | 1891,727 | 6,73 | 10,55 | As _{min} 2,29 As _{tem} 2,80 |
| + sistema | 691,80 | 2,48 | 29,46 | |
| naturacion | 192,0 | 0,66 | 30,98 | |

Fuente: elaboración propia.

- Cubriendo la luz de 6,0 m

núm. 3 @ 29,46 cm (losa I), núm. 3 @ 29,46 cm (losa II)
núm. 3 @ 25,35 cm (losa III)

- Cubriendo con un solo armado las losas I, II y III

núm. 3 @ 10,55 cm

CONCLUSIONES

1. En la actualidad, el desarrollo de cubiertas verdes, tanto en muros como techos, es un componente importante en el desarrollo urbano sostenible. Los techos verdes representan una nueva tendencia en el planeamiento de la construcción urbana.
2. La implementación de un techo verde trae grandes beneficios es de gran importancia para crear un sistema de ahorro energético amigable con el ambiente. Con esto se contribuye a la disminución del calentamiento global, así mismo la calidad de vida de los habitantes será muy favorable, ya que estos espacios sirven como áreas de relajación.
3. En el municipio de Guatemala se cuenta con regulaciones relacionadas con el uso de techos y muros verdes. En la ciudad capital se incluyen dentro del Plan de Ordenamiento Territorial (POT).
4. El diseño adecuado de un techo verde es fundamental, ya que de esta manera podrá funcionar correctamente y brindar todos los beneficios a los usuarios. En la actualidad se cuenta con alternativas bien definidas para distintos usos y necesidades, con especificaciones de cargas y recomendaciones para el diseño estructural.
5. Para el uso de techos verdes en edificaciones existentes o en proyectos nuevos, es necesaria la participación de un ingeniero civil. Esto garantiza que la estructura resiste el sistema de naturacion a implementar.

6. De acuerdo a los resultados la edificación existente evaluada, cuenta con la capacidad para soportar el sistema de naturacion propuesto (sistema extensivo), con la condición que no se pueden añadir ningún tipo de carga viva sobre la cubierta.

7. Se debe respetar la metodología propuesta para la la planificación, diseño e instalación de un techo verde. Esto para garantizar el buen funcionamiento del sistema de naturacion.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que los diferentes sectores de la sociedad relacionados impulsen la investigación, capacitación e información sobre los beneficios ambientales, económicos y sociales que representa tener una azotea verde, a todos los interesados.
2. Dentro de los congresos estudiantiles, impulsar campañas que permitan difundir las ventajas y beneficios de los techos verdes a los interesados y profesionales de la construcción.
3. Los profesionales como arquitectos e ingenieros civiles impulsar y aplicar esta tecnología en el proceso de planificación y construcción de obras nuevas.
4. De acuerdo al sistema de naturación utilizado es necesario desarrollar el programa de mantenimiento adecuado. Esto para que funcione de la mejor forma.
5. En edificaciones existentes se recomienda la participación de un ingeniero civil para que certifique que la estructura resiste el sistema de naturación.

BIBLIOGRAFÍA

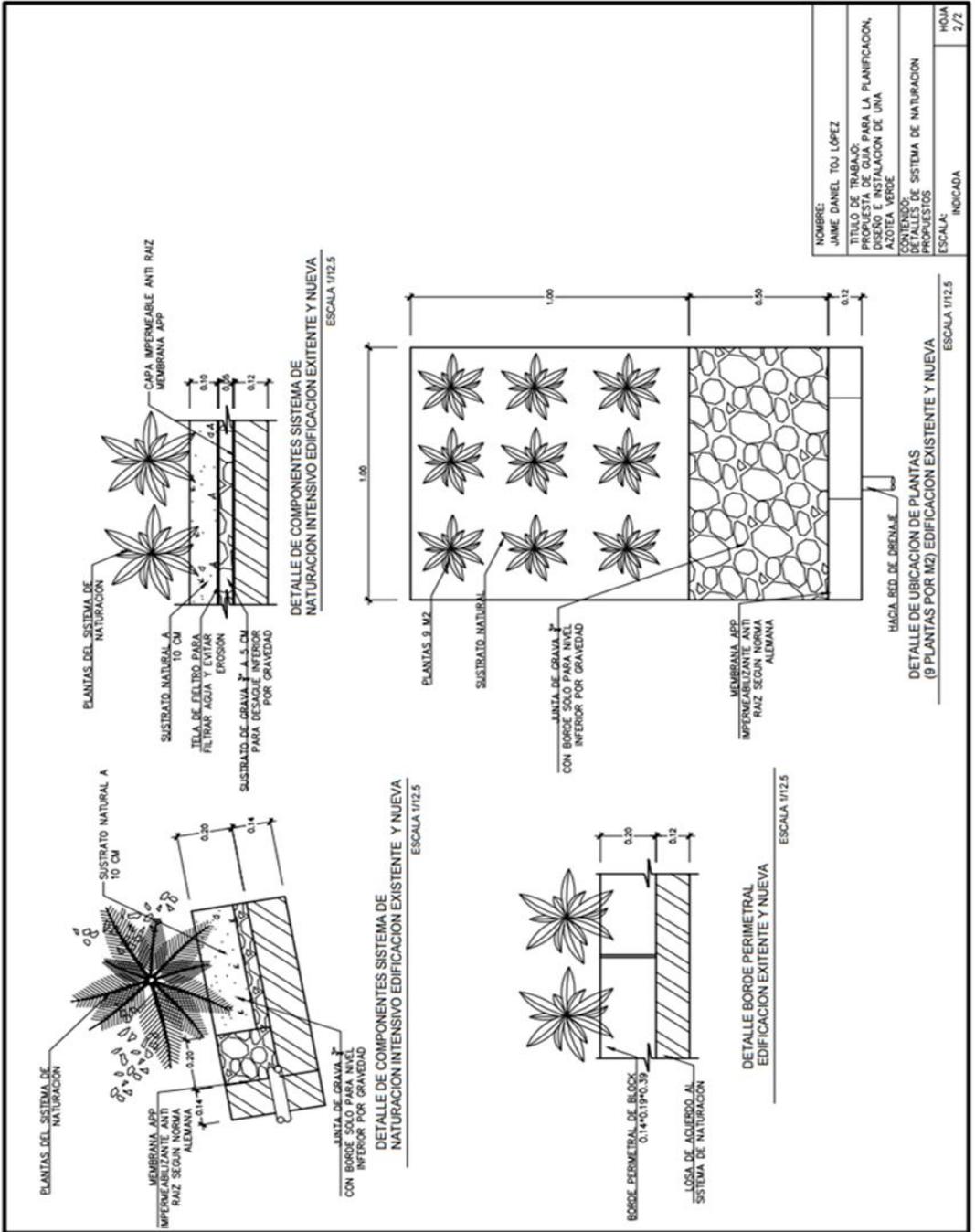
1. Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sísmicos. Agies N SE 4-10. *Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles. Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala.* p. 77.
2. De RHODES VALBUENA, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda, Tolima (Colombia).* Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Bogotá D.C 2012. p. 67.
3. ESTUDIOS HISTÓRICOS – CDHRP- Agosto 2009 - Nº 2 – ISSN: 1688 – 5317. *La ciudad y la urbanización.* Rosario Bottino Bernardi. http://www.estudioshistoricos.org/edicion_2/rosario_bottino.pdf. Consulta: enero de 2014.
4. Gestión en Recursos Naturales. *Impacto Ambiental.* [en línea]. <<http://www.grn.cl/impacto-ambiental.html>>. [Consulta: diciembre de 2014].
5. GUERRERO USUGA, Ginna Zamara; GÁMEZ TABIMBA, Paola Andrea. *Evaluación y pre diseño de techos verdes para la reutilización de aguas lluvias en la UMNG: una perspectiva desde universidad saludable.* Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil, Bogotá D.C. 2014. p. 76.

6. LANDA, Horacio. *Glosario desarrollo urbano*. [en línea]. <http://www.hic-al.org/glosario_definicion.cfm?id_entrada=19>. [Consulta: febrero de 2015].

7. ROITMAN, Sonia. *Planificación urbana y actores sociales intervinientes: el desarrollo de urbanizaciones cerradas*. Barcelona, mayo de 2008. Universidad de Barcelona>. [Consulta: diciembre de 2014].

8. sitiosolar.com. *La ley de techos y terrazas verdes de Buenos Aires (Argentina)*. [en línea]. <<http://www.sitiosolar.com/la-ley-de-techos-y-terrazas-verdes-de-buenos-aires-argentina/>>. [Consulta: enero de 2015].

Continuación del apéndice 1.



| | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| NOMBRE: | JAME DANIEL TOU LÓPEZ |
| TÍTULO DE TRABAJO: | PROPUESTA DE OJA PARA LA PLANIFICACION, DISEÑO E INSTALACION DE UNA AZOTEA VERDE |
| CONTENIDO: | CONTENIDO DEL SISTEMA DE NATURACION PROYECTOS |
| ESCALA: | INDICADA |
| HOJA: | 2/2 |

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

ANEXOS

Anexo 1. Tablas de coeficientes momentos negativos

Coefficientes para momentos negativos en losas^a

$$M_{a,neg} = C_{a,neg} w l_x^2$$

donde w = carga muerta más viva uniforme total

$$M_{b,neg} = C_{b,neg} w l_y^2$$

| Relación $m = \frac{l_x}{l_y}$ | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 | Caso 9 |
|-----------------------------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|--------|--------|----------------|----------------|
| 1.00 | | | | | | | | | |
| | | 0.045 0.045 | 0.076 | 0.050 0.050 | 0.075 | 0.071 | 0.071 | 0.033 0.061 | 0.061 0.033 |
| 0.95 | | 0.050 0.041 | 0.072 | 0.055 0.045 | 0.079 | 0.075 | 0.067 | 0.038 0.056 | 0.065 0.029 |
| 0.90 | | 0.055 0.037 | 0.070 | 0.060 0.040 | 0.080 | 0.079 | 0.062 | 0.043 0.052 | 0.068 0.025 |
| 0.85 | | 0.060 0.031 | 0.065 | 0.066 0.034 | 0.082 | 0.083 | 0.057 | 0.049 0.046 | 0.072 0.021 |
| 0.80 | | 0.065 0.027 | 0.061 | 0.071 0.029 | 0.083 | 0.086 | 0.051 | 0.055 0.041 | 0.075 0.017 |
| 0.75 | | 0.069 0.022 | 0.056 | 0.076 0.024 | 0.085 | 0.088 | 0.044 | 0.061 0.036 | 0.078 0.014 |
| 0.70 | | 0.074 0.017 | 0.050 | 0.081 0.019 | 0.086 | 0.091 | 0.038 | 0.068 0.029 | 0.081 0.011 |
| 0.65 | | 0.077 0.014 | 0.043 | 0.085 0.015 | 0.087 | 0.093 | 0.031 | 0.074 0.024 | 0.083 0.008 |
| 0.60 | | 0.081 0.010 | 0.035 | 0.089 0.011 | 0.088 | 0.095 | 0.024 | 0.080 0.018 | 0.085 0.006 |
| 0.55 | | 0.084 0.007 | 0.028 | 0.092 0.008 | 0.089 | 0.096 | 0.019 | 0.085 0.014 | 0.086 0.005 |
| 0.50 | | 0.086 0.006 | 0.022 | 0.094 0.006 | 0.090 | 0.097 | 0.014 | 0.089 0.010 | 0.088 0.003 |

^a Un borde achurado indica que la losa continúa a través o se encuentra empotrada en el apoyo; un borde sin marcas indica un apoyo donde la resistencia torsional es despreciable.

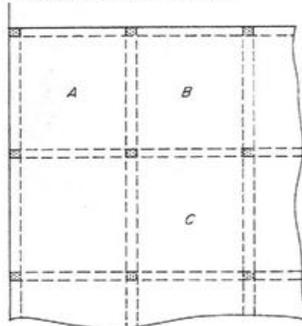


FIGURA 12.8
Planta de una losa de piso típica en dos direcciones con vigas en los ejes de columnas.

Fuente: ACI 318.

Anexo 2. Tablas de coeficientes momentos positivos W_m

Coefficientes para momentos positivos debidos a carga muerta en losas*

$$M_{a,pos,dl} = C_{a,dl} w l_a^2$$

donde w = carga muerta uniforme total

$$M_{b,pos,dl} = C_{b,dl} w l_b^2$$

| Relación $m = \frac{l_a}{l_b}$ | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 | Caso 9 | |
|-----------------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1.00 | | | | | | | | | | |
| $C_{a,dl}$ | 0.036 | 0.018 | 0.018 | 0.027 | 0.027 | 0.033 | 0.027 | 0.020 | 0.023 | |
| $C_{b,dl}$ | 0.036 | 0.018 | 0.027 | 0.027 | 0.018 | 0.027 | 0.033 | 0.023 | 0.020 | |
| 0.95 | $C_{a,dl}$ | 0.040 | 0.020 | 0.021 | 0.030 | 0.028 | 0.036 | 0.031 | 0.022 | 0.024 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.033 | 0.016 | 0.025 | 0.024 | 0.015 | 0.024 | 0.031 | 0.021 | 0.017 |
| 0.90 | $C_{a,dl}$ | 0.045 | 0.022 | 0.025 | 0.033 | 0.029 | 0.039 | 0.035 | 0.025 | 0.026 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.029 | 0.014 | 0.024 | 0.022 | 0.013 | 0.021 | 0.028 | 0.019 | 0.015 |
| 0.85 | $C_{a,dl}$ | 0.050 | 0.024 | 0.029 | 0.036 | 0.031 | 0.042 | 0.040 | 0.029 | 0.028 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.026 | 0.012 | 0.022 | 0.019 | 0.011 | 0.017 | 0.025 | 0.017 | 0.013 |
| 0.80 | $C_{a,dl}$ | 0.056 | 0.026 | 0.034 | 0.039 | 0.032 | 0.045 | 0.045 | 0.032 | 0.029 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.023 | 0.011 | 0.020 | 0.016 | 0.009 | 0.015 | 0.022 | 0.015 | 0.010 |
| 0.75 | $C_{a,dl}$ | 0.061 | 0.028 | 0.040 | 0.043 | 0.033 | 0.048 | 0.051 | 0.036 | 0.031 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.019 | 0.009 | 0.018 | 0.013 | 0.007 | 0.012 | 0.020 | 0.013 | 0.007 |
| 0.70 | $C_{a,dl}$ | 0.068 | 0.030 | 0.046 | 0.046 | 0.035 | 0.051 | 0.058 | 0.040 | 0.033 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.016 | 0.007 | 0.016 | 0.011 | 0.005 | 0.009 | 0.017 | 0.011 | 0.006 |
| 0.65 | $C_{a,dl}$ | 0.074 | 0.032 | 0.054 | 0.050 | 0.036 | 0.054 | 0.065 | 0.044 | 0.034 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.013 | 0.006 | 0.014 | 0.009 | 0.004 | 0.007 | 0.014 | 0.009 | 0.005 |
| 0.60 | $C_{a,dl}$ | 0.081 | 0.034 | 0.062 | 0.053 | 0.037 | 0.056 | 0.073 | 0.048 | 0.036 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.010 | 0.004 | 0.011 | 0.007 | 0.003 | 0.006 | 0.012 | 0.007 | 0.004 |
| 0.55 | $C_{a,dl}$ | 0.088 | 0.035 | 0.071 | 0.056 | 0.038 | 0.058 | 0.081 | 0.052 | 0.037 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.008 | 0.003 | 0.009 | 0.005 | 0.002 | 0.004 | 0.009 | 0.005 | 0.003 |
| 0.50 | $C_{a,dl}$ | 0.095 | 0.037 | 0.080 | 0.059 | 0.039 | 0.061 | 0.089 | 0.056 | 0.038 |
| | $C_{b,dl}$ | 0.006 | 0.002 | 0.007 | 0.004 | 0.001 | 0.003 | 0.007 | 0.004 | 0.002 |

* Un borde achurado indica que la losa continúa a través o se encuentra empotrada en el apoyo; un borde sin marcas indica un apoyo donde la resistencia torsional es despreciable.

Fuente: ACI 318.

Anexo 3. Tablas de coeficientes momentos positivos W_v

TABLA 12.5
Coefficientes para momentos positivos debidos a carga viva en losas^a

$$M_{a,posit,II} = C_{a,II} w l_a^2$$

donde w = carga viva uniforme total

$$M_{b,posit,II} = C_{b,II} w l_b^2$$

| Relación $m = \frac{l_a}{l_b}$ | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 | Caso 9 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.00 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.036 | 0.027 | 0.027 | 0.032 | 0.032 | 0.035 | 0.032 | 0.028 | 0.030 |
| $C_{b,II}$ | 0.036 | 0.027 | 0.032 | 0.032 | 0.027 | 0.032 | 0.035 | 0.030 | 0.028 |
| 0.95 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.040 | 0.030 | 0.031 | 0.035 | 0.034 | 0.038 | 0.036 | 0.031 | 0.032 |
| $C_{b,II}$ | 0.033 | 0.025 | 0.029 | 0.029 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.027 | 0.025 |
| 0.90 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.045 | 0.034 | 0.035 | 0.039 | 0.037 | 0.042 | 0.040 | 0.035 | 0.036 |
| $C_{b,II}$ | 0.029 | 0.022 | 0.027 | 0.026 | 0.021 | 0.025 | 0.029 | 0.024 | 0.022 |
| 0.85 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.050 | 0.037 | 0.040 | 0.043 | 0.041 | 0.046 | 0.045 | 0.040 | 0.039 |
| $C_{b,II}$ | 0.026 | 0.019 | 0.024 | 0.023 | 0.019 | 0.022 | 0.026 | 0.022 | 0.020 |
| 0.80 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.056 | 0.041 | 0.045 | 0.048 | 0.044 | 0.051 | 0.051 | 0.044 | 0.042 |
| $C_{b,II}$ | 0.023 | 0.017 | 0.022 | 0.020 | 0.016 | 0.019 | 0.023 | 0.019 | 0.017 |
| 0.75 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.061 | 0.045 | 0.051 | 0.052 | 0.047 | 0.055 | 0.056 | 0.049 | 0.046 |
| $C_{b,II}$ | 0.019 | 0.014 | 0.019 | 0.016 | 0.013 | 0.016 | 0.020 | 0.016 | 0.013 |
| 0.70 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.068 | 0.049 | 0.057 | 0.057 | 0.051 | 0.060 | 0.063 | 0.054 | 0.050 |
| $C_{b,II}$ | 0.016 | 0.012 | 0.016 | 0.014 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.014 | 0.011 |
| 0.65 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.074 | 0.053 | 0.064 | 0.062 | 0.055 | 0.064 | 0.070 | 0.059 | 0.054 |
| $C_{b,II}$ | 0.013 | 0.010 | 0.014 | 0.011 | 0.009 | 0.010 | 0.014 | 0.011 | 0.009 |
| 0.60 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.081 | 0.058 | 0.071 | 0.067 | 0.059 | 0.068 | 0.077 | 0.065 | 0.059 |
| $C_{b,II}$ | 0.010 | 0.007 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.008 | 0.011 | 0.009 | 0.007 |
| 0.55 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.088 | 0.062 | 0.080 | 0.072 | 0.063 | 0.073 | 0.085 | 0.070 | 0.063 |
| $C_{b,II}$ | 0.008 | 0.006 | 0.009 | 0.007 | 0.005 | 0.006 | 0.009 | 0.007 | 0.006 |
| 0.50 | | | | | | | | | |
| $C_{a,II}$ | 0.095 | 0.066 | 0.088 | 0.077 | 0.067 | 0.078 | 0.092 | 0.076 | 0.067 |
| $C_{b,II}$ | 0.006 | 0.004 | 0.007 | 0.005 | 0.004 | 0.005 | 0.007 | 0.005 | 0.004 |

^a Un borde achurado indica que la losa continúa a través o se encuentra empotrada en el apoyo; un borde sin marcas indica un apoyo donde la resistencia torsional es despreciable.

bordes apoyados. Como el acero positivo se coloca en dos capas, la altura efectiva d para la capa superior es menor que la de la capa inferior en un diámetro de barra. Puesto que los momentos en la dirección larga son los más pequeños, resulta económico colocar el acero en esa dirección por encima de las barras en la dirección corta. Este problema no se presenta para el refuerzo negativo perpendicular a las vigas de apoyo en los bordes, excepto en las esquinas donde los momentos son pequeños.

Para las losas en dos direcciones pueden utilizarse barras rectas, cortadas cuando ya no sean necesarias, o barras dobladas; pero la economía en la fabricación y en la colocación favorecerá generalmente la utilización de barras rectas en toda la losa. La localización precisa de los puntos de inflexión (o líneas de inflexión) no se puede determinar fácilmente porque depende de la relación de luces, de la proporción entre la carga viva y la muerta, y de las condiciones de continuidad en los bordes. Los puntos estándares de corte y doblamiento de las barras en vigas, resumidos en la figura 5.15, pueden utilizarse igualmente para losas apoyadas en los bordes.

Fuente: ACI 318.

Anexo 4. **Tablas relación de la carga W que se transmite, para calcular el cortante y las cargas en los apoyos**

TABLA 12.6
Relación de la carga W que se transmite en las direcciones l_a y l_b para calcular el cortante en la losa y las cargas en los apoyos^a

| Relación $m = \frac{l_a}{l_b}$ | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 | Caso 9 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.00 | | | | | | | | | |
| W_a | 0.50 | 0.50 | 0.17 | 0.50 | 0.83 | 0.71 | 0.29 | 0.33 | 0.67 |
| W_b | 0.50 | 0.50 | 0.83 | 0.50 | 0.17 | 0.29 | 0.71 | 0.67 | 0.33 |
| 0.95 | W_a | 0.55 | 0.55 | 0.20 | 0.55 | 0.86 | 0.75 | 0.33 | 0.38 |
| | W_b | 0.45 | 0.45 | 0.80 | 0.45 | 0.14 | 0.25 | 0.67 | 0.62 |
| 0.90 | W_a | 0.60 | 0.60 | 0.23 | 0.60 | 0.88 | 0.79 | 0.38 | 0.43 |
| | W_b | 0.40 | 0.40 | 0.77 | 0.40 | 0.12 | 0.21 | 0.62 | 0.57 |
| 0.85 | W_a | 0.66 | 0.66 | 0.28 | 0.66 | 0.90 | 0.83 | 0.43 | 0.49 |
| | W_b | 0.34 | 0.34 | 0.72 | 0.34 | 0.10 | 0.17 | 0.57 | 0.51 |
| 0.80 | W_a | 0.71 | 0.71 | 0.33 | 0.71 | 0.92 | 0.86 | 0.49 | 0.55 |
| | W_b | 0.29 | 0.29 | 0.67 | 0.29 | 0.08 | 0.14 | 0.51 | 0.45 |
| 0.75 | W_a | 0.76 | 0.76 | 0.39 | 0.76 | 0.94 | 0.88 | 0.56 | 0.61 |
| | W_b | 0.24 | 0.24 | 0.61 | 0.24 | 0.06 | 0.12 | 0.44 | 0.39 |
| 0.70 | W_a | 0.81 | 0.81 | 0.45 | 0.81 | 0.95 | 0.91 | 0.62 | 0.68 |
| | W_b | 0.19 | 0.19 | 0.55 | 0.19 | 0.05 | 0.09 | 0.38 | 0.32 |
| 0.65 | W_a | 0.85 | 0.85 | 0.53 | 0.85 | 0.96 | 0.93 | 0.69 | 0.74 |
| | W_b | 0.15 | 0.15 | 0.47 | 0.15 | 0.04 | 0.07 | 0.31 | 0.26 |
| 0.60 | W_a | 0.89 | 0.89 | 0.61 | 0.89 | 0.97 | 0.95 | 0.76 | 0.80 |
| | W_b | 0.11 | 0.11 | 0.39 | 0.11 | 0.03 | 0.05 | 0.24 | 0.20 |
| 0.55 | W_a | 0.92 | 0.92 | 0.69 | 0.92 | 0.98 | 0.96 | 0.81 | 0.85 |
| | W_b | 0.08 | 0.08 | 0.31 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.19 | 0.15 |
| 0.50 | W_a | 0.94 | 0.94 | 0.76 | 0.94 | 0.99 | 0.97 | 0.86 | 0.89 |
| | W_b | 0.06 | 0.06 | 0.24 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.14 | 0.11 |

^a Un borde achurado indica que la losa continúa a través o se encuentra empotrada en el apoyo; un borde sin marcas indica un apoyo donde la resistencia torsional es despreciable.

De acuerdo con el Código ACI 13.3.1, el refuerzo mínimo en cada una de las direcciones de losas en dos direcciones es el necesario para el control de grietas de retracción de fraguado y temperatura, como está dado en la tabla 12.2. Para sistemas en dos direcciones, el espaciamiento del refuerzo a flexión en las secciones críticas no debe exceder dos veces el espesor de la losa h .

Los momentos torsionales analizados en la sección 12.4 tienen importancia únicamente en las esquinas exteriores de un sistema de losa en dos direcciones, donde tienden a agrietar la losa en la parte inferior a lo largo de la diagonal del panel, y en la parte superior en dirección perpendicular a la diagonal del panel. Debe proporcionarse refuerzo especial tanto en la parte superior como en la inferior de las esquinas exteriores de la losa, a lo largo de una distancia en cada dirección igual a un quinto de la luz más larga del panel de esquina medida desde la esquina como aparece en la figura 12.9. El refuerzo en la parte superior de la losa debe ser paralelo a la diagonal desde la esquina, mientras que el de la parte inferior debe ubicarse en forma perpendicular a la diagonal. Como alternativa, las dos filas de acero pueden colocarse en dos bandas paralelas a los lados de la losa. En cualquier caso, de acuerdo con el Código ACI

Fuente: ACI 318.