



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

Facultad de TI, Ingeniería y Arquitectura

Escuela de Ingeniería Civil

Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de Grado

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FACHADAS DE VIDRIO
TEMPLADO CON SISTEMA MURO CORTINA, ANTE CARGAS DE
SISMO EN COSTA RICA

Autora: Mary Paz Castillo Rodríguez

Tutor: Gerardo Chacón

Heredia

Junio, 2018



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FACHADAS DE VIDRIO TEMPLADO CON SISTEMA MURO CORTINA, ANTE CARGAS DE SISMO EN COSTA RICA.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS

TUTOR

ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO

LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS

TUTOR

ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO

LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD (TESIS DE GRADO)**

Heredia, 10 de Mayo, de 2018


Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Tesis de Grado) bajo el título Análisis Estructural de fachadas de vidrio templado con sistema muro cortina, ante cargas de sismo en Costa Rica por parte del estudiante: Mary Paz Castillo Rodríguez, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Gerardo Enrique Chacón Rojas



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD (TESIS DE GRADO)**

Heredia, 10 de Mayo, de 2018


Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Tesis de Grado) bajo el título Análisis estructural de fachadas de vidrio templado con sistema muro cortina, ante cargas de sismo en Costa Rica por parte del estudiante: Mary Paz Castillo Rodríguez, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ronald Eugenio Jiménez Castro

Carta de filóloga

21 de mayo, 2019.

Señores
Facultad de TI Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Latina de Costa Rica

Estimados señores

El suscrito Edith Raissa Pizarro Alfaro con cédula de identidad número 401780133, profesional en Filología, hace constar que revisó el documento denominado “ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FACHADAS DE VIDRIO TEMPLADO CON SISTEMA MURO CORTINA, ANTE CARGAS DE SISMO EN COSTA RICA”, de la estudiante **Mary Paz Castillo Rodríguez** cédula 504090653, al cual se le aplicaron las revisiones y observaciones relacionadas con aspectos de construcción gramatical, ortografía, redacción, entre otros.

Dado lo anterior, certifico que el documento contiene las observaciones y correcciones solicitadas, quedando de conformidad con lo pactado.

Atentamente,



Licda. Edith Raissa Pizarro Alfaro
Código del Colegio 35554



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; " ; "

Mary Paz Castillo Rodríguez

De la Carrera / Programa: Licenciatura en Ingeniería Civil
autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* Tesis de grado
titulado:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FACHADAS DE VIDRIO TEMPLADO CON SISTEMA MURO CORTINA, ANTE CARGAS DE SISMO EN COSTA RICA

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* 23 del mes mayo del año 2019 a las 16 horas. Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*

Agradecimientos

Agradecer primeramente a Dios que es el pilar fundamental de mi vida; el que hace posible que cada día cumpla mis sueños y metas.

A mis padres y hermana, que con su apoyo, consejos y amor me impulsaron día a día a cumplir mis objetivos. Ellos me enseñaron a fijarme metas y cumplirlas a pesar de las adversidades.

A mi tutor Gerardo Chacón Rojas, por su apoyo incondicional, el compromiso adquirido a lo largo de la resolución de la tesis, la confianza, su tiempo invertido y el gran aporte que me dio, por medio de su conocimiento.

A los profesores Danilo Hernández, José María Ulate y Olman Elizondo, quienes atendieron y aclararon mis consultas con la mayor disposición.

A la empresa Extralum, por permitirme realizar el proyecto de graduación en un tema de interés para ellos. Además, por todo el apoyo, tiempo invertido y facilidad de información generada durante el proceso.

A la ingeniera Nathalia Sánchez, por su ayuda y seguimiento en el proyecto, como representante por parte de Extralum.

A el departamento de ingeniería del Instituto Nacional de Seguros por todo el apoyo e información brindada.

Al ingeniero Luis Miguel Torres por todo el aporte e información brindada en el edificio correspondiente a Universidad de Costa Rica Sede Limón.

Al ingeniero Víctor Hidalgo por todo el aporte e información brindada en el edificio correspondiente a Universidad Nacional Sede Heredia.

Con amor,

Dedicado a mis padres y hermana.

Resumen

El presente Trabajo Final de Graduación consta de una investigación del sistema muro cortina con sistema de silicón estructura y vidrio monolítico. Tiene como fin el análisis respectivo en tres fachadas de vidrio en edificios de pequeña, mediana y gran altura ubicados en San José, Heredia y Limón, la investigación suministra una representación general del sistema constructivo de la fachada de vidrio auto portante (sistema de elementos independiente del edificio) al comportamiento del movimiento del terreno, revisando sus deflexiones y esfuerzos generadas por sismos de mediana intensidad, adicionalmente, se revisan parámetros dinámicos de la estructura de vidrio y la afectación que pueda generar al edificio.

Palabras claves: sistema muro cortina, fuerzas sísmicas, presión de viento, sistemas no estructurales, parámetros dinámicos.

Summary

The present final graduation work is based on a research of the system curtain wall with a system of silicon structure. It has as a result, the respective analysis of three glass facades in buildings of small, medium and great heights, located in San José, Heredia and Limón. The investigation provided, it shows the constructive system as the facades of self-supporting glass (System of independent elements of the building) and his behavior during movement of land. It is reviewed the conduct of stresses and deflections caused by moderate earthquake. Additional to these, it necessary to analyze the dynamic parameters of the glass structure and the affectations that can be caused by the building.

Keywords: curtain wall system, seismic forces, wind pressure, non-structural systems, dynamic parameters.

Índice

Introducción	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema de investigación.....	3
Hipótesis.....	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
Justificación.....	5
Alcances y limitaciones.....	5
Impacto.....	7
Capítulo 1: Fundamentación Teórica	8
1.1. Marco teórico	8
1.1.1. Elementos resistentes o estructurales del muro cortina.....	9
1.1.2. Vidrio.	10
1.1.3. Elementos de fijación.....	11
1.1.4. Parámetros Dinámicos.....	14
1.1.5. Nivel de Desempeño.	15
1.2. Marco situacional.....	18
1.2.1. Contexto Geográfico.	18
1.2.2. Contexto Temporal.....	18
1.2.3. Contexto Específico.	18

Capítulo 2: Metodología de la investigación	19
2.1. Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos	19
2.2. Categorías de análisis de la investigación.....	19
2.3. Población y muestra.....	20
2.3.1. Edificación, Instituto Nacional de Seguros.....	20
2.3.2. Edificación, Universidad Nacional de Costa Rica.....	21
2.3.3. Edificación, Universidad de Costa Rica.....	22
2.4. Técnicas para la recolección de datos	22
2.5. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos	23
2.5.1. Estimación de cargas.....	23
2.5.2. Cálculo estructural.....	30
2.5.3. Análisis dinámico.....	34
Capítulo 3: Análisis de resultados.....	43
Fuerza sísmica.....	43
3.1.1. Análisis mediante el Código Sísmico de Costa Rica-86.....	44
3.1.2. Análisis mediante el Código Sísmico de Costa Rica-2010.....	48
3.2. Presión del viento.....	49
3.2.1. Clasificación según su importancia.....	49
3.2.2. Objetivo de desempeño por viento.....	50
3.2.3. Definición de zonificación.....	50
3.2.4. Cálculo de presión básica de viento.....	51

3.2.5.	Definición de geometría.	52
3.2.6.	Cálculo de coeficiente de exposición, Cez	52
3.2.7.	Coeficiente de recurrencia, Cr	54
3.2.8.	Coeficiente topográfico, Ct	54
3.2.9.	Coeficiente de direccionalidad, Cd.	54
3.2.10.	Cálculo de la presión de viento.	54
3.2.11.	Cálculo de presión neta de diseño.	55
3.3.	Modelaje SAP-2000.	56
3.3.1.	Cristal.	56
3.3.2.	Aluminio.	56
3.3.3.	Dimensiones.	57
3.3.4.	Malla para elementos finitos.	58
3.3.5.	Unidades.	58
3.3.6.	Tipo de apoyo.	58
3.3.7.	Modelos del sistema.	59
3.4.	Parámetros dinámicos	59
3.4.1.	Períodos de vibración.	60
3.4.2.	Frecuencia.	62
3.4.3.	Factor de mayoración.	64
3.4.4.	Rigidez de la estructura.	65
3.4.5.	Amortiguación viscosa de la estructura de vidrio.	66

3.5.	Desplazamientos	67
3.5.1.	Desplazamientos (modelo 1).....	68
3.5.2.	Desplazamiento (modelo 2).	71
3.6.	Esfuerzos.....	74
3.6.1.	Esfuerzos (modelo 1).	75
3.6.2.	Esfuerzos (modelo 2).	79
	Conclusiones	83
	Recomendaciones.....	86
	Referencias Bibliográficas	87

Índice de tablas

Tabla 1. Aleación y Temple.....	10
Tabla 2. Características de aleación.....	10
Tabla 3. Seguridad ante riesgo y evento	11
Tabla 4. Movimientos sísmicos de diseño	17
Tabla 5. Tipos de excitación dinámica	23
Tabla 6. Factor para el perfil de la superficie de vidrio	32
Tabla 7. Tensiones admisibles según tipo y posición de vidrio.....	32
Tabla 8. Factores parciales de materiales	32
Tabla 9. Propiedades dinámicas de los materiales.....	42
Tabla 10. Clasificación según su importancia	49
Tabla 11 Objetivo de desempeño por viento.	50
Tabla 12. Disposiciones para el cálculo de coeficiente de expansión	53
Tabla 13. Cálculo de presiones de viento	55
Tabla 14. Cálculo de presión interna y externa.....	55
Tabla 15. Comparación de formas para período de vibración de los tres edificios	61
Tabla 16. Períodos de vibración en análisis.....	61
Tabla 17 Períodos de la ventanería con continuidad	62
Tabla 18. Períodos de la ventanería sin continuidad.....	62
Tabla 19. Frecuencia del edificio.....	63
Tabla 20 Frecuencia de la estructura con continuidad.....	63
Tabla 21. Frecuencia de la estructura sin continuidad.....	63
Tabla 22. Factor de mayoración.....	65
Tabla 23. Cálculo de rigidez del sistema de ventanería INS	65

Tabla 24. Cálculo de la rigidez del sistema de ventanería UNA	65
Tabla 25. Cálculo de la rigidez del sistema de ventanería UCR.....	66
Tabla 26. Cálculo de amortiguación viscosa de la estructura de vidrio.....	66
Tabla 27. Desplazamiento debido a sismo en dirección Y, modelo con continuidad	68
Tabla 28. Desplazamiento debido a sismo en dirección X, modelo con continuidad	68
Tabla 29. Desplazamiento debido a presión de viento, modelo con continuidad.....	70
Tabla 30. Desplazamiento debido a sismo en dirección Y, modelo sin continuidad.....	71
Tabla 31. Desplazamiento debido a presión de viento, modelo sin continuidad.....	73
Tabla 32. Comparación de esfuerzos, modelo con continuidad	78
Tabla 33. Comparación de esfuerzos, modelo sin continuidad	82

Índice de tablas

Ilustración 1. Terremoto de Northridge	3
Ilustración 2. Detalle de anclaje, corte del perfil vertical	12
Ilustración 3. Detalle de anclaje, corte del perfil horizontal	12
Ilustración 4. Gráfico tensión-deformación de silicón estructural	13
Ilustración 5. Esquema experimental	19
Ilustración 6. Fachada de elevación oeste	20
Ilustración 7. Elevación principal	21
Ilustración 8. Fachada Sur	22
Ilustración 9. Pasos para calcular la fuerza sísmica	24
Ilustración 10. Amplificación del momento	29
Ilustración 11. Amplificación del momento	29
Ilustración 12. Posición de equilibrio	34
Ilustración 13. Desplazamiento con respecto al tiempo	35
Ilustración 14. Sistema lineal amortiguado con un grado de libertad	39
Ilustración 15. Mapa de isoaceleraciones <i>amax</i> para 100 años de periodo de retorno	46
Ilustración 16. Mapa de isoaceleraciones <i>amax</i> para 500 años de periodo de retorno	46
Ilustración 17. Zonificación	50
Ilustración 18. Categoría de exposición	52
Ilustración 19. Presión de viento	55
Ilustración 20. Fachada en análisis INS	57
Ilustración 21. Fachada en análisis INS	57
Ilustración 22. Fachada en análisis UCR	58
Ilustración 23. Viga de vidrio continua	59
Ilustración 24. Viga de vidrio sin continuidad	59

Ilustración 25 Factor de mayoración.....	64
Ilustración 26. Número de ciclos necesarios para reducir la amplitud de la vibración libre en 50%	67
Ilustración 27. Esfuerzos INS (Presión de viento).....	75
Ilustración 28. Esfuerzos UNA (Presión de viento).....	76
Ilustración 29. Esfuerzos UCR (Presión de viento).....	76
Ilustración 30. Esfuerzos INS (fuerza sísmica).....	77
Ilustración 31. Esfuerzos UNA (fuerza sísmica)	77
Ilustración 32. Esfuerzos UCR (fuerza sísmica).....	78
Ilustración 33. Esfuerzos INS (Presión de viento).....	79
Ilustración 34. Esfuerzos UNA (Presión de viento).....	79
Ilustración 35. Esfuerzos UCR (Presión de viento).....	80
Ilustración 36. Esfuerzos INS (Fuerza de sismo).....	80
Ilustración 37. Esfuerzos UNA (Fuerza de sismo).	81
Ilustración 38. Esfuerzos UCR (Fuerza de sismo).....	81

Índice de gráficas

Gráfica 1.Comparación de períodos.....	60
Gráfica 2.Comparación de frecuencia.....	62
Gráfica 3.Desplazamientos máximos.....	67
Gráfica 4.Desplazamientos máximos.....	75

Introducción

Antecedentes

En Costa Rica, el diseño formal sismorresistente se inicia a partir de la creación del Código Sísmico, en 1971 en la Universidad de Costa Rica, incursionando con estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil. La capacitación de los alumnos se realizó mediante un posgrado en el exterior, generalmente en Estados Unidos; dicha escuela se unió a el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica en 1973 y formaron una comisión encargada del estudio, consulta, divulgación y revisión del código que actualmente cuenta con cinco versiones. Pese a esto, en la actualidad para estructuras secundarias como el vidrio, en su comportamiento sísmico para edificios, se realiza de forma empírica, ya que el código cuenta con limitaciones, las cuales se expresan en el apartado que se muestra a continuación: “La normativa aquí presente debe de ser interpretada como los valores mínimos para el diseño del anclaje y de los miembros conectores que transfieren fuerzas al sistema sismorresistente” (CFIA, 2014). De acuerdo con este artículo el código solo hace referencia a los componentes estructurales y conectores al edificio, y no al sistema secundario como tal, que en este caso es la fachada de vidrio, por lo que el análisis del cristal se realiza generalmente por las empresas según su experiencia y no a su comportamiento ante cargas de sismos o viento con un diseño establecido y solicitado.

El proyecto nace bajo la necesidad de la empresa Extralum, que ven como oportunidad de mejora, el estudio sismorresistente en las fachadas de vidrio, debido a que actualmente se ejecutan los proyectos a criterio experto y no con datos que respalden los mismos.

Extralum es una empresa costarricense, cuentan con servicios como manufacturación, transformación, comercialización e instalación de productos en aluminio y vidrio. Debido a su competitividad con el mercado requieren de estudios considerando las tendencias para proveer

una amplia línea en vidrios, por lo que se mantienen convenios para realizar investigaciones, actualmente cuentan con investigaciones concluidas y supervisadas con la Universidad Latina de Costa Rica en la que se encuentra la presente tesis.

En el 2010, se inicia una primera investigación en Facultad de Ingeniería Civil con grado de tesis, en este caso sobre “Comportamiento de sistemas de muro cortina ante cargas de viento en la Gran Área Metropolitana del Valle Central en Costa Rica” cuyo enfoque se basó en conocer los cambios de presiones con diferentes alturas y cómo afectaban al sistema. Más recientemente, adentrándose en el diseño de cargas de viento y diseño se presentó una tesis en la Universidad Latina de Costa Rica en mayo del 2018 que muestra “Análisis estructural de fachada de vidrio templado con sistema de anclaje spiders, ante carga de viento” en la que se utilizan normas extranjeras para determinar las cargas de viento, su resistencia y comportamiento de la estructura, verificado mediante el análisis de elementos finitos. En el mismo año 2018, se presenta una tesis de grado descrita como “Análisis comparativo de los sistemas de fachadas de muro cortina en los países de Jamaica, Trinidad & Tobago, Suriname, Belice y Costa Rica”, basado en los códigos constructivos y requerimientos solicitados en el apartado de viento respaldando la sensibilidad que pueda tener la fachada de vidrio ante posible carga de viento y comparando los diferentes códigos para establecer requerimientos mínimos de diseño.

Según las tesis descritas anteriormente, se presenta un análisis en sistemas de vidrio no estructural, con análisis de cargas de viento y estructura tipo muro cortina, estos tres términos van a ser objeto de investigación en la presente tesis, junto con el análisis de carga de sismo y parámetros dinámicos. Para solventar algunas limitaciones del código nacional se presenta las normas con las cuales se van a delimitar los cálculos, en primera instancia se utilizará el CSCR (Código Sísmico de Costa Rica) en acompañamiento con normas y códigos americanos, por lo

que a continuación se presentará el porqué de la impulsión en el estudio de fachadas de vidrio en Estados Unidos.

En el ámbito de ingeniería los norteamericanos reforzaron el estudio del vidrio, debido a que se presenta el interés de salvaguardar la integridad física de las personas y además, por la ocurrencia del terremoto de Northridge en 1994, en el cual se observaron muchas carencias en el sistema constructivo, ya que las estructuras secundarias (cristal) colapsaron, lo que motivó a un



Ilustración 1. Terremoto de Northridge. Fuente: (FEMA, 2011)

proceso de verificar las filosofías de diseño y revisar las estructuras, tanto para el comportamiento último de las estructuras con sismos fuertes como verificar sismos de mediana intensidad que puedan generar daños en los vidrios, debido a que, la cuantificación de los daños no solo está en función del daño estructural, más bien de pérdida de vidas humanas o lesiones que se presenten, la inhabilitación para utilizar un inmueble y por último las pérdidas en el valor de la propiedad, todo lo anterior puede ser consecuencia de un evento sísmico. En la ilustración 1 se muestra una de las muchas afectaciones que se presentaron.

Planteamiento del problema de investigación

¿Cómo los vidrios con sistema muro cortina (sistema estructural secundario) se comportan al movimiento del terreno, en términos de deflexiones y esfuerzos, en comparación con el sistema estructural primario (edificio) para sismo moderado?

En búsqueda de los requerimientos para obtener un diseño óptimo se manifiesta la siguiente formulación del problema:

¿Qué normas se pueden utilizar para establecer un diseño de vidrio adecuado?

¿Cuánta carga sísmica y de viento resiste el vidrio con sistema muro cortina antes de su falla?

¿Cuáles son las características dinámicas del vidrio y cómo se puede ver afectado por la excitación de la estructura soportante?

Hipótesis

Se pretende buscar una solución numérica para el análisis de carga sísmica y generar comparaciones en términos de esfuerzos y deformaciones con la carga de presión de viento, para encontrar la resistencia del vidrio ante dichas cargas por medio de metodología extranjera, en este caso la americana junto con la norma nacional correspondiente al CSCR-2010 (Código Sísmico de Costa Rica) para verificar que en condiciones de servicio la carga sísmica puede llegar a tener mayor incidencia en la estructura de vidrio, adicionalmente se proyecta revisar parámetros dinámicos aplicados al sistema de muro cortinas y se espera encontrar factores de amortiguamiento menores al 5% que describe el Código Sísmico de Costa Rica.

Objetivo General

- Evaluar la fachada de vidrio con sistema muro cortina en su comportamiento ante cargas de sismo, para determinar el comportamiento modal, esfuerzos y deflexiones.

Objetivos Específicos

- Calcular esfuerzos, deflexiones máximas y resistencia que adquiere el vidrio ante fuerzas sísmicas para determinar especificaciones de diseño.
- Comparar los parámetros dinámicos de los sistemas muro cortina con el comportamiento de los edificios para determinar si estos entran en resonancia.
- Investigar sobre criterios para sismo de servicio para garantizar la resistencia ante sismo moderado.

Justificación

En Costa Rica, el Código Sísmico, se encuentra muy orientado al comportamiento último de las estructuras ya que su objetivo principal es salvaguardar la vida de las personas, sin embargo, actualmente no se toman en cuenta el sismo de servicio, el cual puede ejercer un daño considerable en las estructuras de vidrio. Orientado al caso anterior, se proyecta proponer que la fuerza por evaluar sea la aceleración de servicio y no la aceleración pico efectiva. Se pretende a través del uso del Software SAP-2000 dejar de utilizar el diseño empírico y realizar un diseño establecido para vidrio por medio de una simulación de la fuerza sísmica de mediana intensidad a las que se va a ver sometida la estructura y compararla con las cargas ejercidas por la acción de la presión de viento, examinando el comportamiento ante dichas cargas, aportando un escenario con un modelo realista del comportamiento de la estructura por evaluar.

El interés del autor es simular parámetros dinámicos (frecuencias, períodos, desplazamientos) del material de investigación y justificar su comportamiento comparándolo al proceder del edificio es decir, en estructuras con fachadas de vidrio de gran tamaño evaluar qué va pasar con el cristal y cómo se va amoldar a la estructura primaria ante un sismo, así como las variaciones que se pueden ejercer para obtener un sistema de vidrio seguro y no deformar el cerramiento, para que el fabricante se acople al diseño de dicha estructura.

La elección del estudio del sistema de muro cortinas con anclaje convencional, corresponde a que su uso es tipo comercial (oficinas, locales comerciales, edificaciones de uso para exhibición, edificaciones para usos varios), y habitacionales (apartamentos, hospitales, edificios educativos); por ende, la utilización del vidrio en el sistema estructural secundario es cada vez mayor.

Alcances y limitaciones

El alcance de esta investigación es estudiar el sistema de vidrio y comportamiento dinámico con sus respectivos parámetros, además, revisar los esfuerzos y deformaciones analizando la

respectiva resistencia del material, orientando la investigación en la obtención de variables y análisis de estas.

La investigación es basada con fórmulas aproximadas para el comportamiento dinámico de los edificios, ya que el estudio está dirigido en el estudio de la conducta realista del vidrio como tal.

Se presenta un análisis específicamente para el sistema muro cortina en vidrio, con sistema vertical y horizontal sin aluminio expuesto y vidrio monolítico, según lo instalado en los edificios por analizar, y su comportamiento ante cargas sísmicas y viento en las zonas de San José, Heredia y Limón. Es importante considerar que SAP-2000 no diferencia los tres casos existentes de colocación del aluminio vertical y horizontal, por lo que no se pueden analizar todos los casos y buscar una comparación entre los sistemas, así mismo, el software tampoco puede realizar un estudio de vidrio laminado ya que solo es posible modelar una capa de vidrio el cual corresponde a vidrio monolítico.

Para el análisis y diseño se define y se analiza la viabilidad en la utilización de normas extranjeras en el país, en este caso la norma americana para validar la interpretación de los resultados del vidrio.

El presente documento carece de los datos de ensayo real, por lo que se han tenido que suplantar por medio de la utilización del software SAP-2000, que contiene fundamentos físicos y matemáticos de la teoría de elementos finitos. Por esta razón, para valoraciones más exactas es preciso ensayar en un laboratorio el vidrio y su comportamiento ante cargas sísmicas como argumento experimental para certificar los resultados.

Para la ejecución del proyecto, se contó con la limitante de que los planos arquitectónicos no contaban con datos reales de las dimensiones del vidrio, debido a que solo se colocaron de forma representativa, por esta razón se procedió a medir el vidrio y el aluminio y verificarlo

con las dimensiones de anchos y altos totales de los edificios con los planos de plantas de elevaciones.

Impacto

El presente documento establece variables dinámicas, que le ayudarían tanto a las personas que diseñan en el ámbito ingenieril como a los que comercializan los sistemas muro cortina, esto con la finalidad de evitar daños estructurales en el cerramiento del edificio en caso de sismos moderados; mejorando la interpretación del comportamiento del material ante eventuales cargas y validar la tolerancia (tamaños del vidrio) en diseños ya aplicados en los edificios por estudiar, así mismo, por medio de programas computarizados que integran la metodología de elementos finitos, forjando más confianza al uso del material, por lo que se pretende buscar la solución óptima en cuanto a seguridad y economía; esto porque con el estudio detallado, se pueden obtener especificaciones del tamaño y espesor del vidrio por utilizar en el diseño de la estructura.

Capítulo 1: Fundamentación Teórica

1.1. Marco teórico

Los edificios constan de un sistema estructural compuesto por uno o varios sistemas sismorresistente, definido por el uso apropiado de ductilidad, resistencia y rigidez que deben de ser aptos para resistir deformaciones internas y transmitir cargas al edificio, desde la localización de aplicación de fuerzas hasta los cimientos. Sin embargo, independientemente del sistema estructural utilizado (marco, muro, dual) se debe de realizar un cerramiento con mayor o menor uso. Entre los cerramientos más utilizados se encuentra el sistema muro cortina, el cual es una fachada integral liviana que se adosa a la estructura principal de un edificio, a través de una subestructura de manera continua con pesos que oscilan entre los $30-70 \text{ kg/m}^2$, se constituye de varios componentes en aluminio extruido que ayudan a conectar el vidrio a la estructura principal del edificio en forma de rejilla o marco relleno con el cristal que tiene un rendimiento propio. Está diseñado para resistir cualquier filtración de aire y agua, así como también fuerzas de vientos, aceleraciones causados por el sismo en la edificación y el peso propio.

Existen tres tipos de muro cortina según su aspecto constructivo, uno de ellos es la perfilería vista, el cual los elementos verticales y horizontal de aluminio se pueden ver desde el exterior de la edificación como también el cristal ya sea fijo o móvil y también conocido como sistema muro cortina con tapa, otro de ellos es la perfilería vertical y horizontal sin aluminio expuesto, desde el exterior no se simula ningún tipo de cuadrícula con el aluminio y solo se puede ver el vidrio, a este sistema se le conoce como muro cortina con silicón estructural, como tercera opción se confinan los dos sistemas anteriores para formar un sistema mixto a elección del cliente (vertical con aluminio expuesto y horizontal sin aluminio expuesto o viceversa).

Es importante mencionar que los componentes sismorresistentes del sistema muro cortina son los elementos de perfilería horizontal y vertical, por otro lado, se cuenta con elementos de relleno (vidrio) y también elementos de fijación los cuales van a ser descritos a continuación:

1.1.1. Elementos resistentes o estructurales del muro cortina.

Estos elementos en la fachada muro cortina de una estructura son los elementos que forman una cuadrícula y se dividen en:

1.1.1.1. Vertical

Son los elementos verticales de la estructura portante del sistema de fachada liviana y son fijados a los anclajes, por tanto, la carga de viento o sismo incide sobre el tipo de fijación.

El material puede ser de aluminio, de acero, de acero inoxidable o de PVC con refuerzos de acero, existen diferentes tipos, en cuanto a forma y a espesor, que se encuentran disponibles en el mercado. Para diferenciar su uso debe estar relacionado con su diseño para cada edificación, por los momentos de inercia que ofrecen cada uno de ellos y la forma como se anclan a la estructura del edificio.

1.1.1.2. Horizontal

Son los elementos horizontales de la estructura portante del sistema, normalmente van anclados a los montantes y dimensionado de tal forma, que puedan soportar la carga de los elementos de relleno que gravitan sobre ellos, pueden o no llevar refuerzos metálicos en su interior, lo que garantiza la no deformación por el peso propio del cristal.

Extralum utiliza la nomenclatura señalada por Aluminium Association, que emplea el sistema de 4 dígitos para la denominación de aleaciones mostradas en la tabla 1. La primera expresión corresponde al elemento con aleación predominante, la segunda indica las modificaciones en los límites de impurezas y los últimos dígitos denuncian la pureza del aluminio.

Tabla 1.
Aleación y temple Extralum

Aleación	Temple	Uso
AA6063	T5-T6	Arquitectónico
AA6005	T6	Industrial

Fuente: (Extralum, 2009)

Las características específicas entre la aleación pueden variar según la resistencia a la corrosión, anodizado, soldadura y ductilidad, se muestra el siguiente cuadro (tabla 2), donde compara entre dos aleaciones.

Tabla 2.

Características de aleaciones				
Aleación	Resistencia a la corrosión	Anodizado	Soldadura	Ductilidad
AA6063	Muy buena	Muy buena	Buena	Buena
AA6005	Buena	Regular	Regular	Regular

Fuente: (Extralum, 2009)

1.1.2. Vidrio.

En el cristal se tienen diferentes tipos tales son: vidrio crudo, vidrio procesado, vidrio de alto desempeño y vidrio de seguridad. El vidrio de seguridad es el que generalmente se utiliza para sistemas muro cortina, dependiendo de sus características y propiedades se clasifican en vidrios templado y laminado. En la presente tesis se hace uso del vidrio monolítico el cual es manufacturado a partir de vidrio crudo y además contiene un proceso de temple. Según Arbós se consigue calentando el vidrio recocido en un horno a una temperatura aproximada de 650°C y enfriando seguidamente sus superficies de forma rápida, provocando que estas solidifiquen primero que la masa interior. Este proceso crea una elevada compresión en las caras exteriores del vidrio hasta aproximadamente un 20% del espesor de la placa, mientras que en el centro queda la masa en tensión, estas tensiones de compresión varían entre los 90-150 MPa (Arbós).

De acuerdo con Sánchez (2010) citado por CFIA (CFIA, 2016), se proponen los tipos de vidrios que se deben utilizar, con el fin de aumentar la seguridad ante posibles riesgos y

eventos, en la tabla 3, se clasifican los casos que se muestran como recomendación del tipo de vidrio por utilizar según la ocupación del inmueble que describe el Código Sísmico de Costa Rica.

Tabla 3

Seguridad ante riesgo y evento

Grupo	Descripción	Tipo de vidrio
A	Edificaciones e instalaciones esenciales	Laminado (crudo termo endurecido o templado), templado
B	Edificaciones e instalaciones riesgosas	Laminado, vidrio resiste al fuego
C	Edificaciones de ocupación especial	Templado, laminado templado
D	Edificaciones de ocupación normal	Crudo, termo endurecido o templado
E	Edificaciones misceláneas	Crudo, termo endurecido o templado

Fuente: (CFIA, 2016)

Se tiene que tomar en cuenta que según detalla el CSCR-2010 “cuando un sistema o un componente no estructural tenga un peso mayor que 25% de las cargas gravitacionales utilizadas para la determinación de las fuerzas sísmicas (cargas temporales y permanentes) se debe diseñar y analizar como parte del sistema estructural” (CFIA, 2014).

1.1.3. Elementos de fijación.

1.1.3.1. Anclajes.

Generalmente fijados en la parte superior e inferior de la losa con uniones en la zona de dilatación y están unidos a los elementos verticales de la estructura, estos están destinados a soportar cargas y a unir la estructura primaria a la secundaria. Los sistemas muros cortina cuentan con su anclaje propio a su sistema, por lo que, en la presente tesis se hace uso de muro cortina con silicón estructural, para mostrar su corte vertical y horizontal del anclaje que lleva este sistema se muestran las ilustraciones 2 y 3:

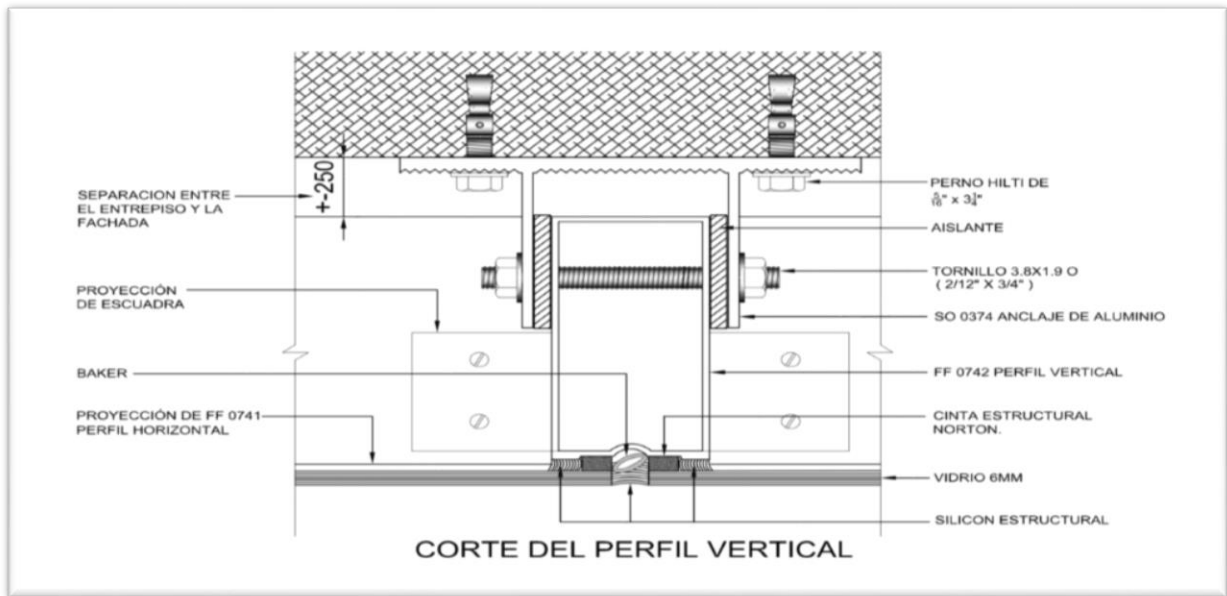


Ilustración 2. Detalle de anclaje, corte del perfil vertical. Fuente: (Extralum, 2019)

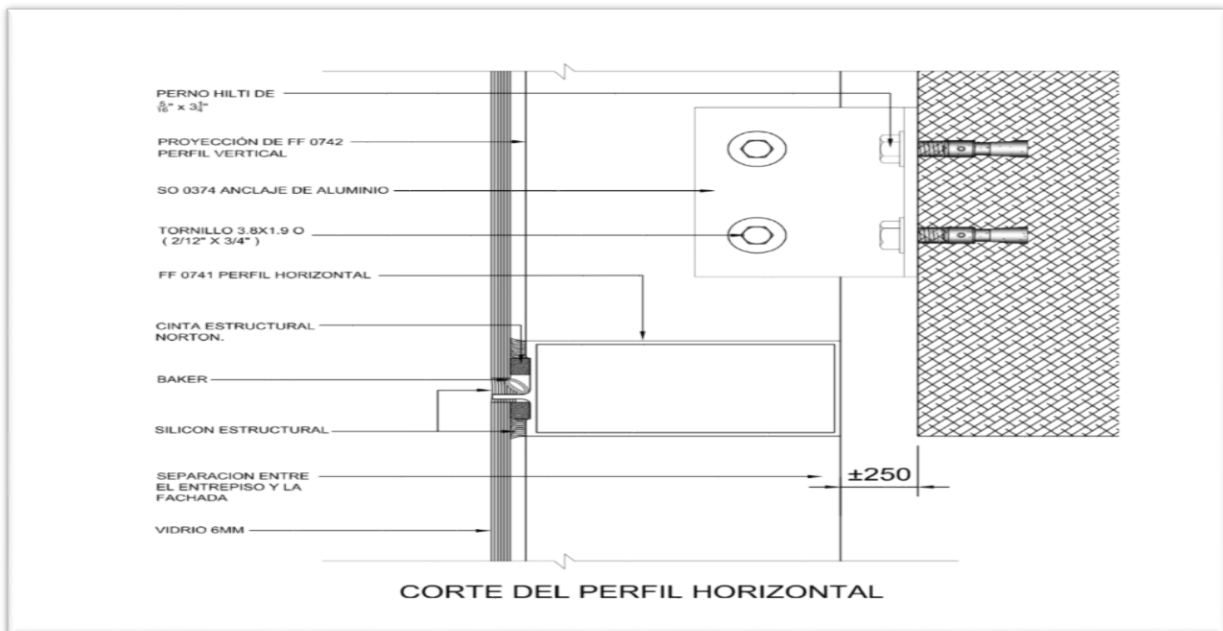


Ilustración 3. Detalle de anclaje, corte del perfil horizontal. Fuente: (Extralum, 2019)

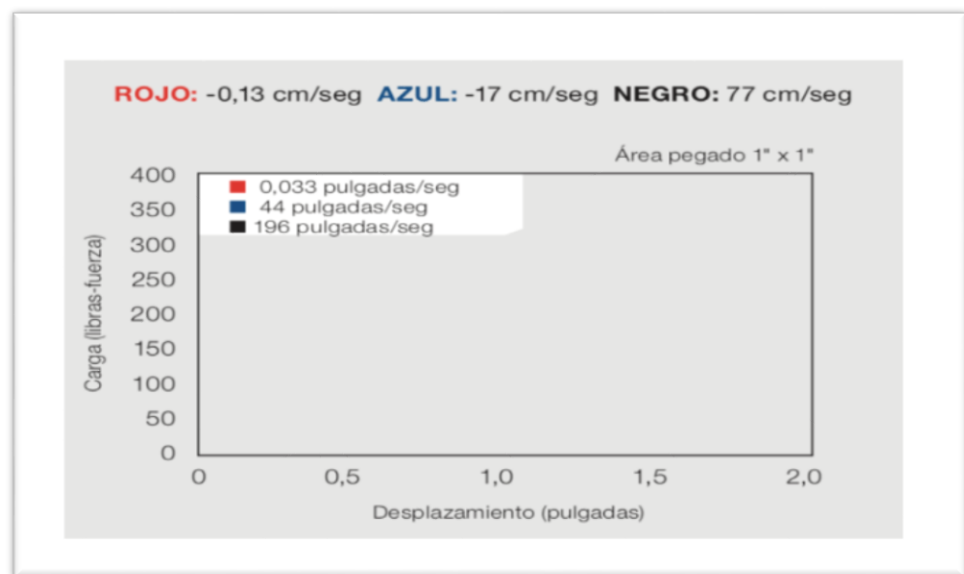
1.1.3.2. Sello estructural.

Fija el cristal o panel a la estructura portante resistiendo cargas eventuales, esta técnica logra hacer estructuras más esbeltas eliminando visualmente el uso de fijaciones mecánicas y de los reticulados de la estructura de aluminio. Las siliconas estructurales deben cumplir con

la norma ASTM C1148, la cual es la norma técnica que define los requisitos que deben cumplir las siliconas estructurales. Las muestras ensayadas, siguiendo la norma descrita anteriormente, deben cumplir con una resistencia a tracción superior a 50 psi (345 KPa) en cualquiera de las siguientes condiciones. Este comportamiento puede ser mejorado, aumentando el espesor del cordón de silicona estructural, pero se debe verificar que, frente a presiones de viento o sismo, no se desplacen los vidrios de la estructura, es por esto que la recomendación es usar cordón de silicona estructural de 1/4" o superior.

En el gráfico tensión-deformación de silicona estructural mostrado en la ilustración 4 (con ensayos de laboratorio), se puede observar que al aumentar la velocidad de deformación durante el ensayo dinámico aumenta la carga y la elongación máximas de la silicona estructural, es decir, la silicona estructural es capaz de absorber una mayor cantidad de energía cuando aumentan las velocidades de aplicación de la carga, parecidas a las que se verifican en un terremoto de gran intensidad.

Con respecto a la modelación del sistema muro cortina en la investigación se utiliza el modelo



de elementos finitos, que consiste en un sistema de malla con muchas divisiones del vidrio. Cuanto más fino sea el mallado que se realiza, será más exacta la aproximación del modelo a la realidad simulada. Para calcular las dimensiones del mallado se usa una décima parte del elemento.

1.1.4. Parámetros Dinámicos.

García (1998) afirma:

En cuanto a los parámetros dinámicos, dentro del contexto de la mecánica es el estudio de los cuerpos, o conjunto de partículas en movimiento, se divide en dos campos: *la cinemática*, la cual estudia la geometría del movimiento, relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo sin hacer referencia a las causas del movimiento; y *la cinética*, la cual estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado. Cuando un cuerpo se desplaza de su posición de equilibrio estable, el cuerpo tiende a volver a su posición al verse afectado por la acción de las fuerzas y tiende a restablecer la situación de equilibrio. En general en el instante que el cuerpo vuelve a su posición de equilibrio, tiene una posición que lo lleva más allá de esa posición, presentándose una oscilación alrededor de esa posición de equilibrio. Esa oscilación en el campo de la mecánica se denomina vibraciones mecánicas.

Con respecto al comportamiento del suelo, existen muchos factores que afectan durante un sismo, cuya onda sísmica tiende a aumentar su amplitud cuando viaja a través de sedimentos blandos o poco consolidados, es decir, la amplitud se incrementa respecto a la que tenía originalmente cuando viajan por medios sólidos que puede ser un estrato rocoso, dado esto, la frecuencia reduce y el período de la onda sísmica aumenta. Este fenómeno va a tener una incidencia en las estructuras y como resultado en las construcciones que están en sedimentos blandos que tendrán una sacudida sísmica con mayor intensidad. Dado que el tipo de suelo está relacionado a la amplificación que pueda tener, la magnitud de esta depende de la geología y la sustitución del suelo que tenga la edificación con las respectivas propiedades del suelo y el tipo de sismo al cual es sometido (magnitud, distancia, hipocentro). La mayor amplificación ocurre cuando se da el fenómeno de resonancia, que se origina cuando la vibración natural de

la estructura es sometida a un período de vibración externa a la misma frecuencia de la natural, el cual hace que la amplitud del sistema oscilante sea muy grande. Es por esto, la importancia de verificar la estructura dinámicamente y poder evitar el fenómeno descrito anteriormente.

Las estructuras pueden diseñarse para resistir sismos de baja intensidad sin sufrir daños estructurales significativos, sismos moderados con daños reparables y sismos de mayor intensidad sin que se produzca el colapso, de acuerdo con esto, es importante registrar que la seguridad ante el colapso que se puede generar ante grandes sismos, no implica necesariamente un comportamiento aceptable de la edificación durante sismos de pequeña y moderada intensidad, como ha podido comprobarse durante sismos recientes como el de Northridge en USA el 17/01/1994; como consecuencia, la faltante de un diseño sismorresistente han generado pérdidas de vidas humanas y económicas alrededor del mundo.

El siguiente punto que se debe de tomar en cuenta es el amortiguamiento del vidrio que es causado por la atenuación de movimientos oscilatorios disipando energía.

De acuerdo con Graham (2010), se realizó un modelo matemático de una viga de vidrio, en donde, de acuerdo al análisis las vibraciones libres se evaluó una relación de amortiguación que arrojó rangos 0.2% a 0.3%. Mientras que, para la excitación armónica, usando el método de ancho de banda de media potencia, la relación de amortiguamiento se ha estimado en un rango de 0,88% a 1,2%. De acuerdo con la información anterior el amortiguamiento para sistemas de vidrio es pequeño y sobreamortiguado.

1.1.5. Nivel de Desempeño.

El método a partir de un nivel de desempeño se podría expresar en términos de daños que causa un movimiento sísmico este concepto es aplicable tanto a la estructura principal como a sus componentes no estructurales. El método para estimar el punto de desempeño permite comprender mejor el comportamiento de una estructura sometida a ciertas sacudidas sísmicas,

es planteada desde la perspectiva del uso en términos de cuándo inicia y puede finalizar y dejar de existir la estructura en análisis.

De acuerdo con VISION 2000 (1995), la estructura ante el nivel desempeño y en condiciones adversas, funciona totalmente operacional (daño despreciable); esta concierne a un nivel en el cual no ocurren daños y asegura a los ocupantes que no son requeridas reparaciones, así mismo, se encuentra la operacional (daño leve); esta considera daños moderados en los elementos no estructurales y en el contenido de la edificación, así como también, daños ligeros estructurales con reparaciones pequeñas, el siguiente nivel de desempeño es el de seguridad (daño moderado); estos son daños moderados en elementos estructurales y no estructurales considerando seguridad ante un colapso sin ocupación inmediata y con posibilidad de reparaciones; el cuarto nivel de desempeño es el pre colapso (severo) que es el fallo en sistemas secundarios y severos en estructurales; y finalmente el último es el colapso (daño completo); este compromete la estabilidad de la estructura aproximándose al colapso. Es importante destacar que el Código Sísmico de Costa Rica divide estos objetivos de desempeño dependiendo del tipo de estructura y el tipo de sismo ya sea fuertes, extremos o moderados.

El comité de VISION 2000 (1995) afirma:

Los movimientos sísmicos de diseño se representan en términos de un período de retorno y probabilidad de excedencia. El período de retorno es una expresión del período promedio de tiempo, expresado en años, que transcurre entre la ocurrencia de un sismo que produce daños de una severidad igual o superior a una determinada, en cuanto a la probabilidad de excedencia, esta es una representación estadística de la posibilidad de que el efecto de un sismo exceda cierta severidad durante un período de tiempo determinado expresado en años. En la tabla 4 se detalla según comité de VISION 2000, los tipos de movimientos sísmicos, su intervalo de recurrencia y la probabilidad de excedencia.

Tabla 4.
Movimientos sísmicos de diseño

Movimiento sísmico de diseño	Intervalo de recurrencia	Probabilidad de excedencia
Frecuente	43 años	50 % en 30 años
Ocasional	72 años	50 % en 50 años
Raro	475 años	10 % en 50 años
Muy raro	950 años	10 % en 100 años

Fuente: (SEOC, 1995)

Con los resultados de la tabla 4, da mayores parámetros de movimientos sísmicos para diseñar estructuras, debido a que el Código Sísmico de Costa Rica, lo limita a sacudidas sísmicas definidas como “sismo fuerte”, en el cual solo se detalla un parámetro, que en el caso de la tabla 4, es el de “Movimiento Sísmico de Diseño Raro” con un intervalo de recurrencia de 475 años y una vida útil de 50 años; adicionalmente definen como “sismo extremo” aquel que es un 25% mayor que la aceleración pico efectiva de los sismos fuertes, y por último, se define como “sismos moderados” aquel que es un 25% menor que la aceleración pico efectiva de los sismos fuertes, es decir, no genera intervalos de recurrencia y probabilidades de excedencia.

Para definir el sismo de servicio, objeto de estudio en esta tesis y compararlo con sismo de diseño, se presentan dos definiciones.

De acuerdo con (ATC-40, 1996), en primer lugar, se tiene el sismo de diseño (DE), este es un movimiento sísmico raro, el cual es un movimiento sísmico poco frecuente de intensidad entre moderada y severa, y se entiende que puede ocurrir al menos una vez durante la vida de la estructura, este se define, como el movimiento del terreno que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años, es decir, que tiene un período de retorno de 475 años. Este sismo como su nombre indica, es el que generalmente establecen los códigos para el diseño de estructuras convencionales. Para finalizar con lo propuesto, se tiene un sismo de servicio (SE), este es un movimiento sísmico ocasional, que corresponde a un movimiento del terreno que tiene una probabilidad del 50% de ser excedido en un período de 50 años, así mismo, con

período de retorno de 72 años con intensidad que ronda entre baja a moderada. Este se califica como un sismo frecuente ya que puede ocurrir más de una vez durante la vida de la estructura.

1.2. Marco situacional

1.2.1. Contexto Geográfico.

El presente trabajo se enfoca en presentar el comportamiento del vidrio con sistema muro cortina ante carga sísmicas según la zonificación descrita en el Código Sísmico de Costa Rica en el cual se divide el país en zonas, dependiendo de su sismicidad I, III, IV establecidas por las provincias, cantón o en caso de ser requerido por distrito.

El país cuenta con siete provincias: San José (4959 km²), Alajuela (9752 km²), Heredia (2556 km²), Cartago (3124 km²), Puntarenas (11276 km²), Limón (9188 km²) y Guanacaste (10140 km²), siendo fracciones de Guanacaste, Puntarenas y San José las zonas más críticas. La presente tesis se enfoca en estudiar tres edificios ubicados en San José, Heredia y Limón.

1.2.2. Contexto Temporal.

Las placas tectónicas que presentan una afectación en Costa Rica son la Caribe y Coco esta se hunde (subduce) bajo la placa Caribe y durante este proceso es que se generan la mayor cantidad de terremotos que afectan el país.

1.2.3. Contexto Específico.

El proyecto se argumenta en la mecánica, específicamente en el apartado de dinámica, y el análisis estructural e ingeniería sismorresistente para el desarrollo de los comportamientos no estructurales (sistema muro cortina).

Capítulo 2: Metodología de la investigación

2.1. Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos

En relación con el enfoque metodológico, se considera de tipo cuantitativo para recolectar y analizar datos exactos. Así mismo, el método de investigación es hipotético-deductivo, ligado con el empirismo, cuyo objetivo es adquirir una explicación de los fenómenos que se presentan en la realidad y procesos observables para describir alternativas. Con respecto al comportamiento del vidrio es un paradigma el comportamiento dinámico del material ante el actuar de la edificación en un eventual sismo, así mismo los respectivos deflexiones, esfuerzos y resistencia que puede presentar el vidrio ante cargas de sismo y viento. El paradigma empleado es positivista ya que se pretende realizar una verificación de los conceptos enumerados anteriormente mediante una comprobación numérica establecida por normas o extraídas de la literatura.

2.2. Categorías de análisis de la investigación

La investigación por realizar es de tipo experimental, con mediciones de acciones, observaciones y análisis de las consecuencias, así mismo, la investigación se localiza en cuasiexperimento ya que el autor asigna su grupo de trabajo. En la ilustración 5 se muestran las viables dependiente e independientes que influyen en el proyecto.

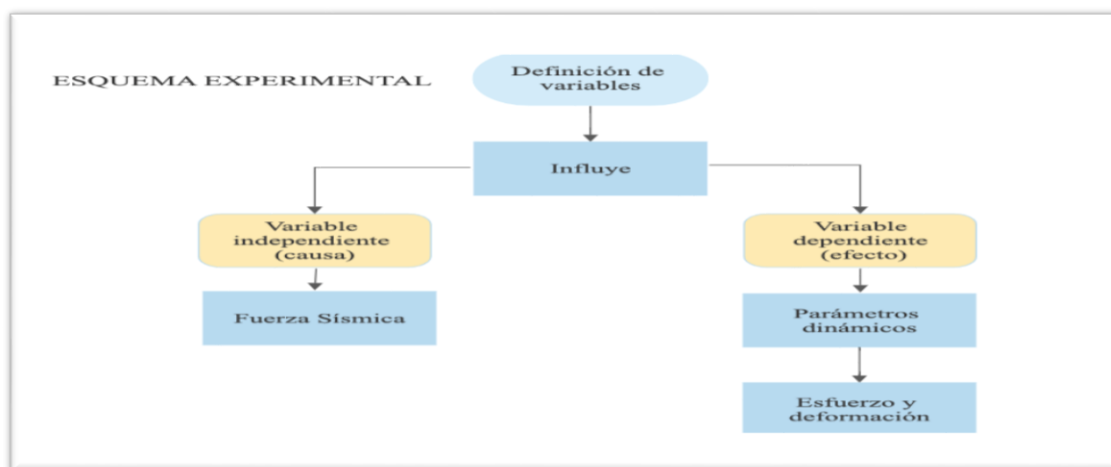


Ilustración 5. Esquema experimental. Fuente: Propia

2.3. Población y muestra.

Las fachadas de vidrio corresponden a un nuevo concepto constructivo, cada vez más utilizado en el medio de la construcción, su uso es variado ya que puede ser utilizado para separación de espacios, colocación de ventanería entre otros.

Para delimitar la exploración nombramos a la **población** como sistema muro cortina con el sistema de silicón estructural (aluminio vertical y horizontal ocultos), en cuanto a la **muestra** es intencional con la elección de tres edificios y su respectivas fachadas de pequeña (UCR), mediana (UNA) y gran altura (INS) con sus respectivas tolerancias, es decir, los tamaños y espesores de la fachada de vidrio.

2.3.1. Edificación, Instituto Nacional de Seguros.

La ilustración 6, corresponde a la Sede Central del INS, se ubica en Calle 9 cantón Central de San José, Costa Rica. Es uno de los edificios con mayor altura en la capital costarricense con una altura de 67.62 metros correspondientes a trece pisos. El edificio original se inauguró entre 1932 y 1933, sin embargo, ha sufrido varias remodelaciones, entre las más recientes se encuentra la remodelación de la ventanearía al sistema muro cortina.

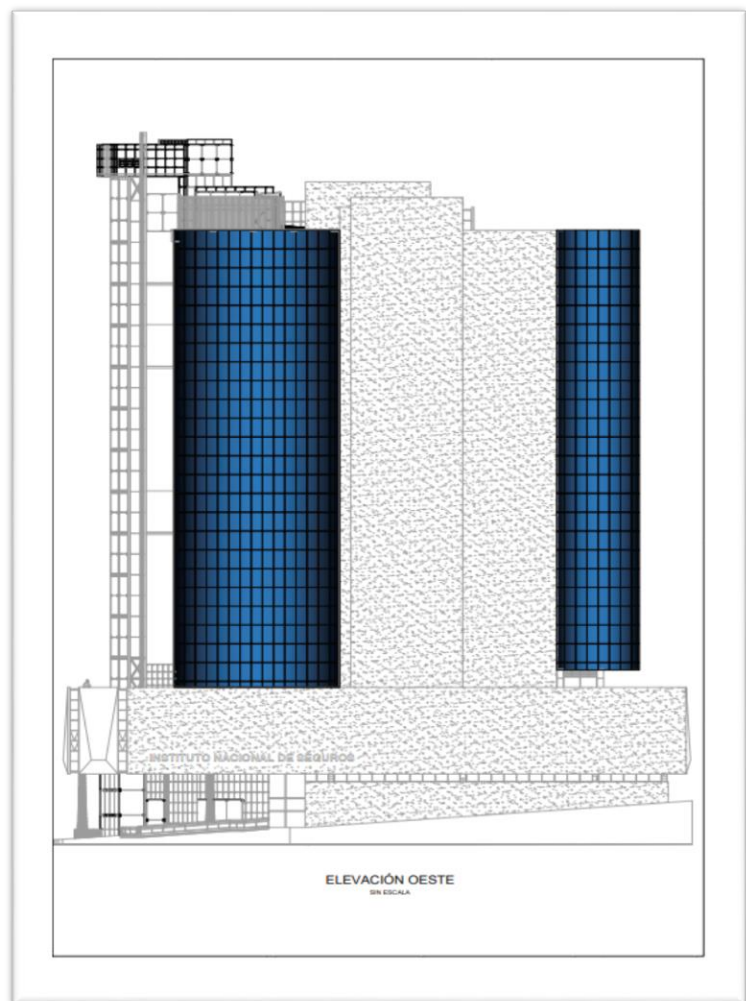


Ilustración 6. Fachada de elevación oeste. Fuente: (INS)

2.3.2. Edificación, Universidad Nacional de Costa Rica.

Se encuentra en el Campus Omar Dengo en Heredia y corresponde a las instalaciones para vicerrectorías académicas (uso de oficinas). Cuenta con cuatro pisos y una altura total de 17.58 metros. El edificio se inauguró el 12 de noviembre del 2018. Fue desarrollado con financiamiento del banco mundial y la empresa a cargo de la construcción corresponde a Edificar, la infraestructura de vidrio en este caso no es realizada por la empresa Extralum sin embargo, por el tamaño del edificio y la nomenclatura que tiene cumple con los parámetros por revisar en la presente tesis ya que es un sistema muro cortina con silicón estructural y adicionalmente, es una infraestructura de media altura. En la ilustración 7 se muestra la elevación principal del edificio.

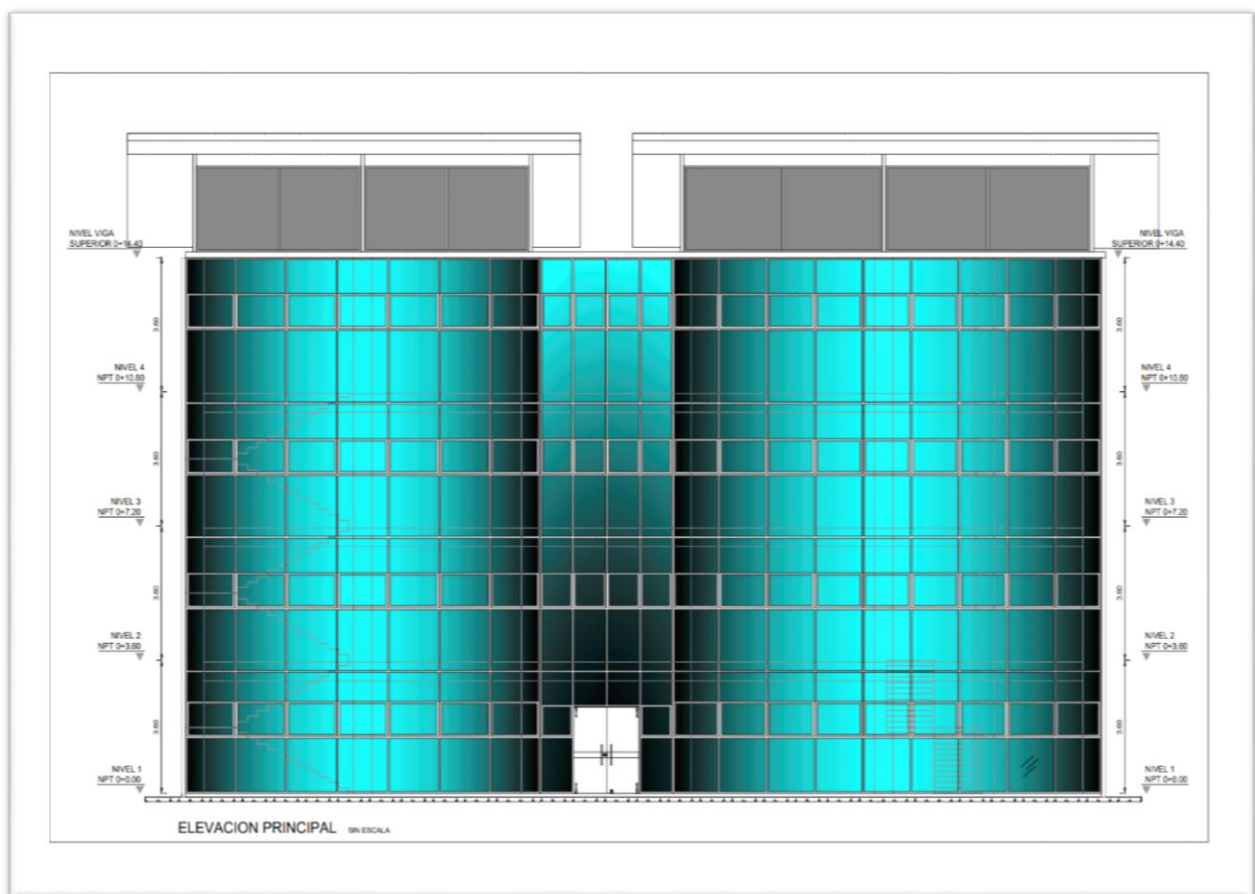


Ilustración 7. Elevación principal. Fuente: (Álvarez, 2018)

2.3.3. Edificación, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra en la sede Caribe de la Universidad de Costa Rica, cuenta con 900 m² destinados a aulas y laboratorios. Posee una altura total de 8.92 y cuenta con dos pisos y la empresa a cargo de la instalación del sistema de ventaría es Extralum y para el análisis se elige la ventana más grande. En la ilustración 8 se muestra la elevación de la fachada sur en donde se encuentra el sistema muro cortina en análisis, donde se escogió el la ventanería más grande.

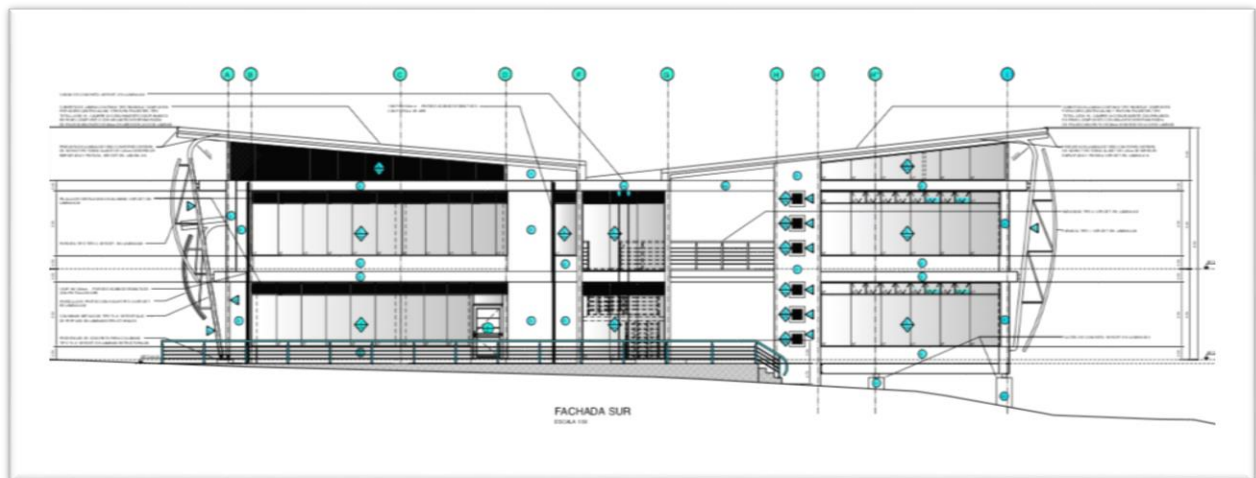


Ilustración 8. Fachada Sur. Fuente: (Castillo, sf)

2.4. Técnicas para la recolección de datos

Para la recolección de datos se emplea un plan de los procedimientos por seguir. El objetivo central, es poder comprender el comportamiento del vidrio como cerramiento en los edificios, una vez observado el comportamiento en los grupos de edificios de concreto se desarrolla los esfuerzos y deformaciones máximas del vidrio, así mismo, se revisa su incidencia ante cargas de sismo, viento y análisis modal en fachadas de vidrio ya instaladas, así como, la revisión del edificio. Por lo que surge, que se debe delimitar las variables por calcular para verificar el comportamiento del edificio y cómo verificarla; en respuesta a esta incógnita se tiene que la técnica de recolección de datos se ejecutará de forma documental, es decir, por medio de la exploración de información en la literatura y documentos relevantes que serán analizados.

2.5. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

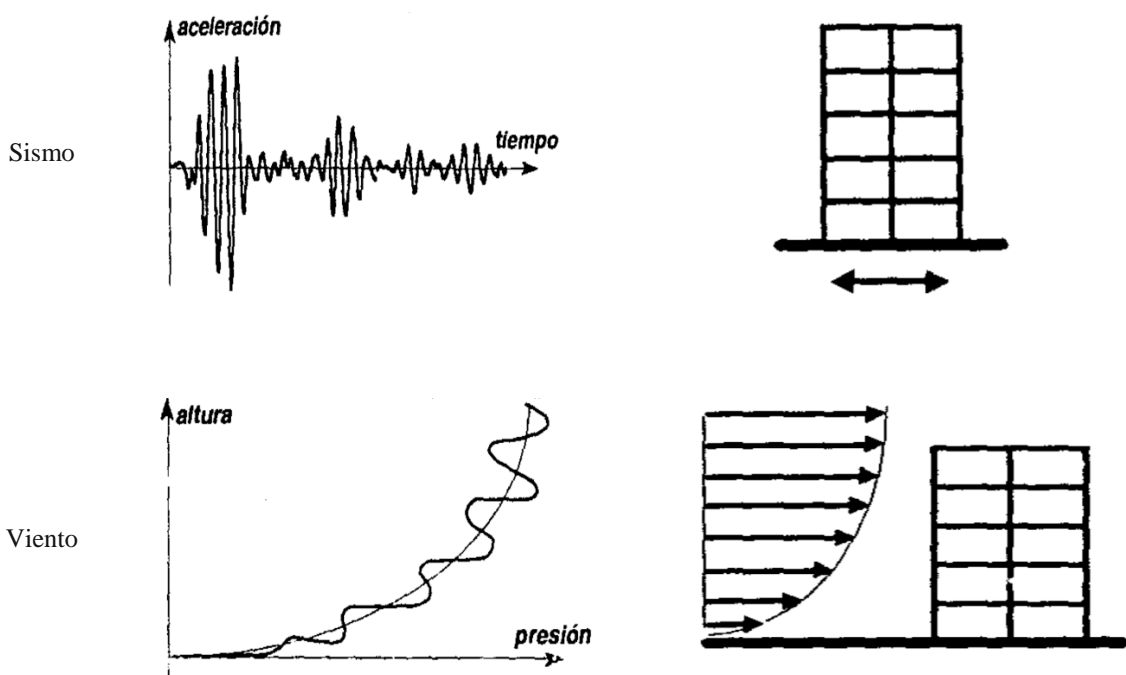
2.5.1. Estimación de cargas.

Toda estructura se encuentra sometida a varios tipos de carga y debe de ser capaz de soportar de forma segura a las fuerzas que se encuentra sometida y cumplir con los límites de deformaciones que emiten los códigos.

En el cálculo estructural del muro cortina se deberán considerar las cargas a las cuales está sometido dicho sistema, de acuerdo con las recomendaciones de las normas, se destacan las siguientes solicitaciones: peso propio (pp), presión de viento (v) y fuerzas sísmicas las cuales son mostradas a continuación.

Tabla 5

Tipos de excitación dinámica



Nota: Afectaciones que pueden tener la estructura durante su vida útil. Fuente: (García, 1998)

2.5.1.1. Carga de sismo.

La carga de sismo ante la excitación dinámica se describe como: “El efecto sobre las estructuras de los movimientos del terreno producido por la ocurrencia de un sismo conduce a vibraciones importantes de la estructura” (García, 1998). A continuación, se presenta un diagrama, describe el cálculo de fuerza sísmica de acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica. En la ilustración 9 se observan los pasos para calcular la fuerza sísmica de acuerdo con el código vigente (CSCR-2010).

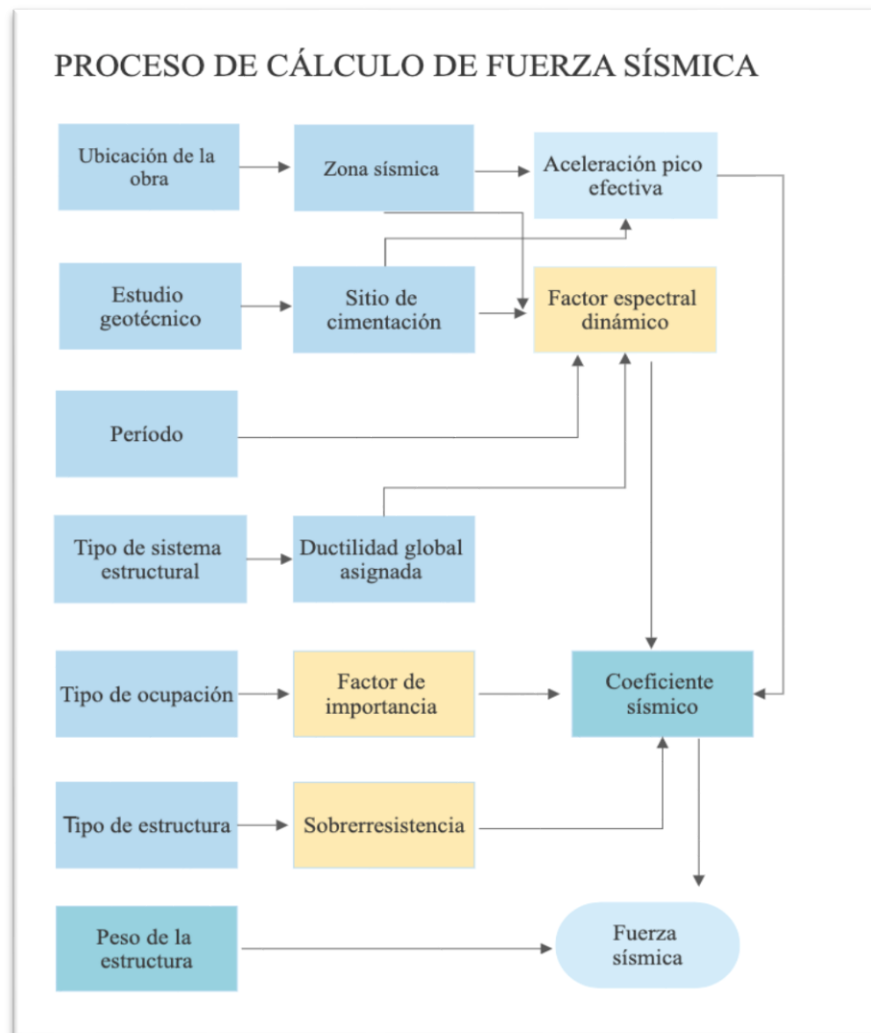


Ilustración 9. Pasos para calcular la fuerza sísmica. Fuente: Propia

Para el cálculo de las acciones sísmicas sobre la estructura de vidrio se apega y adecua al Código Sísmico de Costa Rica. El análisis se puede realizar por medio de análisis estático y dinámico.

Sismo de servicio: El periodo de retorno para el cual debe de diseñarse una estructura depende de la probabilidad de excedencia y la vida útil.

Los criterios de sismo de servicio están representados por un sismo con 50% de probabilidad de ocurrencia en los próximos 50 años que equivalen a un periodo de retorno de 72 años. Su valor numérico esta dado por:

- $$PR = \frac{1}{1 - (1 - PE)^{\frac{1}{N}}}$$

Ecuación (1)

Donde:

PR: Periodo de retorno para el cual debe de diseñarse la estructura en años.

N: Vida útil de la estructura en años.

PE: Probabilidad de que el evento para el que se diseña sea excedido durante la vida útil de la estructura, se selecciona según la importancia de cada estructura relacionada con la vulnerabilidad que puedan exceder los valores de diseño y el impacto socioeconómico.

Coefficiente sísmico:

- $$C = \frac{a_{ef} I FED}{SR}$$

Ecuación (2)

a_{ef} : Aceleración pico efectiva.

I : Factor de importancia.

FED : Factor espectral dinámico.

SR: Sobrerresistencia.

Se multiplica por un factor con respecto en caso de que se quiera pasar la sacudida sísmica que se extrae de aproximación entre la aceleración máxima 100 y 500 años.

- $C = \frac{a_{ef} I FED}{SR} \times FE$

Ecuación (3)

Donde:

a_{ef} : Aceleración pico efectiva de diseño en la base de la estructura.

I: Factor de importancia.

SR: Factor de sobrerresistencia.

FE: Factor espectral.

Se cuenta con dos formas para calcular el coeficiente en primer lugar, debido a que los espectros son sintéticos, se anclan en el origen con la aceleración máxima del terreno de modo que, se utilizan las mismas formas espectrales, pero usando un factor de escala, ese factor de escala viene siendo equivalente al factor de importancia que actualmente tiene el CSCR 2010. En el fondo de importancia lo que hace es pasar a sacudida sísmica. A partir del sismo fuerte $I=1$ se pasa a sismo extremo $I=1.25$ y sismo moderado $I=0.75$. Por otro lado, utilizar el código vigente con el apartado de ocupación miscelánea con sacudida sísmica para “sismo moderado”.

La fuerza sísmica equivalente se represente como:

- $F_S = CW$

Ecuación (4)

Donde:

C: Coeficiente sísmico.

W: Peso de la estructura.

2.5.1.2. Carga de viento.

La carga de viento ante la excitación dinámica se describe como: “La intensidad de las presiones que ejercen el viento sobre las estructuras varía en el tiempo, esto induce efectos de vibración sobre ellas” (García, 1998). De acuerdo con Salas (2017), en el trabajo se considera la metodología para el cálculo de presión según la propuesta en el XIV Seminario de Ingeniería y Estructural y Sísmica. Para determinar la carga de viento, que es la presión de la velocidad del viento, evaluada a una altura z y está dada por la ecuación:

- $q(z) = q_b C_e(z) C_r C_t C_d$

Ecuación (5)

Donde:

q_b : Presión básica de viento (kg / m^2).

$C_e(z)$: Coeficiente de exposición.

C_r : Coeficiente de recurrencia.

C_t : Coeficiente topográfico.

C_d : Coeficiente de direccionalidad.

Cualquiera de las fuerzas ejercidas por una masa de aire en movimiento, que provoca una presión en ciertas partes de la estructura, mientras que se produce una succión en otras, para calcular la presión neta de diseño se realiza la suma de la presión interna más la externa como se presenta en la siguiente fórmula:

Presión interna:

- $q(z) \cdot 0.8$

Ecuación (6)

- $q(z) \cdot -0.5$

Ecuación (7)

Presión externa:

- $q(z) \cdot 0.18$

Ecuación (8)

- $q(z) \cdot -0.18$

Ecuación (9)

2.5.1.3. Cargas muertas (gravitacionales).

Se definen como aquellas que actúan en el sentido de la gravedad y para el caso de fachadas, la carga muerta es el peso propio del sistema.

En cuanto al peso propio genera una fuerza en dirección a la gravedad por esta razón se verifica el siguiente funcionamiento y se readecua al sistema de ventanería:

De acuerdo con (McCormac & Csernak):

Cuando una viga-columna está sometida a momento a lo largo de su longitud no soportada, ella se desplazará lateralmente en el plano de flexión. El resultado será un momento secundario o incrementado igual a la carga de compresión axial multiplicada por el desplazamiento lateral o excentricidad. En la Figura 10 podemos ver que el momento del miembro se incrementó una cantidad $P_{nt}\delta$, donde P_{nt} es la fuerza axial de compresión determinada por un análisis de primer orden. Este momento ocasionará una deflexión lateral adicional que causará un mayor momento en la columna, que provocará una mayor deflexión lateral, y así sucesivamente hasta que se alcance el equilibrio. M_r es la resistencia requerida a los momentos del miembro. M_{nt} es el momento de primer orden, suponiendo que no hay traslación lateral del marco. Si un marco está sujeto a ladeo, o sea que los extremos de las columnas pueden moverse lateralmente entre sí, aparecerán otros momentos secundarios adicionales. En la Figura 11, el momento secundario producido por el ladeo es igual a $P_{nt}\Delta$. Se supone por la Especificación del AISC

que el momento M_r es igual a M_{lt} (que es el momento debido a las cargas laterales más conocido como $P_{u\Delta}$). (p.351)

Para el análisis del vidrio se toma estas condiciones, pero se omite el valor M_{nt} generado por los apoyos ya que la condición crítica y por analizar es la del vidrio y el momento secundario que se origina.

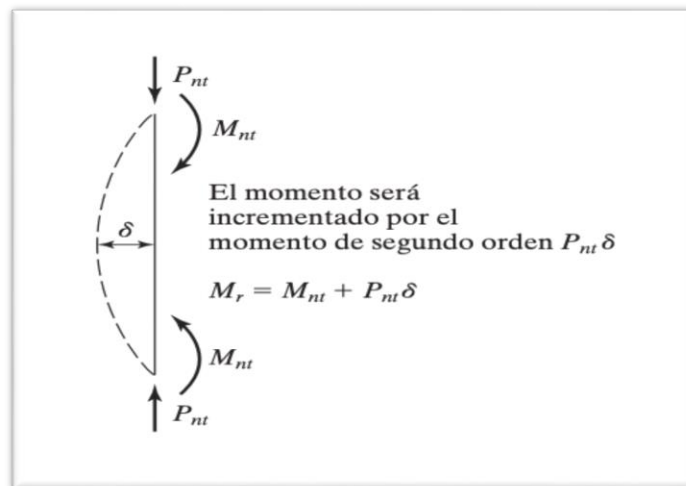


Ilustración 10. Amplificación del momento. Fuente: (McCormac & Csernak)

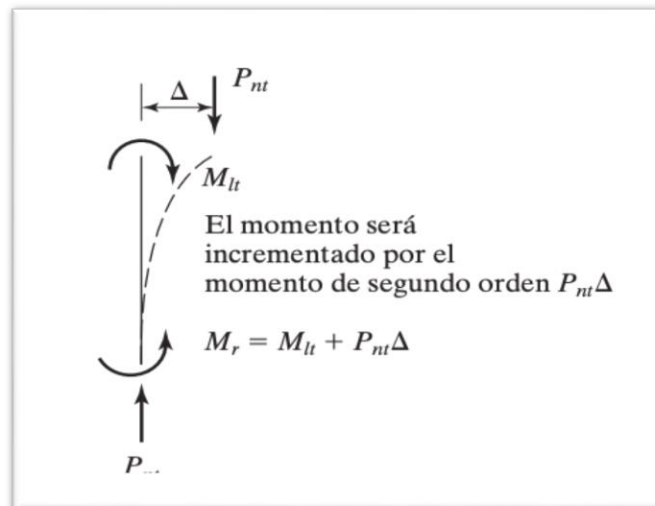


Ilustración 11 Amplificación del momento. Fuente: (McCormac & Csernak)

En donde el desplazamiento de la viga uniformemente distribuida y simplemente apoyada se genera por la siguiente ecuación 15. En cuanto a la suma de momentos se puede abarcar

tanto carga de peso propio como sobrecargas de sismo o viento (se estiman por aparte las cargas de sismo y viento).

Se definen como aquellas que actúan en el sentido de la gravedad y para el caso de fachadas, la carga muerta es el peso propio del sistema.

El peso del vidrio se calcula de la siguiente forma:

- $\text{Peso vidrio monolítico} = \text{Ancho (m)} \times \text{Alto (m)} \times \text{Espesor vidrio (mm)} \times 2.5 \text{ Kg}$

Ecuación (10)

- $\text{Peso vidrio laminado} = \text{Ancho (m)} \times \text{Alto (m)} \times (\text{Suma de espesor vidrio} + \text{Espesor Pvb (mm)}) \times 2.5 \text{ Kg}$

Ecuación (11)

En cuanto a el peso del aluminio corresponde al sistema que se utiliza, generados por el catálogo de Extralum que se encuentran en el apartado de anexos.

2.5.2. Cálculo estructural.

2.5.2.1. Soporte mecánico.

La norma ASTM C1401 indica que la Tensión Admisible de diseño para cargas muertas (o peso propio) debe ser limitada 1 psi ($702.82 \text{ kg} / \text{m}^2$); para limitar la posibilidad que ocurra fluencia lenta.

2.5.2.2. Calculo de fijaciones.

Los insertos embebidos en la obra gruesa (tornillos, remaches, y pernos) deberán diseñarse para resistir las solicitaciones provenientes de las combinaciones de carga para la combinación más desfavorable de carga, el movimiento máximo de cada anclaje no deberá exceder de 1 /8 o (3.2 mm) en cualquier dirección.

En el caso de utilizar fijaciones mecánicas en la obra gruesa, se deberá usar los métodos y factores de seguridad recomendados por el fabricante de la fijación.

2.5.2.3. Esfuerzos admisibles.

La importancia de encontrar los esfuerzos admisibles en el vidrio radica en que la relación de la resistencia del vidrio se encuentra en función de cuantos esfuerzos y fuerzas aplicadas pueda resistir el material sin romperse o tener una deformación permanente por lo que a continuación se formulan dos propuestas para el cálculo de los esfuerzos admisibles.

La norma ASTM E 1300 describe que:

- $\sigma_{abmisible AN}: 23.3MPa.$
- $\sigma_{abmisible HS}: 46.6MPa.$
- $\sigma_{abmisible FT}: 93.1MPa.$

Donde:

AN: vidrio crudo.

HS: vidrio termo-endurecido.

FT: templado.

Sin embargo, esta norma tiene la salvedad que solo hace referencia a cargas de viento, por este motivo y en vista que nuestro alcance es revisar también ante cargas de sismo, se utilizará la norma alemana para revisar los esfuerzos. Para el cálculo de la tensión permisible de un cristal tratado térmicamente, como lo es vidrio templado, se utiliza la ecuación 12 que se muestra a continuación:

$$\bullet \quad \sigma_f = \frac{k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_M}$$

Ecuación (12)

k_{sp} : Factor para el perfil de la superficie de vidrio.

$f_{g;k}$: Valor del esfuerzo por flexión.

γ_M : Factor parcial para materiales.

A continuación, a partir de la tabla 6 se puede extraer el factor para el perfil de la superficie de vidrio.

Tabla 6

Factor para el perfil de la superficie del vidrio	
Tipo de vidrio (sin importar composición)	Factor k_{sp}
Vidrio templado	1.0
Vidrio laminado	1.0
Esmaltado flotado o laminado	(1.0)
Vidrio modelado	0.75
Vidrio esmaltado	(0.75)
Vidrio	0.75
Vidrio modelado estampado	0.6

Nota (1) Estos tipos de vidrio generalmente no están disponibles para vidrio recocido pero los valores de k_{sp} son requeridos también para fórmula de vidrio pretensado. Fuente: (Din 18008-1, 2010)

En el caso del vidrio la resistencia a la tensión es muy inferior comparada con su gran resistencia a compresión que es de 1000 kg/cm^2 , por esta razón se debe revisar el esfuerzo de tensión. En la tabla 7 se presentan cuadros de tensiones admisibles:

Tabla 7

Tensiones admisibles según tipo y posición de vidrio				
Tipo de vidrio		Vidrio de seguridad endurecida térmicamente	Vidrio forzado con calor	Vidrio reforzado químicamente
Vidrio flotado o laminado		120 N/mm ²	70 N/mm ²	150 N/mm ²
Vidrio estampado		90 N/mm ²	55 N/mm ²	150 N/mm ²
Vidrio esmaltado flotado		75 N/mm ²	45 N/mm ²	-
Vidrio esmaltado estampado		75 N/mm ²	45 N/mm ²	-

Fuente: (Din 18008-1, 2010)

En la tabla 8 se presenta los factores parciales de materiales dado, que viene siendo un factor de corrección, ya que cada material cuenta con geometría y propiedades diferentes.

Tabla 8

Factores parciales de materiales		
	Estado límite último	Estado límite de servicio
Vidrio templado	$\gamma_{M;A} = 1.5$	$\gamma_{M;A} = 1.0$
Vidrio recocido	$\gamma_{M;A} = 1.8$	$\gamma_{M;A} = 1.0$
Superficie pretensada	$\gamma_{M;v} = 1.2$	$\gamma_{M;v} = 1.0$

Fuente: (Din 18008-1, 2010)

2.5.2.4. Deformaciones admisibles.

Para elementos verticales y cristales se tienen la siguiente condición:

- $\Delta h_{adm}(cm) = (l/175; 3/4")$

Ecuación (13)

Donde:

l = la longitud mayor del elemento.

Para elementos horizontales se tiene la siguiente condición:

- $\Delta v_{adm}(cm) = \max\left(\frac{l}{360}; 0.32cm\right)$

Ecuación (14)

2.5.2.5. Rigidez.

Se describe la rigidez como: “Todo cuerpo elástico que sea sometido a fuerzas externas ya sean elásticas o dinámicas sufre deformación, la rigidez se define como la relación entre esas fuerzas externas y la deformación que ellas inducen en el cuerpo” (García, 1998)

- Dado que $P = k\delta$

Donde:

P : Carga.

k : Rigidez.

δ : Desplazamiento.

Para el cálculo del desplazamiento se utilizan los métodos clásicos de resistencia de los materiales, en cuanto al cálculo deflexiones se utiliza el caso de una viga simplemente apoyada, vale la pena recalcar, que el desplazamiento se relaciona estrictamente al apoyo o condición que se pueda tener, en el caso particular de la presente tesis se utiliza una viga simplemente apoyada con carga distribuida en la cual se desarrolla por medio de la siguiente ecuación que se muestra continuación:

- $\Delta_{max} = \frac{5\omega l^4}{384 EI}$

Ecuación (15)

2.5.3. Análisis dinámico.

CSCR (2014) afirma:

Se supone un comportamiento elástico lineal de la estructura y se calculan sus modos de oscilación y sus correspondientes períodos. Seguidamente, para aprovechar las propiedades de ortogonalidad con respecto a la masa y a la rigidez de la estructura, se desacoplan las ecuaciones de movimientos. Con las ecuaciones desacopladas para cada modo de vibración j , se calculan los desplazamientos máximos de estructuras durante un sismo y sus correspondientes deformaciones y fuerzas internas, utilizando el coeficiente sísmico C_j asociado al periodo de oscilación T_j . Finalmente se combinan los valores máximos obtenidos para cada modo de oscilación para obtener una estimación probabilística de la respuesta máxima de cada parámetro de interés en la estructura.

Conociendo la teoría anterior se denotarán los principios básicos de períodos y frecuencias que se muestran continuación:

2.5.3.1. Frecuencia natural

Una de las propiedades más importantes para poder caracterizar dinámicamente una estructura es su frecuencia natural que corresponde a la frecuencia, con este sistema vibrará cuando sea desplazado del equilibrio tomando en cuenta que no esté sometido a ninguna fuerza externa.



Ilustración 12. Posición de equilibrio. Fuente: (Hibbeler, 2004)

En la ilustración 12 se tiene una masa con desplazamiento horizontal que estará sometida la suposición preliminar de fuerzas externas $f(t)$ sino que también a dos fuerzas que son fuerzas elásticas $f_k(t)$ cuyo propósito es mantener a la masa en su posición de equilibrio y fuerzas de inercia $f_I(t)$ que se opone a cualquier cambio de velocidad de la masa, se puede expresar el equilibrio de fuerzas como $f_k + f_I(t) = f(t)$. A partir de esta ecuación de equilibrio podemos llegar a lo que se denomina ecuación de movimiento de la masa que podemos expresar sustituyendo las fuerzas elásticas y fuerzas de inercia por sus valores $kx(t) + m\ddot{x}(t) = f(t)$. Como se formuló anteriormente la frecuencia natural no está sometida a ninguna fuerza externa es por esto por lo que será igual a cero como se muestra en la ecuación 16.

- $kx(t) + mx_2(t) = 0$

Ecuación (16)

En este caso, la masa al ser desplazada de su posición de equilibrio oscilará en torno al punto de desplazamiento cero como se muestra a continuación.

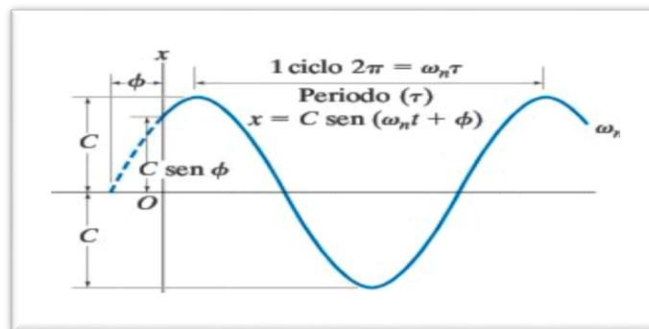


Ilustración 13. Desplazamiento con respecto al tiempo. Fuente: (Hibbeler, 2004)

Esta ecuación 17 se resuelve con respecto al tiempo el desplazamiento, ya que es una ecuación del tiempo contra el movimiento. La masa oscilará en torno al valor de equilibrio según una función que alcanza un máximo que se denominará X y un mínimo que será $-X$. La ecuación del movimiento la podemos expresar siguiendo una función trigonométrica de seno como se representa en la ilustración 13 siendo un movimiento sinusoidal y está expresado en

la siguiente ecuación. Donde ϕ (ϕ) es un desfase y ω (ω) será la frecuencia natural a la que está vibrando del sistema.

- $x(t) = C \text{sen}(\omega t + \phi)$

Ecuación (17)

Para obtener los valores matemáticos de los desplazamientos y aceleraciones se deriva dos veces para conseguir los siguientes resultados.

- $x(t) = X \text{sen}(\omega t + \phi)$
- $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \omega X \cos(\omega t + \phi)$
- $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 X \text{sen}(\omega t + \phi)$

Sustituyendo los valores desplazamiento y aceleración en la ecuación 16 se puede expresar la ecuación del movimiento como:

- $kX \text{sen}(\omega t + \phi) + m(-\omega^2 X \text{sen}(\omega t + \phi)) = 0$

Ecuación (18)

Sacando a factor común $X \text{sen}(\omega t + \phi)$ se tiene que:

- $X \text{sen}(\omega t + \phi) (k - \omega^2 m) = 0$

Ecuación (19)

Para que la solución, la ecuación 19 se toman tres casos, en primera instancia se tiene que $\text{sen}(\omega t + \phi)$ solamente valdrá cero en unos instantes de tiempo determinados, para el caso dos en que X igual a cero corresponde que la masa no se mueve, es por esto que se descartan los dos primeros casos y se soluciona con la expresión $(k - \omega^2 m)$ igualada a cero.

- $(k - \omega^2 m) = 0$

Ecuación (20)

Dado que k y m son dos propiedades del sistema, expresadas en unidades del sistema internacional y omega es la frecuencia natural que es la variable que estamos buscando en unidades de $\frac{rad}{s}$, despejamos la expresión.

- $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Ecuación (21)

Para expresar la ecuación de la frecuencia natural en Hz se divide la raíz entre 2π y nos queda la ecuación fundamental de la frecuencia.

- $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

Ecuación (22)

2.5.3.2. *Período de vibración del vidrio*

Cuando se realiza el análisis de la dinámica el tiempo es una variable que evaluar, debido a que los datos como los ciclos que está en función del tiempo. Para determinar el tiempo, se puede ver en la ilustración 13 que se completa un ciclo en determinado tiempo, se tiene que:

- $t = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

Ecuación (23)

2.5.3.3. *Período del edificio*

En los códigos y libros cuentan con fórmulas para la estimación de períodos, para la presente tesis se van a analizar tres de estos casos.

De acuerdo con el CSCR (2014), se estima el periodo de vibración con la siguiente fórmula:

- $T = 0.12N$

Donde:

T: período fundamental.

N: Número total de pisos.

De acuerdo con Bazán & Meli (s.f), se estima el periodo de vibración con la siguiente fórmula:

- $T = \alpha H^{3/4}$

Ecuación (24)

Donde:

H : altura.

α : coeficiente que toma el valor de 0.085 para edificios de marco de acero, 0.075 para edificios de marco concreto y 0.05 para edificios con muros.

De acuerdo ASCE (2016) se estima el periodo de vibración con la siguiente fórmula:

- $T_a = C_t h_n^x$

Ecuación (25)

Donde:

h_n^x : altura estructural.

x : coeficiente.

C_t : coeficiente.

2.5.3.4. Factor de mayoración

En una vibración forzada amortiguada, el factor de mayoración de la variable x teóricamente empieza a decrecer hasta que llega a ser asintótica y se tiende a infinito. Es decir, si la fuerza o desplazamiento se le aplica una próxima al del sistema natural del sistema ($\omega_0/\omega_n \approx 1$), el sistema entrará en resonancia siendo la amplitud de vibración muy grande.

- $MF = \frac{1}{1-(\omega_0/\omega_n)^2}$

Ecuación (26)

2.5.3.5. Amortiguamiento de vibración libre

Los análisis de vibración que se han expuestos en este documento no se ha incluido los efectos de fricción y amortiguamiento en el sistema es por esto que, las soluciones obtenidas no son del todo reales.

Cuando desplazamos una estructura de su posición de equilibrio la amplitud del movimiento irá reduciendo de forma progresivamente hasta alcanzar de nuevo el reposo, este fenómeno presente en todo tipo de sistema recibe el nombre de amortiguamiento y es otra de las propiedades de una estructura que necesitamos conocer para poder caracterizarla dinámicamente.

Se considera que la masa está unida a otro elemento que va a producir una fuerza proporcional a la velocidad a través de una constante C que vamos a denominar constante de amortiguamiento como se muestra en la ilustración 14.

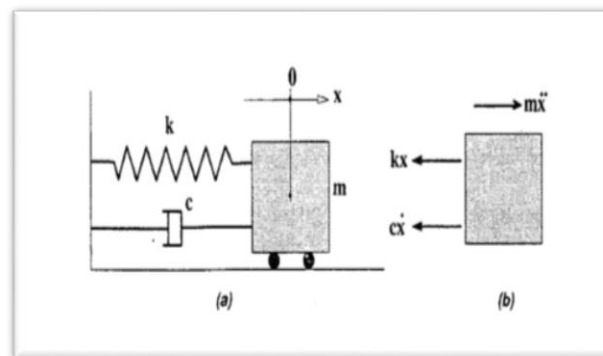


Ilustración 14. Sistema lineal amortiguado con un grado de libertad. Fuente: (García, 1998)

Por lo tanto la masa estará sometida a fuerzas externas ($f(t)$), fuerzas de inercia ($f_I(t)$), fuerzas elástica ($f_k(t)$) y fuerzas de amortiguamiento ($f_c(t)$). Al dibujar el esquema de la ilustración 14 en la sección b, podemos llegar entonces a la ecuación del movimiento de la masa y realizando el equilibrio de las fuerzas se tiene que $f_I(t) + f_c(t) + f_k(t) = f(t)$, sustituyendo estos valores y considerando que las masas están en vibración libre, es decir que las fuerzas externas son igual a cero se tiene la siguiente:

- $m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx = 0$

Ecuación (27)

Resolviendo la ecuación diferencial homogénea lineal de segundo grado se adquiere una solución de tipo:

- $x(t) = e^{\lambda t}$

Ecuación (28)

En función de λ (lambda) sea real o compleja tendremos una ecuación que sea oscilante o no. Dado que tenemos la primera y segunda derivada de x (desplazamiento) con respecto al tiempo serán calculadas a continuación:

- $x(t) = e^{\lambda t}$

- $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \lambda e^{\lambda t}$

- $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = \lambda^2 e^{\lambda t}$

Sustituyendo en la ecuación 27 se obtiene que:

- $m\lambda^2 e^{\lambda t} + c\lambda e^{\lambda t} + ke^{\lambda t} = 0$

Ecuación (29)

Sacando a factor común $e^{\lambda t}$ se tiene:

- $e^{\lambda t} (m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0$

Ecuación (30)

Como $e^{\lambda t}$ no puede ser cero, la solución se puede realizar siempre que:

- $(m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0$

Ecuación (31)

Como la ecuación 31 corresponde a una ecuación de segundo grado en λ (lambda) podemos obtener de forma clásica los valores con la fórmula: $\frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a}$

$$a = m$$

$$b = c$$

$$c = k$$

$$\bullet \lambda_1 = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

Ecuación (32)

Se define como la razón de amortiguación del sistema como:

$$\bullet \zeta = \frac{c}{c_{cr}}$$

Ecuación (33)

Donde:

c : constante de amortiguador.

c_{cr} : amortiguación crítica.

Para el cálculo de la constante de amortiguamiento, también conocido como coeficiente viscoso equivalente extrae del documento (Graham Coult, 2010) y se representa como:

$$\bullet C_H = \frac{\eta k}{\omega}$$

Ecuación (34)

Donde:

η : Factor de pérdida.

k : Rigidez.

ω : Frecuencia natural.

En el año (2010), Graham realiza mediante pruebas de laboratorio el factor de pérdida de materiales como el vidrio de los que se tomarán los datos en la presente tesis.

Graham (2010) afirma:

Los experimentos sobre la amortiguación que se produce en materiales sólidos y estructuras que han sido sometidos a esfuerzos cíclicos, han demostrado que la fuerza de amortiguación es independiente de la frecuencia. Esta amortiguación del material se conoce como amortiguación histérica. Dado que la amortiguación viscosa depende de la frecuencia de oscilación, es difícil separar la rigidez de la estructura de su amortiguación histérica (Graham Coult, 2010).

Tabla 9

Propiedades dinámicas de los materiales	
Material	Factor de pérdida (η)
Vidrio	$1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-3}$
Acero	$1 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-3}$
Concreto	$6 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-2}$
Polímero	0.1 - 2

Fuente: (Graham Coult, 2010)

A continuación, se muestran los tipos de movimientos:

2.5.3.5.1. Sistema sobreamortiguado:

- Corresponde a sistemas con $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$

2.5.3.5.2. Sistema críticamente amortiguado:

- $c = c_{cr}$

Un sistema que oscile en amortiguación crítica, el radicando de la ecuación 32 es igual a cero como se expresa a continuación:

- $$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0$$

Ecuación (35)

o bien,

- $$c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2mw_n$$

Ecuación (36)

2.5.3.5.3. Sistema subamortiguado:

- Corresponde a sistemas con $c > c_{cr}$ o $\zeta > 1$

Capítulo 3: Análisis de resultados

Fuerza sísmica

Cuando se tiene un edificio expuesto a un fenómeno de sismo, lo que se experimenta es un movimiento del terreno, ese movimiento del suelo se desplaza en un sentido u otro. Cuando hay un cambio de la velocidad en una unidad de tiempo, se tiene una aceleración generada por el movimiento del terreno, la cual multiplicada por una masa va a generar una fuerza inercial, es decir, la estructura se acelera con una masa por una aceleración.

El código sísmico, calcula una cortante en la base, que es igual al coeficiente sísmico (representa una aceleración) multiplicado por peso, la otra forma de calcular las aceleraciones para el vidrio, en el apartado de sistemas y componentes estructurales del CSCR, sin embargo, no cuentan con factores de modificación de respuesta para el vidrio y actualmente están más dirigidas a los anclajes, por ende, se usa un factor de 4 para asegurar la fijación. Una de las fórmulas que describe el código como elemento no estructural para la fuerza sísmica lateral es $F_p = 4.0a_f I_p W_p$, donde la aceleración del suelo corresponde a $4.0a_f I_p$, como se puede ver se castiga con un factor de 4 para asegurar la fijación, sustituyendo estos valores se tienen que la aceleración pico efectiva es 0.36 y el factor de importancia es 1, que da un coeficiente sísmico que es igual a la aceleración del suelo de 1.44g, ya que el Código Sísmico no tiene un apartado de vidrio, se procede a verificar la norma y se llega a la conclusión junto con el tutor de la presente tesis (Chacón, 2018), que 1.44 de la masa inercial es un valor muy grande, ya que la estructura no se excita sísmicamente a más de 1g. A modo de ejemplo, cuando una persona está teniendo una fuerza hacia abajo con una gravedad de 1g se encuentra pegado al piso, en el caso de empujar a esa misma persona lateralmente con una gravedad de 1g lo pegaría a la pared, por lo que en el caso de que el coeficiente sísmico supera 1.44g es una suposición grande; por lo que se comprueba que estas ecuaciones son para el caso de diseño para que la estructura no colapse, y en el caso de que tiemble la edificación no falle y pueda resistir una

fuerza sísmica grande. Alternativamente el CSCR-2010 dice que el elemento no estructural se puede calcular como $F_p = \frac{X_p a_{ef} I_p}{R_p} \left(1 + 2 \frac{h_x}{h_r}\right) W_p$ en los factores de amplificación y el factor de modificación de respuesta que se encuentran en la tabla 14.1 de dicho código, sin embargo, este no especifica el componente estructural del sismo de la ventanería. A modo de conclusión, la fuerza total de diseño sísmico que se encuentra en el CSCR específicamente en el apartado 14, no corresponde a un dato realista del cristal en un sistema muro cortina debido a que se puede fracturar con facilidad y por ende es el valor crítico por evaluar. Es por esto, que se utiliza el factor de coeficiente sísmico que se encuentra en el apartado 5 del CSCR.

En primera instancia se compara el CSCR-86 con el CSCR-2010, con el fin de encontrar un sismo de servicio. El análisis del CSCR-89, se utilizó por motivo de que por medio de una fórmula esta permite cambiar los períodos de retorno y de este modo es manipulable por el autor, mientras que el CSCR-2010 nos presenta el sismo moderado por medio de un factor de importancia de edificaciones misceláneas, o sea, obras e instalaciones provisionales para la construcción; es por esto que se realiza los siguientes cálculos en busca de la aceleración idónea.

3.1.1. Análisis mediante el Código Sísmico de Costa Rica-86.

3.1.1.1. Sismo de Diseño.

Datos:

- N= 50 años
- PE= 10%

Solución:

- $PR = \frac{1}{1 - (1 - PE)^{\frac{1}{N}}}$
- $PR = \frac{1}{1 - (1 - 0.10)^{\frac{1}{50}}} = 475 \text{ años}$

Se redondea 457 años a 500 años conservadoramente.

3.1.1.2.Sismo de Servicio.

Datos:

- N= 50 años
- PE= 50%

Solución:

- $PR = \frac{1}{1 - (1 - PE)^{\frac{1}{N}}}$
- $PR = \frac{1}{1 - (1 - 0.50)^{\frac{1}{50}}} = 72 \text{ años}$

Se redondea 72 años a 100 años conservadoramente.

A continuación, en las ilustraciones 15 y 16 se presentan cuadros para la obtención de las aceleraciones para períodos de retorno de 100 y 500 años. Las aceleraciones no son una relación lineal con respecto el período de retorno, por el contrario, es exponenciales. Por ejemplo, si hay un período de retorno de 100 años y lo paso a 50 años se puede bajar aceleración a un 50%, es decir, dejarla a la mitad o a un 60%.

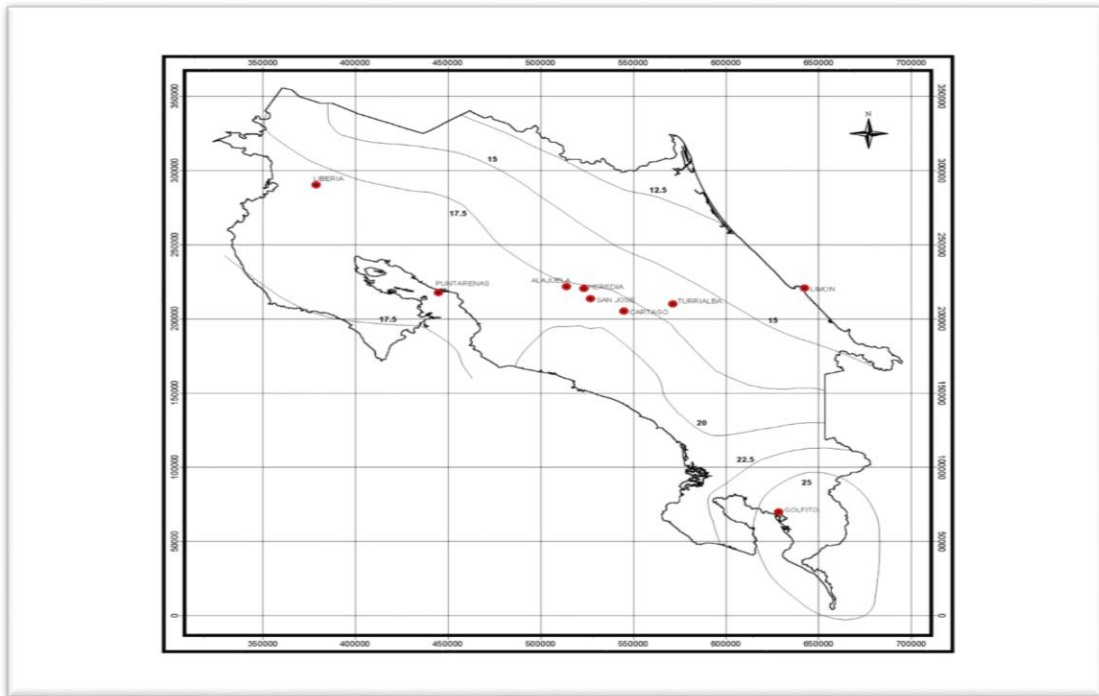


Ilustración 15. Mapa de isoaceleraciones a_{max} para 100 años de periodo de retorno, en % de g. Fuente: (CFIA, 1986)

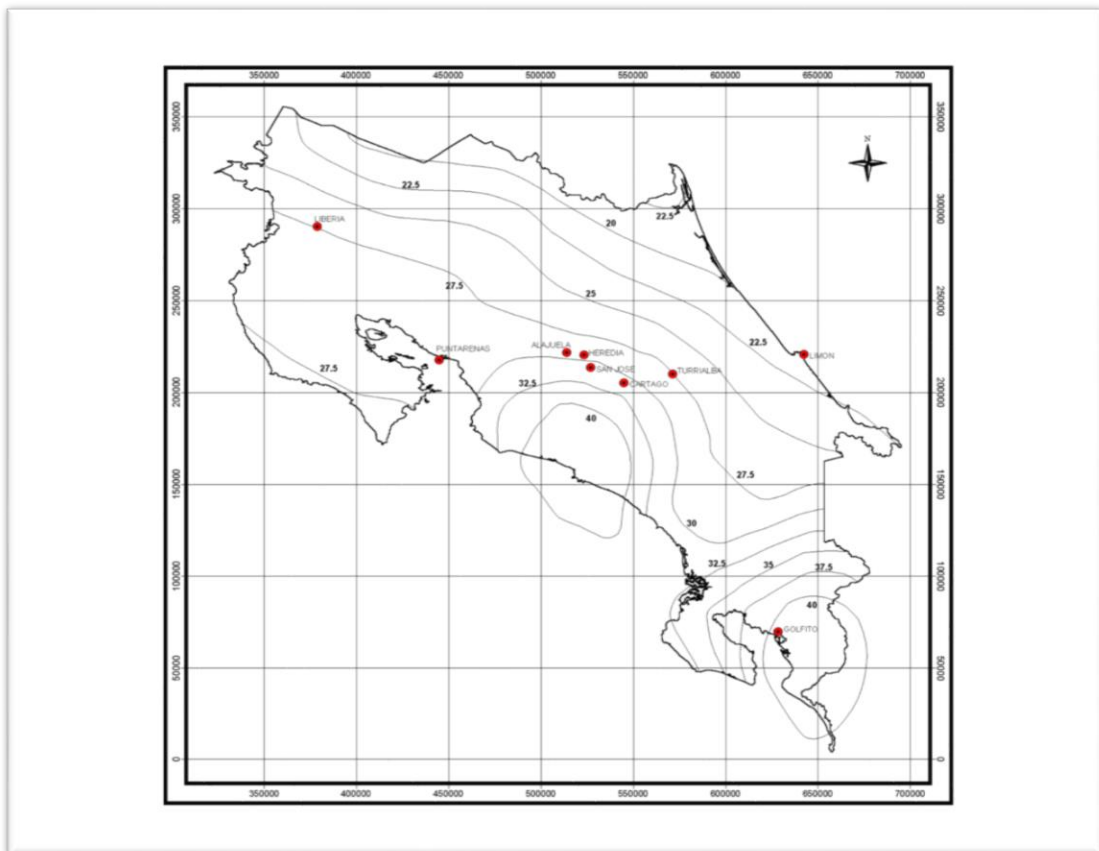


Ilustración 16. Mapa de isoaceleraciones a_{max} para 500 años de periodo de retorno, en % de g. Fuente: (CFIA, 1986)

3.1.1.3. Comparación Sismo de Diseño con Sismo de Servicio.

Se procede a la extracción de datos de las gráficas mostradas en las ilustraciones 15 y 16.

Datos de a_{\max} para 100 años de período de retorno:

San José:

- $a_{\max} = 0.18$

Heredia:

- $a_{\max} = 0.178$

Limón:

- $a_{\max} = 0.14$

Datos de a_{\max} para 500 años de periodo de retorno:

San José:

- $a_{\max} = 0.308$

Heredia:

- $a_{\max} = 0.295$

Limón:

- $a_{\max} = 0.22$

Seguidamente, se procede a realizar una comparación de las aceleraciones máximas para 100 (sismo de servicio) y 500 años (sismo de diseño).

San José:

- $0.18/0.308 = 0.58$

Heredia:

- $0.178/0.295 = 0.60$

Limón:

- $0.14/0.219 = 0.64$

Se definen como sismo moderado, aquellos cuya sacudida sísmica expresada en términos de aceleración pico efectiva, es 25% menor que los sismos fuertes. Se toma conservadoramente, un sismo de servicio a partir del sismo último, por lo tanto, se realiza una proporción de reducción de la vida útil por medio de un factor $FC=0.75$ el cual, es multiplicado al coeficiente sísmico del sismo de diseño (sismo fuerte), con probabilidad de excedencia de 10% para una vida útil de 50 años; este factor de 0.75 tiene la misma función que el factor de importancia en el Código Sísmico actual, cuya función es pasar la aceleración de un sismo fuerte a moderado. Además, utilizando el sismo de diseño se tiene conservadoramente un factor espectral uniforme de 2.5 y ductilidad de 1 una sobrerresistencia de 1.2 (para estructuras tipo voladizo y otros).

- $C = \frac{a_{ef} I_{FED}}{SR} \times FC$
- $C = \frac{0.36 \cdot 1 \cdot 2.5}{1.2} \times 0.75 = 0.5625$
- $FE = \frac{0.36 \cdot 1 \cdot 9.81}{1.2} \times 0.75 = 2.205$

3.1.2. Análisis mediante el Código Sísmico de Costa Rica-2010.

Para cambiar el sismo fuerte a de moderada intensidad se cambia el factor de importancia de 1 a 0.75; el factor de 1 representa el sismo fuerte, mientras que 0.75 es para un sismo moderado; adicionalmente a esto se utiliza una aceleración uniforme de 0.36 y sobre resistencia de 1.2.

- $C = \frac{a_{ef} I_{FED}}{SR}$
- $C = \frac{0.36 \cdot 0.75 \cdot 2.5}{1.2} = 0.5625$
- $FE = \frac{0.36 \cdot 0.75 \cdot 9.81}{1.2} = 2.207$

3.2.Presión del viento

A continuación, se presentan datos iniciales para el cálculo de la presión del viento.

En las tablas 10 y 11, se muestra en detalle los datos iniciales para el cálculo de la presión de viento.

3.2.1. Clasificación según su importancia.

Tabla 10

Clasificación según su importancia	Clasificación según importancia de acuerdo al CSCR-2010
Categoría de diseño por viento	
I Esencial	A
II Especial	B Y C
III Normal	D
IV Miscelánea	E

Fuente: Propia

INS:

- Clasificación: D
- PR: 50 AÑOS

UNA:

- Clasificación: D
- PR: 10 AÑOS

UCR:

- Clasificación: C
- PR: 10 AÑOS

Por medio del procesamiento de los datos se tiene que el INS es un edificio categoría C con un PR de 50 años, en el caso de la UNA se obtiene que tiene una categoría tipo D con un PR de 10 años y finalmente la UCR obtiene una clasificación tipo D con un PR de 10 años.

3.2.2. Objetivo de desempeño por viento.

En las actas de conferencias, propuesto en el congreso de estructuras para carga de presión de viento, restringe el período de retorno según el tipo de edificación, pero también presenta un apartado de “otros” en el cual se pueden manipular los períodos de retorno.

Tabla 11

Objetivo de desempeño por viento

Categoría de desempeño por viento	Niveles de demanda			
I Esencial	Baja	Media	Alta	Muy alta
II Especial	-	-	-	NDR-1
III Normal	-	-	-	NDR-1
IV Miscelánea	-	-	NDR-1	nr
	-	NDR-2	nr	nr

Fuente: Propia

3.2.3. Definición de zonificación.

En la ilustración 17 se presentan las velocidades básicas; se detalla alta para regiones correspondiente a San José y Heredia, sin embargo, para la Zona del Caribe, existe la probabilidad de huracán como se ha podido observar con huracanes recientes como Juana en el 1988 y Otto en el año 2016. Actualmente, se encuentra bajo análisis las velocidades de viento en esta zona por parte del CFIA

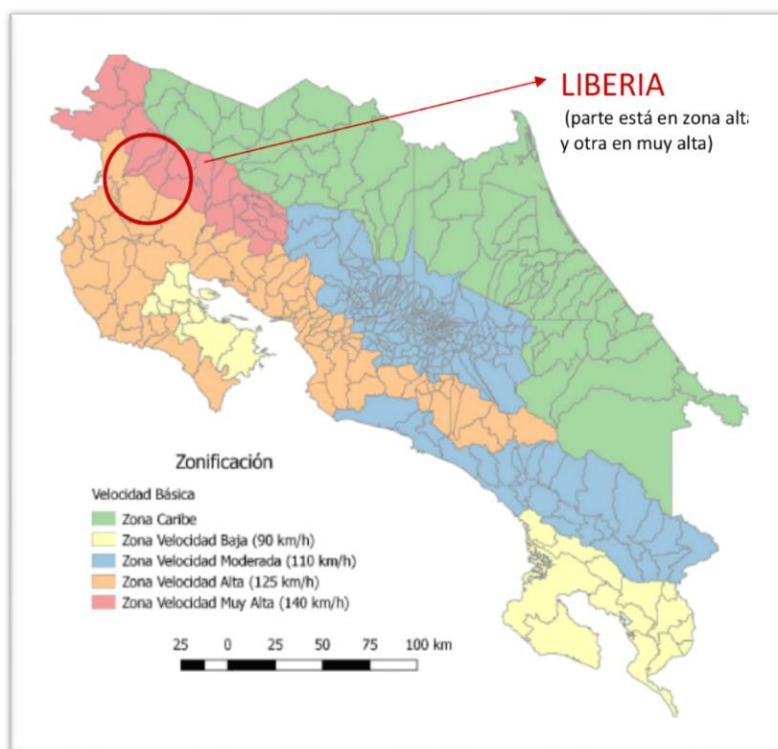


Ilustración 17. Zonificación. Fuente: (Álvarez, 2018)

(Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos), pero se estiman que van a ser velocidades de viento superiores a 200 kg/h, sin embargo, no es un dato certificado, porque se toma las

velocidades más altas que se tiene en el país que son de 140 kg/h para comparar el sistema muro cortina expuesto a presiones relativamente altas y en circunstancias normales, es decir, no se toma en cuenta fenómenos naturales como huracanes.

A continuación, se detallan especificaciones técnicas de las zonas en estudio, donde V_b es la velocidad básica:

- INS: Zona 3, velocidad alta, $V_b = 110$ kg/h
- UNA: Zona 3 velocidad alta, $V_b = 110$ kg/h
- UCR: Zona 3 velocidad alta, Zona Caribe, $V_b = 140$ kg/h

3.2.4. Cálculo de presión básica de viento.

Se procede a realizar el cálculo de la presión básica del viento, en las zonas de estudio:

La fórmula por utilizar se detalla a continuación:

- $q_b = 0.005v_b^2$ [kg/m²]

INS:

- $q_b = 0.005(110^2)$ [kg/m²]
- $q_b = 60.5$

UNA:

- $q_b = 0.005(110^2)$ [kg/m²]
- $q_b = 60.5$

UCR:

- $q_b = 0.005(140^2)$ [kg/m²]
- $q_b = 98.00$

3.2.5. Definición de geometría.

Se procede a determinar la altura de la estructura desde el terreno hasta la altura donde está el vidrio, en los edificios por estudiar.

INS:

- $z = 18.44$

U.N.A:

- $z = 0.5$

UCR:

- $z = 4$

3.2.6. Cálculo de coeficiente de exposición, $C_e(z)$.

En la ilustración 18, se muestran los cuatro casos de categorías de exposición en la categoría de exposición A, se tienen grandes centros urbanos con alturas mayores a 21 metros, la categoría de exposición B, corresponde a áreas urbanas o suburbanas, en cuanto a la categoría de exposición C, se tiene que, corresponden a terrenos abiertos que además tienen alturas de exposición menores a 9 metros, y por último se tiene la categoría de exposición D que corresponde a áreas planas sin obstrucciones.

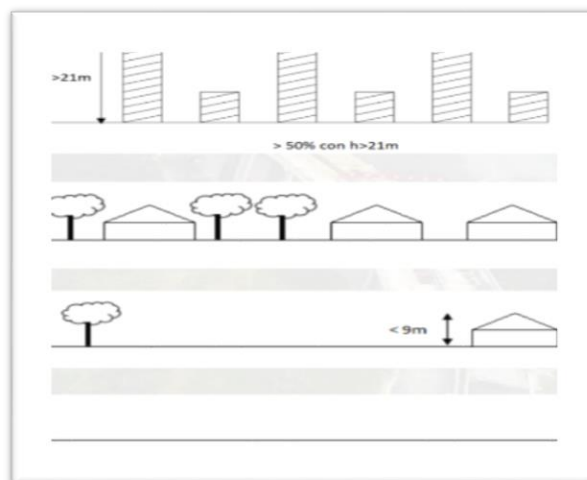


Ilustración 18. Categoría de exposición. Fuente: (Salas, 2017)

Tabla 12.

Disposiciones para el cálculo de coeficiente de expansión

Categoría de exposición	α_e (m)	z_{ge} (m)	z_{min} (m)	Longitud de exposición L_{exp}	Rugosidad predominante en sectores "viento arriba"
I	5.0	457	16	Máx. (800m,10h)	A ⁽²⁾
II	7.0	366	8	Máx (800m, 20h)	B ⁽³⁾
III	9.5	274	4	-	C ⁽¹⁾
IV	11.5	213	2	Máx. (800m, 20h)	D ⁽⁴⁾

Fuente: Propia

Se procede a realizar el análisis para los edificios por estudiar:

INS:Categoría de exposición I

- $C_e = 2.01 \left(\frac{z}{z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}}$
- $C_e = 2.01 \left(\frac{18.44}{457} \right)^{\frac{2}{5}}$
- $C_e = 0.56$

UNA:Categoría de exposición II

- $C_e = 2.01 \left(\frac{z}{z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}}$
- $C_e = 2.01 \left(\frac{0.5}{366} \right)^{\frac{2}{7}}$
- $C_e = 0.30$

UCR:Categoría de exposición II

- $C_e = 2.01 \left(\frac{z}{z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}}$
- $C_e = 2.01 \left(\frac{4}{366} \right)^{\frac{2}{7}}$
- $C_e = 0.55$

3.2.7. Coeficiente de recurrencia, C_r .

Se procede a calcular el coeficiente de exposición en los edificios por estudiar:

- $C_r = (0.36 + 0.1 \ln(12TR))^2$

INS:

- TR: 10 años
- $C_r = (0.36 + 0.1 \ln(12(10)))^2 = 0.7$

UNA:

- TR: 10 años
- $C_r = (0.36 + 0.1 \ln(12(10)))^2 = 0.70$

UCR:

- TR: 50 años
- $C_r = (0.36 + 0.1 \ln(12(50)))^2 = 1$

3.2.8. Coeficiente topográfico, C_t .

- $C_t = 0$

3.2.9. Coeficiente de direccionalidad, C_d .

Para estructuras tipo componentes y revestimiento tiene en valor para C_d de 0.85.

3.2.10. Cálculo de la presión de viento.

El cálculo de la presión de viento está descrito por la ecuación $q(z) = q_b C_e(z) C_r C_t C_d$ que se presenta en la tabla 13 y se ilustra en la imagen 19.

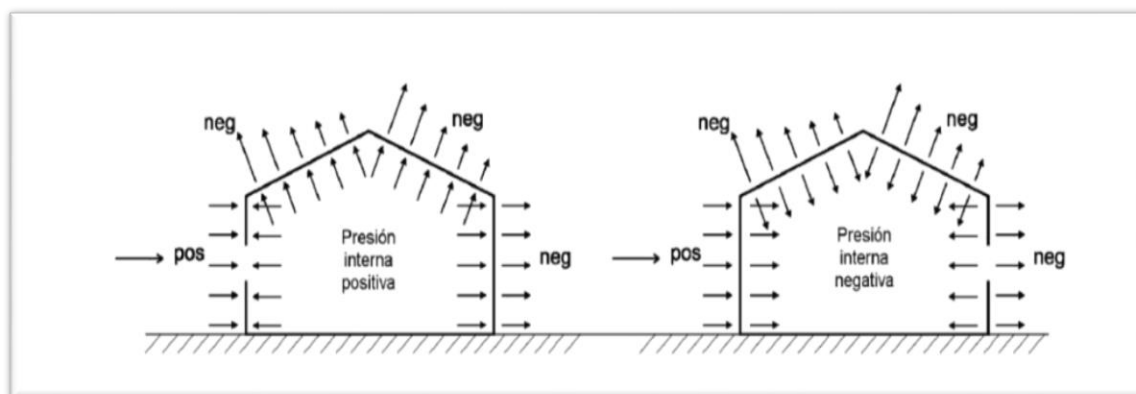


Ilustración 19. Presión de viento. Fuente: (Arias, 2016)

Hay que destacar que se utilizó períodos de retorno de 10 años debido a que ha teniendo consistencia con el trabajo, se tiene una condición de servicio, sin embargo, es recomendable que el vidrio soporte cargas últimas de diseño, dado que, una falla en el sistema puede cambiar las condiciones de diseño y generar problemas

Tabla 13.

Cálculo de presiones de viento			
Variables	INS	UNA	UCR
$q_b \text{ kg / m}^2$	60.5	60.5	98.00
C_e	0.56	0.30	0.55
C_t	-	-	-
C_d	0.85	0.85	0.85
C_r	0.70	0.70	1.00
$q(z) \text{ kg / m}^2$	20.15	10.80	45.81

Fuente: Propia

3.2.11. Cálculo de presión neta de diseño.

En la siguiente tabla (14) se presenta el cálculo de la presión interna y externa, en el caso de las fachadas de vidrio en la UNA cuenta adicionalmente con paredes laterales.

Tabla 14.

Cálculo de presión interna y externa				
Estructura	Presión interna		Presión externa	
	$q(z) \cdot 0.8$	$q(z) \cdot -0.5$	$q(z) \cdot 0.18$	$q(z) \cdot -0.18$
INS	16.12	-10.07	3.63	-3.63
UNA	8.63	-5.40	1.19	-1.19
UCR	36.65	-22.90	8.25	-8.25

Se requiere la presión interna y externa para el cálculo de la presión neta. Fuente: Propia

- Presión de viento INS: 19.75 kg/m^2
- Presión de viento UNA: 10.58 kg/m^2
- Presión de viento para paredes laterales UNA: 8.87 kg/m^2
- Presión de viento UCR: 44.89 kg/m^2

3.3. Modelaje SAP-2000

3.3.1. *Cristal.*

Propiedades generales del cristal:

- Tipo: Capa delgada.
- Densidad: 2500 kg/m^3
- Módulo de elasticidad, E: 70 MPa
- Poisson, U: 0.22
- Coeficiente de expansión térmica: $8 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

3.3.2. *Aluminio.*

Propiedades generales del aluminio:

- Aleación: 6063-T6
- Densidad: 2712.6308 kg/m^3
- Módulo de elasticidad: $7.101\text{E}+09 \text{ kg/m}^2$
- Poisson, U: 0.33
- Coeficiente de expansión térmica: $2.358 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

3.3.3. Dimensiones.

3.3.3.1. Dimensiones del vidrio en Instituto Nacional de Seguros Sede Central.

Dimensionamiento de aluminio:

1. Primer aluminio:

Profundidad exterior: 0.1016m

Ancho exterior: 0.0508m

Espesor: 0.0015

2. Segundo aluminio:

Profundidad exterior: 0.1016 m

Ancho exterior: 0.0127m

Espesor: 0.0015

Dimensionamiento de vidrio:

Espesor: 12mm → 0.012m

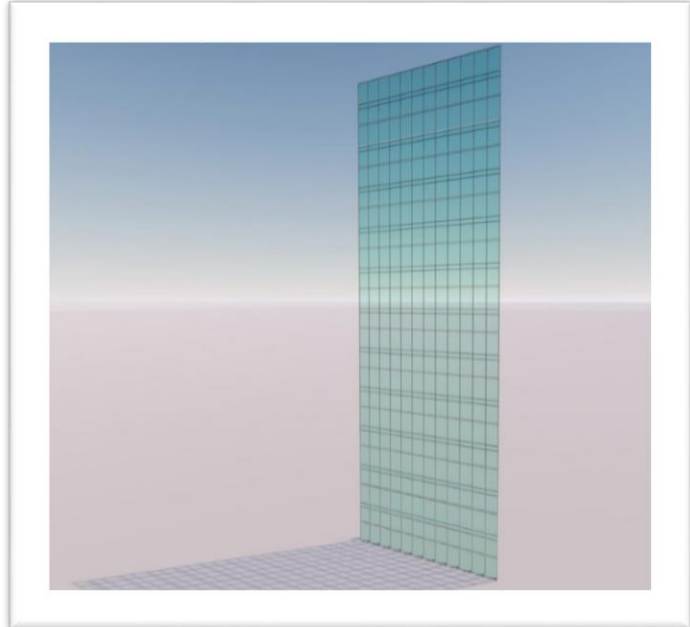


Ilustración 20. Fachada en análisis INS. Fuente: Propia

3.3.3.2. Dimensiones de vidrio en Universidad Nacional de Costa Rica Sede Heredia.

Dimensionamiento de aluminio:

Profundidad exterior: 0.1016 m

Ancho exterior: 0.0508m

Espesor: 0.0015

Dimensionamiento de vidrio:

Espesor: 6.64mm → 0.00664m

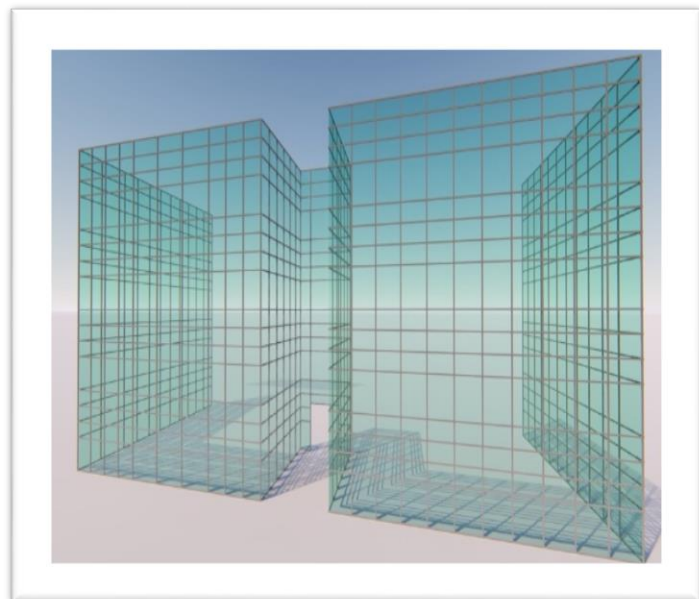


Ilustración 21. Fachada en análisis INS. Fuente: propia

3.3.3.3. Dimensiones de vidrio en Universidad de Costa Rica Sede Caribe.

Dimensionamiento de aluminio:

Profundidad exterior: 0.1016 m

Ancho exterior: 0.0445m

Espesor: 0.0015

Dimensionamiento de vidrio:

Espesor: 6.4mm → 0.0064 m

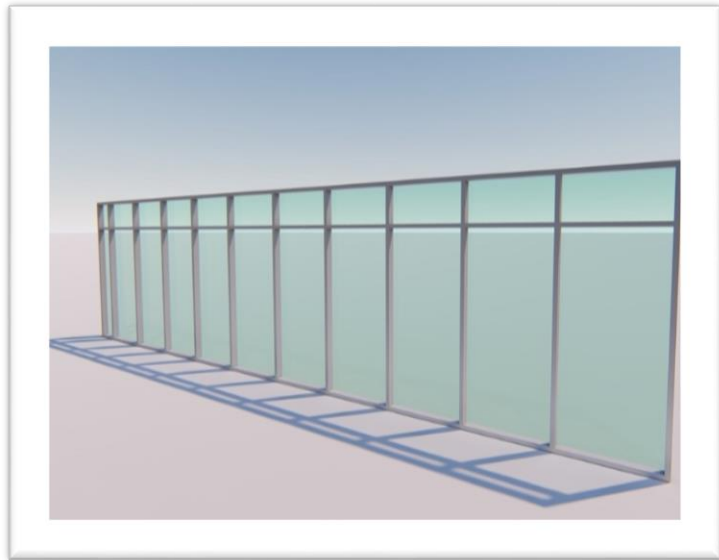


Ilustración 22. Fachada en análisis UCR. Fuente: Propia

3.3.4. Malla para elementos finitos.

La definición de la malla viene completamente ligada al tamaño de los elementos que se utilicen, se recomienda una malla de $L/10$, sin embargo, algunas estructuras que fueron modeladas eran muy grandes, por lo que se usó un mallado de 0,25 metros, tanto en ancho como en alto para todos los vidrios, esto con el fin de ser consistentes con el modelo. Así mismo, para el vidrio se utiliza un elemento tipo “Shell-Thin” y se divide en elementos finitos para generar varios puntos. Se utilizan contornos rectangulares a través de mallas, es una discretización de continuos estructurales para hacer una mejor aproximación. Es por esto, que se utilizarán los mismos para calcular valores de esfuerzos y deformación.

3.3.5. Unidades.

Las unidades que utiliza el proyecto serán las de kilogramo, fuerza, metro, grado centígrado y en algunos casos kilogramo fuerza, centímetro y grado centígrado.

3.3.6. Tipo de apoyo.

El apoyo que se presenta es articulado que restringe el movimiento vertical y horizontal, pero que permite los giros en una dirección.

3.3.7. Modelos del sistema.

Se realizará dos suposiciones del sistema muro cortina con los que se modeló los sistemas para el INS, UNA y UCR en todos los casos se utilizó los sistemas de ventanas más grandes para el análisis de los modelos. A continuación, se presentan lo que se llamará modelo 1 y e en todos los cálculos siguiente:

3.3.7.1. Modelo 1:

En la ilustración 23, se da una suposición en el que por medio del aluminio que se encuentra encima del vidrio le da cierta continuidad.

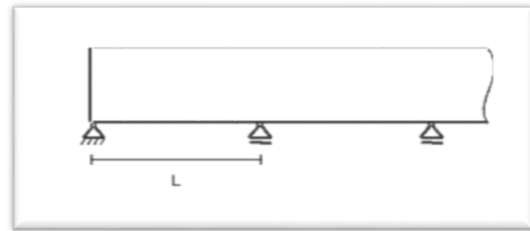


Ilustración 23. Viga de vidrio continua. Fuente: Propia Propia

3.3.7.2. Modelo 2:

En la ilustración 24, se tiene viga de vidrio que actúa de forma propia generada por un espacio entre el aluminio y el vidrio.

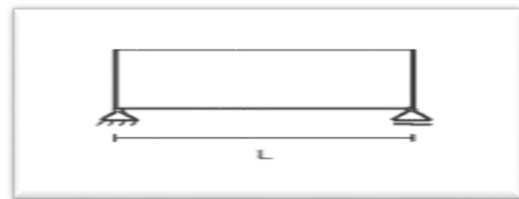


Ilustración 24. Viga de vidrio sin continuidad. Fuente: Propia

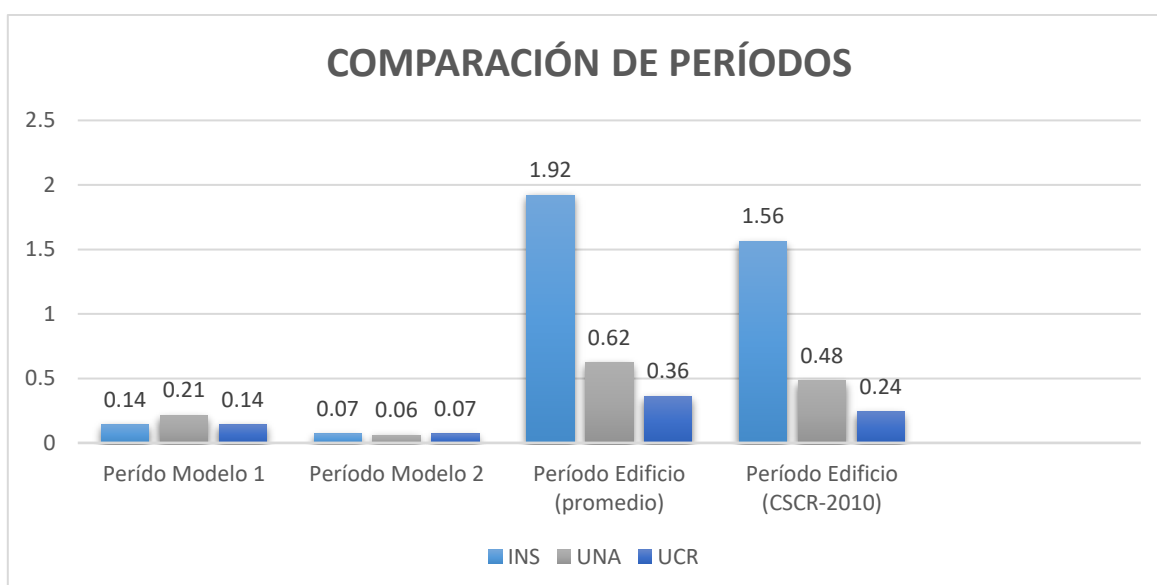
3.4. Parámetros dinámicos

Se dispone de un marco de aluminio y se tiene otro material que es el vidrio, ambos pertenecen a un sistema muro cortina con masa determinada, todo esto está sobre una estructura sujeta a una fuerza de sismo que excita la estructura, la cual responde con vibraciones libres. Se presenta un sistema en el que, se ve afectado por medio de la onda del suelo, la onda del edificio y onda del sistema de ventanería. El propósito del análisis es el comportamiento de vibración, es decir, si va a tener resonancia por medio de un análisis modal en el muro cortina que muestra todos los posibles modos de vibración, este hace un análisis de modos de oscilación, les asigna una probabilidad de deformación y la suma de forma probabilísticas con modelos como CQC, sumas absolutas entre otros, se encuentra que el período modal crítico siempre corresponde al primer modo de vibración del programa SAP-2000, siendo este el

análisis crítico para los parámetros dinámicos. En el análisis modal hay varios métodos, entre ellos, el de valores propios también conocido como “Eigen vectors”, así mismo, el método de “Ritz vectors” este se utiliza generalmente cuando se quiere reducir el modo de oscilaciones, ambos, se pueden analizar en SAP-2000. Para la presente tesis se utiliza el método de los valores propios y sin condiciones iniciales de estrés para que el sistema vibre libremente.

3.4.1. *Períodos de vibración.*

El periodo es conocido como el tiempo que tarda en completar un ciclo. Se muestran en la gráfica 1 los períodos, tanto de la estructura primaria (edificio) con los períodos de vibración de la estructura secundaria (sistemas de ventanería), calculados en SAP-2000 con el primer modo de vibración el cual es el más crítico. Para el edificio, se calcula un promedio del período extraído de la literatura con el período formulado por el código ASCE7-16, ya que para ambos una de sus variables es la altura, además, los períodos de vibración se acercan entre sí, sin dejar de lado el código vigente, por esta razón, también se revisará el período aproximado del CSCR-2010 que relaciona el período de vibración con el número de pisos del edificio. Las tres fórmulas planteadas cuentan con sus propios coeficientes.



Gráfica 1. Comparación de períodos. Fuente: Propia

3.4.1.1. Período de vibración del edificio

Para caracterizar los períodos aproximados de estructura primaria se eligieron 3 fórmulas las cuales son:

- $T = 0.12N$
- $T = \alpha H^{3/4}$
- $T_a = C_t h_n^x$

En los métodos de cálculo de período anteriores, se necesita caracterizar factores como altura del edificio, número de pisos, así como también coeficientes definidos por el tipo de estructura; que para el caso de los tres edificios en revisión se tiene una estructura tipo marco de concreto por lo que, estos valores van a ser fijados en la tabla 15 y 16.

Tabla 15

Comparación de formas para períodos de vibración de los tres edificios en análisis						
Edificios	CSCR-2010 $T = 0.12N$	LITERATURA $T = \alpha H^{3/4}$		ASCE7-16 $T_a = C_t h_n^x$		
	N	Altura (H)	α	C_t	h_n	x
INS	13	67.62	0.075	0.0466	67.62	0.9
UNA	4	17.58	0.075	0.0466	17.58	0.9
UCR	2	8.92	0.075	0.0466	8.92	0.9

Fuente: Propia

Tabla 16

Períodos de vibración en los edificios en análisis			
Edificios	Formula 1 CSCR-2010	Formula 2 Literatura	Formula 3 ASCE7-16
INS	1.56	1.77	2.07
UNA	0.48	0.64	0.61
UCR	0.24	0.39	0.33

Nota: Resultados obtenidos de períodos de vibración por medio de los tres métodos propuestos. Fuente: Propia

3.4.1.2. Período de vibración de ventanería (modelo 1)

Se extrae los períodos de vibración por medio del software SAP-2000, en la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 17

Períodos de la ventanería con continuidad	
Períodos de vibración	Estructura secundaria
INS	0.14
UNA	0.21
UCR	0.14

Fuente: Propia

3.4.1.3. Período de vibración de ventanería (modelo 2)

Se extrae los períodos de vibración por medio del software SAP-2000, en la tabla 18 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 18

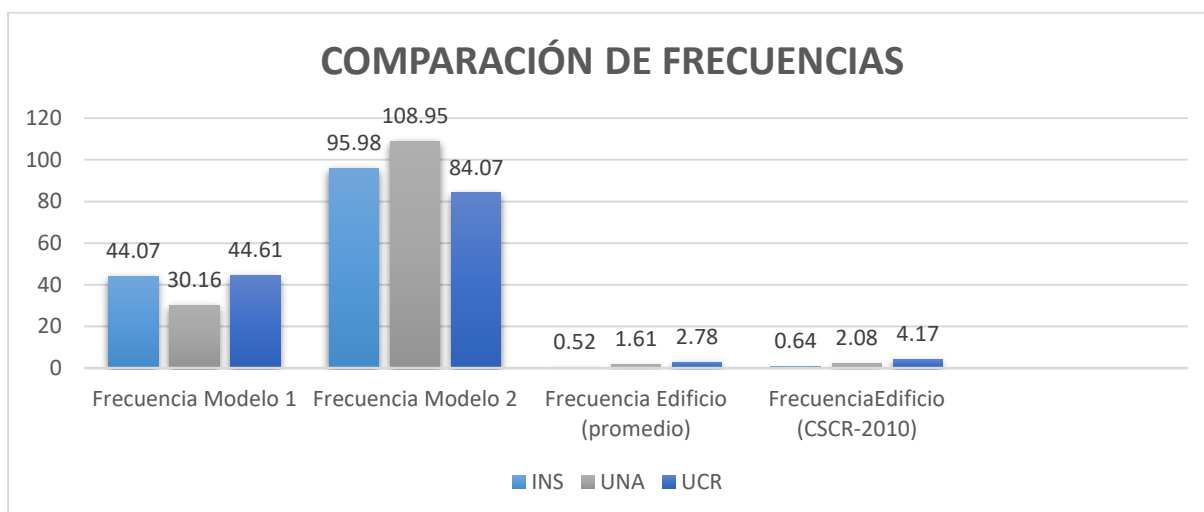
Períodos de la ventanería sin continuidad	
Períodos de vibración	Estructura secundaria
INS	0.07
UNA	0.06
UCR	0.07

Fuente: Propia

3.4.2. Frecuencia.

Se analiza la frecuencia (cantidad de oscilaciones de un movimiento ondulatorio) de la ventanería con el programa SAP-2000 correspondientes al primer modo, adicionalmente se calcula la frecuencia para cada edificio la cual es la inversa del período de vibración $f = \frac{1}{T}$ y se ilustra en la gráfica 2.

La frecuencia que se extrae de este apartado servirá para el análisis de la resonancia.



Gráfica 2. Comparación de frecuencia. Fuente: Propia

3.4.2.1.Frecuencia del edificio

En la siguiente tabla se presentan las frecuencias debido a edificios de pequeña, mediana, y gran altura.

Tabla 19

Frecuencia del edificio		
Estructura	Promedio (rad/s)	CSCR-2010 (rad/s)
INS	0.52	0.64
UNA	1.61	2.08
UCR	2.78	4.17

Nota: La frecuencia de calculan con la inversa del periodo, el promedio de la frecuencia se estima con las fórmulas extraídas de la literera con la norma ASCE7-16, adicionalmente se calcula la frecuencia debido a la fórmula de estimación del periodo del CSCR-2010. Fuente: Propia.

3.4.2.2.Frecuencia de ventanería (modelo 1)

A continuación, en la tabla 20, se presentan las frecuencias en rad/s y ciclos/s de un elemento no estructural con un sistema de continuidad.

Tabla 20

Frecuencia de la estructura con continuidad		
Estructura	(ciclos/s)	(rad/s)
INS	7.01	44.07
UNA	4.80	30.16
UCR	7.10	44.61

Fuente: Propia

3.4.2.3.Frecuencia de ventanería (modelo 2)

A continuación, en la tabla 21, se presentan las frecuencias en rad/s y ciclos/s de un elemento no estructural con un sistema sin continuidad.

Tabla 21

Frecuencias de la estructura sin continuidad		
Estructura	(ciclos/s)	(rad/s)
INS	15.27	95.98
UNA	17.34	108.95
UCR	13.38	84.07

Fuente: Propia

3.4.3. Factor de mayoración.

Cuando la vibración ya no es libre y se somete a una fuerza como lo es el sismo, el sistema que responde es una superposición de efectos. El sistema de vidrios se encuentra apoyado al edificio, entonces se tiene que, el cristal tiene excitación natural y el edificio otra.

Para la revisión de las frecuencias se aplica un factor de amplificación MF donde ω_0 es la frecuencia del edificio y ω_n es la frecuencia de la ventanería. En cuanto a la frecuencia del sistema no estructural o fachada se utiliza los modelos propuestos 1 y 2 que corresponden a sistemas con continuidad y sin continuidad. Mientras que para las revisiones del edificio se utiliza la frecuencia promediada extraída de fórmulas en la literatura y el ASCE-716. Se calcula el valor de MF y adicionalmente se realiza la revisión por medio del dividendo. Ya que cuando

$\left(\frac{\omega_0}{\omega_n}\right)^2$ se empieza a parecer a 1 la ecuación tenderá a infinito es decir, entrará en resonancia la estructura en análisis. El factor de mayoración teóricamente empieza a crecer hasta que llega a ser asintótica, es decir, nunca toca la recta, mientras que $\omega_0 > \omega_n$ las frecuencias empiezan a decrecer, por ende, controlando las vibraciones y frecuencias se pueden controlar los desplazamientos.

El factor de amplificación que se representa en la ilustración 25 equivale a

$$MF = \frac{X}{F_0/K} = \frac{1}{1 - (\omega_0/\omega_n)^2}$$

en la tabla 22.

A continuación, se realiza la revisión por mayoración en la tabla 22:

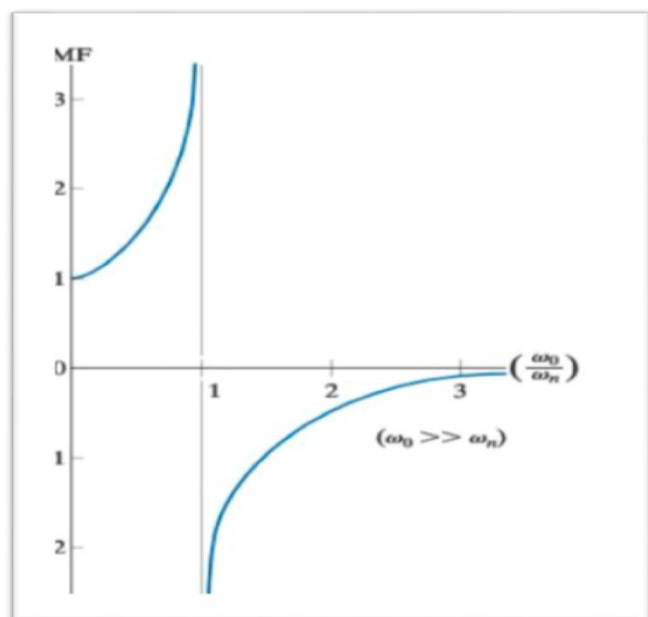


Ilustración 25 Factor de mayoración. Fuente: (Hibbeler, 2004)

Tabla 22

Factor de mayoración

Edificio	Modelo 1				Modelo 2			
	Promedio		CSCR-2010		Promedio		CSCR-2010	
	MF	$\left(\frac{\omega_0}{\omega_n}\right)^2$	MF	$\left(\frac{\omega_0}{\omega_n}\right)^2$	MF	$\left(\frac{\omega_0}{\omega_n}\right)^2$	MF	$\left(\frac{\omega_0}{\omega_n}\right)^2$
INS	1	0.0001	1	0.0002	1	0.00003	1	0.00004
UNA	1	0.002	1	0.0005	1	0.00002	1	0.020
UCR	1	0.004	1	0.009	1	0.001	1	0.002

Fuente: Propia

Según los resultados obtenidos las frecuencias cumplen, debido a que no entran a un estado de resonancia dando para las tres estructuras valores de amplificación similares.

3.4.4. Rigidez de la estructura.

La rigidez está dada por la ecuación $K = \frac{384EI}{5L^3}$ correspondiente a una carga simplemente apoyada con carga distribuida, se desarrollará en las tablas 23, 24 y 25 que se muestran a continuación.

- Rigidez de estructura sin continuidad

Tabla 23

Cálculo de rigidez del sistema de ventanería INS	
Módulo de elasticidad del vidrio	7138000 kg/m ²
Inercia	0.0012 m ⁴
Longitud	1.85 m
Rigidez	57011.78 kg/m

Fuente: Propia

Tabla 24

Cálculo de rigidez del sistema de ventanería UNA	
Módulo de elasticidad del vidrio	7138000 kg/m ²
Inercia	0.0015 m ⁴
Longitud	1.48 m
Rigidez	155542.25 kg/m

Fuente: Propia

Tabla 25

Cálculo de rigidez del sistema de ventanería UCR	
Módulo de elasticidad del vidrio	7138000 kg/m ²
Inercia	0.0005 m ⁴
Longitud	2.00 m
Rigidez	15586.29 kg/m

Fuente: Propia

3.4.5. Amortiguación viscosa de la estructura de vidrio.

Para los cálculos realizados a continuación se toma el modelo 2 (simple) explicado en la sección 3.3.7.2 en la presente tesis, en cuanto al coeficiente de amortiguación, está dado por $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_c}$ y se desarrolla en tabla 26, para el cálculo de amortiguación viscosa equivalente se tomará de la siguiente fórmula $C_H = \frac{\eta k}{\omega}$, descrita por (Graham Coult, 2010). Los parámetros de amortiguación menores y rondan entre 0.3%-0.2% según el estudio generado por Graham con dimensiones sin embargo, cuentan con una rigidez menor ya que las dimensiones son de 3 de ancho y 3 de largo.

Tabla 26

Cálculo de amortiguación viscosa de la estructura de vidrio						
Edificio	n	k (N)	ω (rad/s)	CH $N\left(\frac{s}{m}\right)$	Cc	$\zeta\%$
INA	0.002	559097.43	95.98	11.65	0.0100	1.00
UNA	0.002	1525356.19	108.95	28.00	0.0368	3.68
UCR	0.002	141320.89	84.07	3.36	0.0063	0.63

Fuente: Propia

Para determinar el número de ciclos de tiempo transcurridos y llegar a una reducción de 50% en la amplitud de desplazamiento se usa la siguiente fórmula $0.11/\zeta$ como se muestra en la ilustración 26.

$j_{50\%}$ para INS:

$$\frac{0.11}{0.0100} = 11$$

$j_{50\%}$ para UNA:

$$\frac{0.11}{0.0368} = 2.99$$

$j_{50\%}$ para UCR:

$$\frac{0.11}{0.0063} = 16.46$$

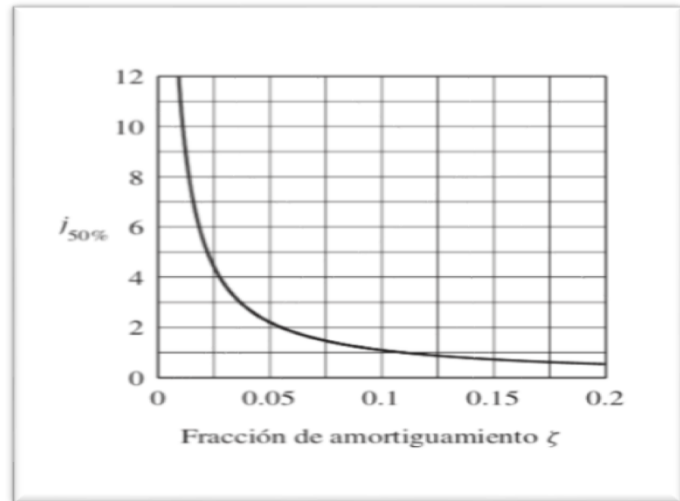
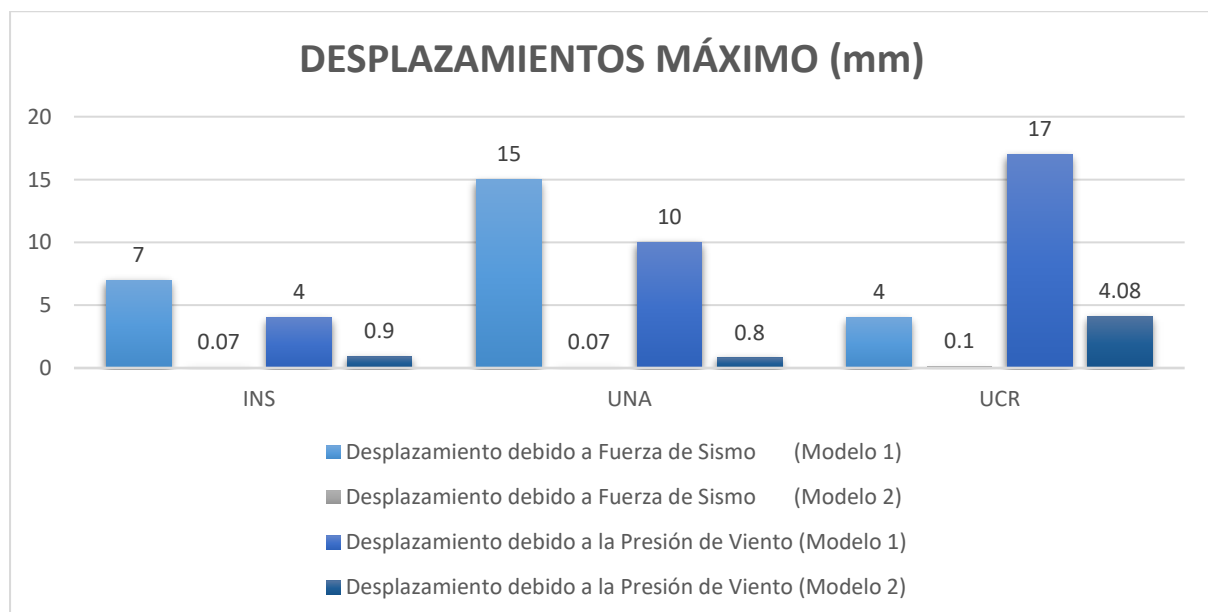


Ilustración 26. Número de ciclos necesarios para reducir la amplitud de la vibración libre en 50%. Fuente: (Copra, 2014)

3.5. Desplazamientos

En tablas 27 a la 31 se desarrollará los desplazamientos obtenidos en SAP-2000 debido a las cargas de sismo y viento con los modelos propuestos (modelo 1 y 2). A continuación, en la gráfica 3 se presentan los desplazamientos máximos obtenidos.



Gráfica 3. Desplazamientos máximos. Fuente: Propia

3.5.1. Desplazamientos (modelo 1).

3.5.1.1. Desplazamiento debido a fuerza de sismo.

A continuación, se presenta los desplazamientos del vidrio inducido por la fuerza sismo, los datos obtenidos se encuentran en la tabla 27 y 28 que se muestra a continuación en dirección X (U1), Y (U2).

Tabla 27

Desplazamientos debido a sismo en dirección Y, modelo con continuidad			
Desplazamientos	INS	UNA	UCR
U1 (mm)	0	0	0
U2(mm)	7	15	4
U3(mm)	0	0	0

Fuente: Propia

Tabla 28

Desplazamientos debido a sismo en dirección X, modelo con continuidad			
Desplazamientos	INS	UNA	UCR
U1	-	0	-
U2	-	10	-
U3	-	0	-

Fuente: Propia

Se procede a desarrollar la fórmula de deformaciones permisible, para revisar el desplazamiento en el vidrio (extraído de SAP-2000) provocado por carga sismo, en condición de continuidad en la fachada.

INS:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 185/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.06$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 10 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm.

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $7 < 10 \rightarrow$ Cumple

UNA:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 148/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 0.84$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 8 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm.

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $15 > 8 \rightarrow$ No cumple

Revisión para U1 (sismo en X):

- $10 > 8 \rightarrow$ No cumple

UCR:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 200/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.14$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 11 \rightarrow \text{Rige}$$

Alternativamente se usa 19 mm:

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $4 < 11 \rightarrow$ Cumple

3.5.1.2.. Desplazamiento debido presión de viento

A continuación, se presentan el desplazamiento debido presiones de viento, los datos obtenidos se representan en la tabla 29.

Tabla 29

Desplazamientos debido a presión de viento, modelo con continuidad			
Desplazamientos	INS	UNA	UCR
U1 (mm)	0	10	0
U2(mm)	4	8	17
U3(mm)	0	0	0

Fuente: Propia

Se procede a desarrollar la fórmula de deformaciones permisibles, para posteriormente revisar con los desplazamientos extraídos en SAP-2000 generados por presión de viento en condición de continuidad en la fachada de vidrio.

INS:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 185/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.06$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 11 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm

Revisión para U2 (presión de viento en Y):

- $4 < 11 \rightarrow \text{Cumple}$

UNA:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 148/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 0.84$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 8 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm.

Revisión para U1 (presión de viento en X):

- $10 > 8 \rightarrow \text{No cumple}$

Revisión para U2 (presión de viento en Y):

- $8 = 8 \rightarrow$ Cumple

UCR:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 200/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.14$$

$$\Delta h_{adm}(m) = 11 \rightarrow \text{RIGE}$$

- Alternativamente se usa 19 m:

Revisión para U2 (presión viento en Y):

- $17 > 11 \rightarrow$ No Cumple

3.5.2. Desplazamiento (modelo 2).

3.5.2.1. Desplazamiento debido a fuerza de sismo.

Tabla 30

Desplazamiento debido a sismo en dirección Y, modelo sin continuidad			
Desplazamientos	INS	UNA	UCR
U1 (m)	0.0	0.0	0.0
U2(m)	0.9	0.7	0.1
U3(m)	0.0	1.0	0.0

Fuente: Propia

A continuación, se compara los desplazamientos en una condición sin continuidad debido a la excitación sísmica con los parámetros de desplazamientos recomendados o permisibles.

INS:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 185/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.06$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 10 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 m

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $0.9 < 10 \rightarrow$ Cumple

UNA:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 148/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 0.84$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 8 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $0.7 < 8 \rightarrow$ Cumple

UCR:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 200/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.14$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 11 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm

Revisión para U2 (sismo en Y):

- $0.1 < 11 \rightarrow$ Cumple

3.5.2.2.Desplazamiento debido presión de viento

Tabla 31

Desplazamientos debido a la presión de viento, modelo sin continuidad			
Desplazamientos	INS	UNA	UCR
U1 (m)	0.0	0.0	0.0
U2(m)	1.0	0.8	4.80
U3(m)	0.0	0.0	0.0

Fuente: Propia

A continuación, se procede a realizar las comprobaciones para los desplazamientos del vidrio generados por presiones de viento definiendo el modelo 2, es decir, que no existe continuidad y se trabaja con un vidrio de toda la cuadrícula en este caso las más grande:

INS:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 185/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.06$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 11 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm,

Revisión para U2 (presión de viento en Y):

$$1.0 < 11 \rightarrow \text{Cumple}$$

UNA:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 148/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 0.84$$

$$\Delta h_{adm}(mm) = 8 \rightarrow \text{Rige}$$

- Alternativamente se usa 19 mm.

Revisión para U2 (presión de viento en Y):

$0.8 < 8 \rightarrow$ Cumple

UCR:

- $\Delta h_{adm}(cm) = l/175$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 200/175$$

$$\Delta h_{adm}(cm) = 1.14$$

$$\Delta h_{adm}(m) = 11 \rightarrow$$
 Rige

- Alternativamente se usa 19 m:

Revisión para U2 (presión de viento en Y):

- $4.08 < 11 \rightarrow$ Cumple

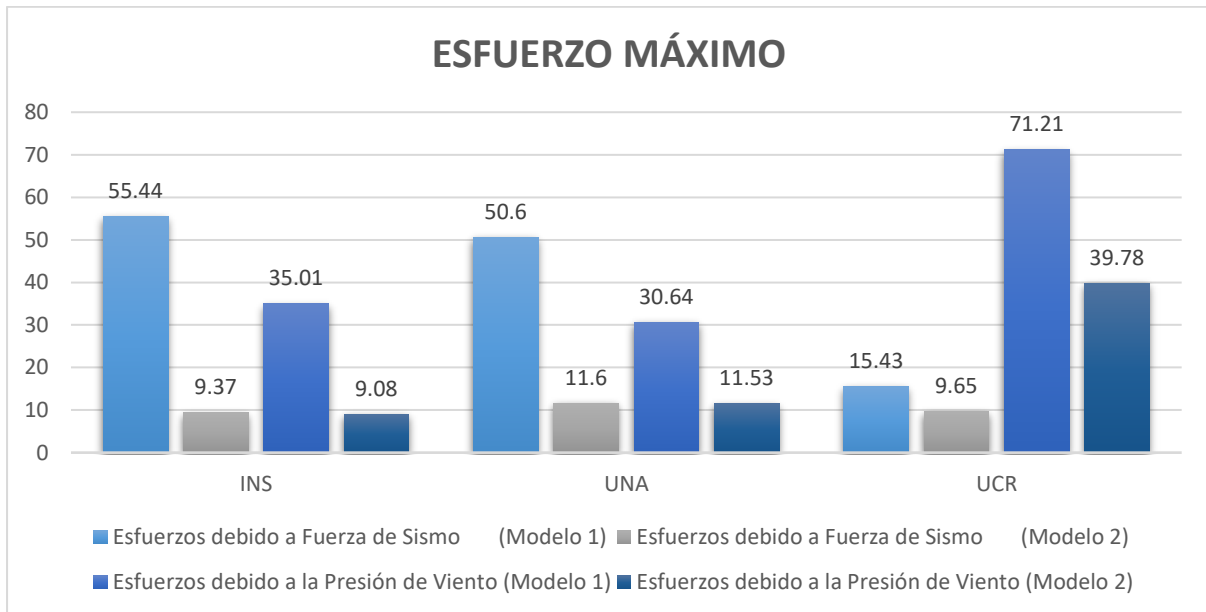
3.6. Esfuerzos

Para el cálculo de los esfuerzos admisibles del vidrio templado se desarrolla la siguiente ecuación en la cual desarrolla por medio las tablas 6, 7 y 8 conforma con la norma alemana Din 18008-1.

- $\sigma_f = \frac{k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_M}$

- $f_{g;d} = \frac{1 \cdot 120}{1.5} = 80 \text{ N/mm}^2$

En la gráfica 4 se presentan los esfuerzos generados por el vidrio, con los que se van a revisar con los esfuerzos permisibles (capacidad-demanda).



Gráfica 4. Desplazamientos máximos. Fuente: propia

3.6.1. Esfuerzos (modelo 1).

A continuación, se muestra los esfuerzos obtenidos por los modelos en SAP-2000.

- Modelación completa con *suposición de estructura de vidrio con continuidad* por el método de elementos finitos de los esfuerzos por la acción de la presión viento.

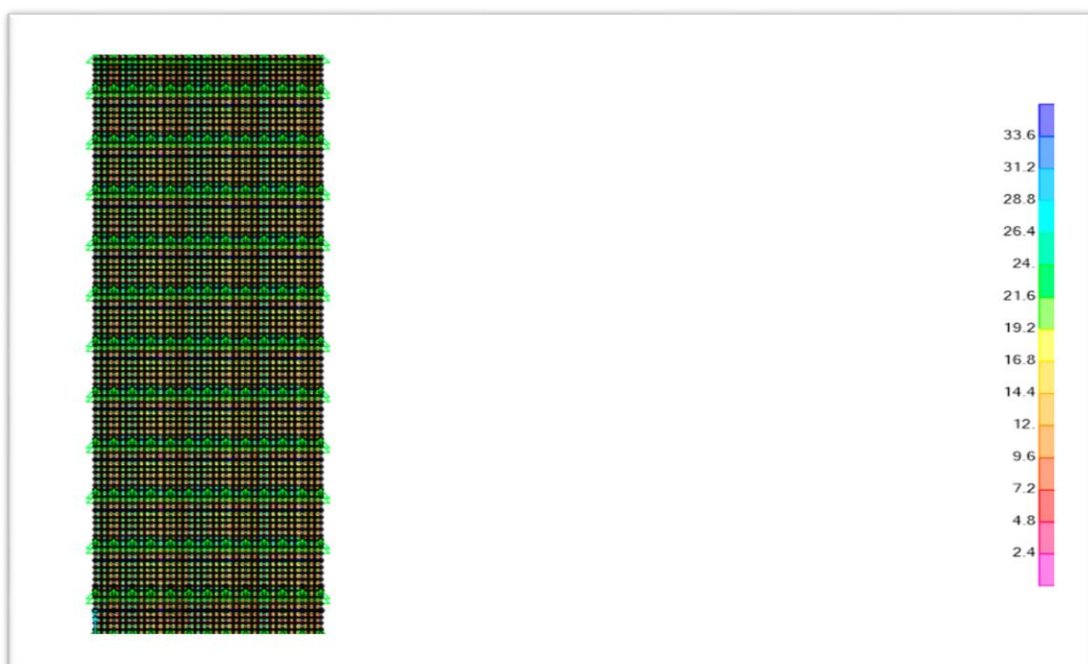


Ilustración 27. Esfuerzos INS (Presión de viento). Fuente: Propia

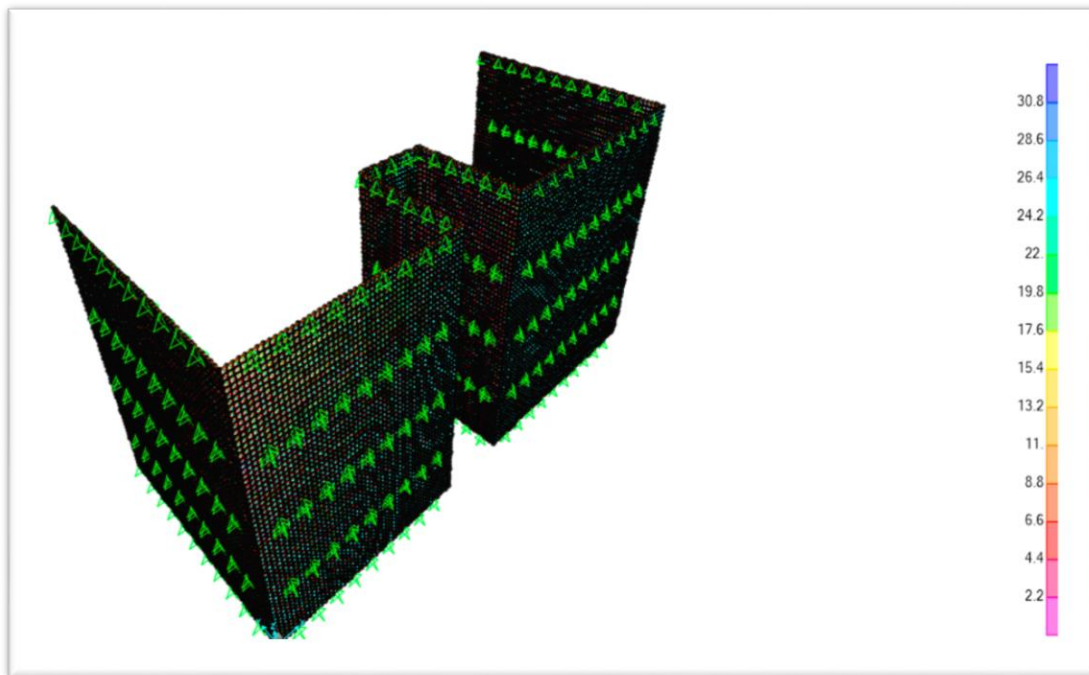


Ilustración 28. Esfuerzos UNA (Presión de viento). Fuente: Propia

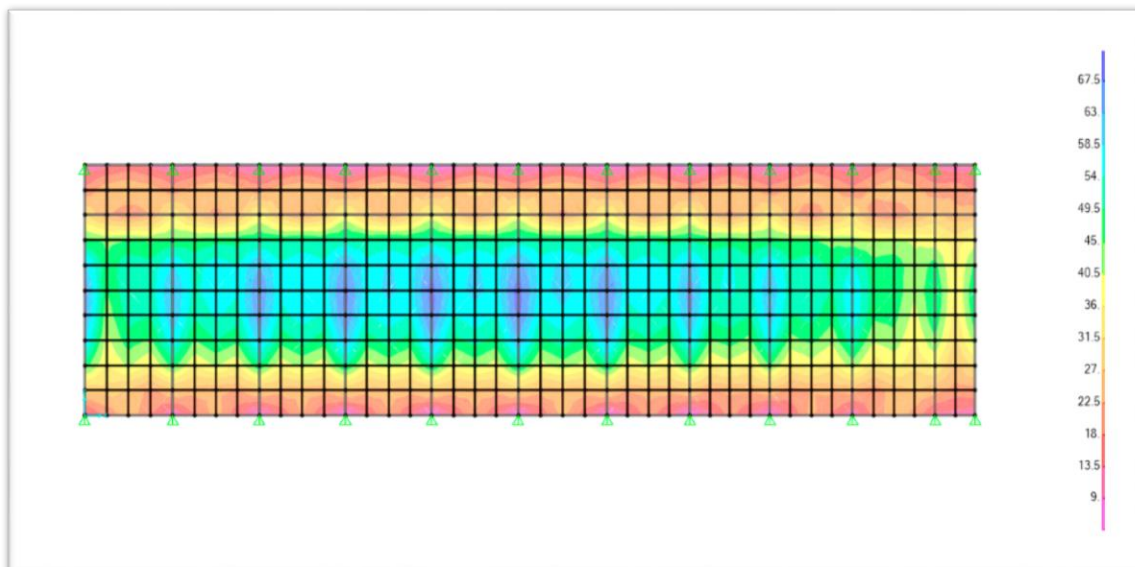


Ilustración 29. Esfuerzos UCR (Presión de viento). Fuente: Propia

- Modelación completa con suposición *de estructura de vidrio continuidad* con elementos finitos a los esfuerzos por la acción de fuerza sísmica



Ilustración 30. Esfuerzos INS (fuerza sísmica). Fuente: Propia

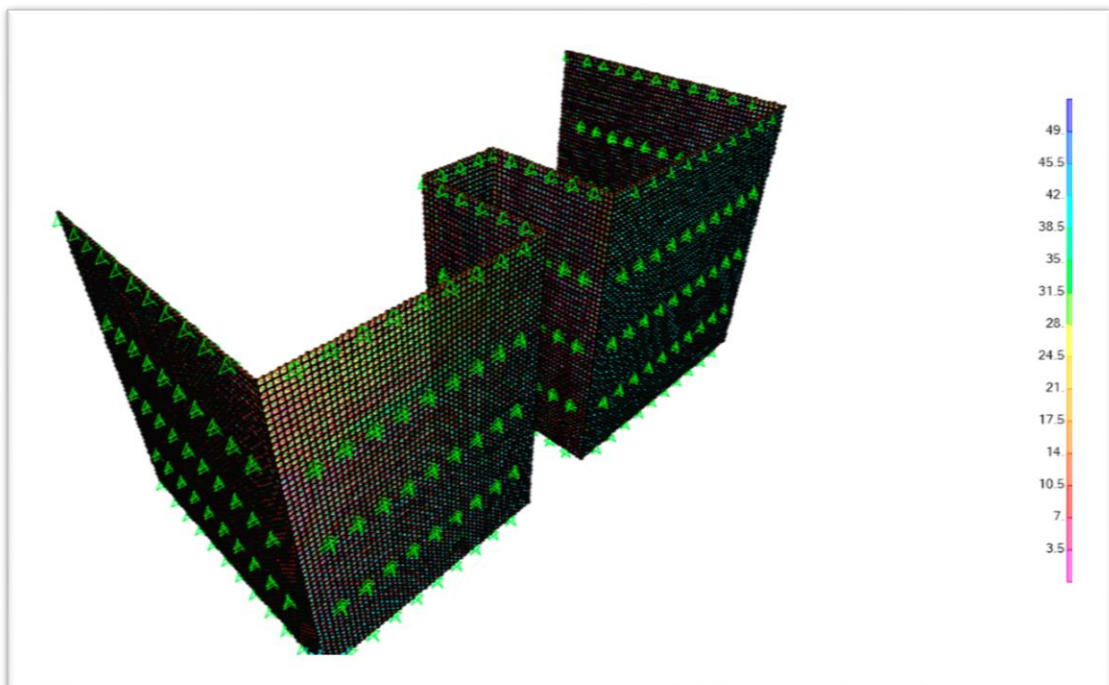


Ilustración 31. Esfuerzos UNA (fuerza sísmica). Fuente: Propia

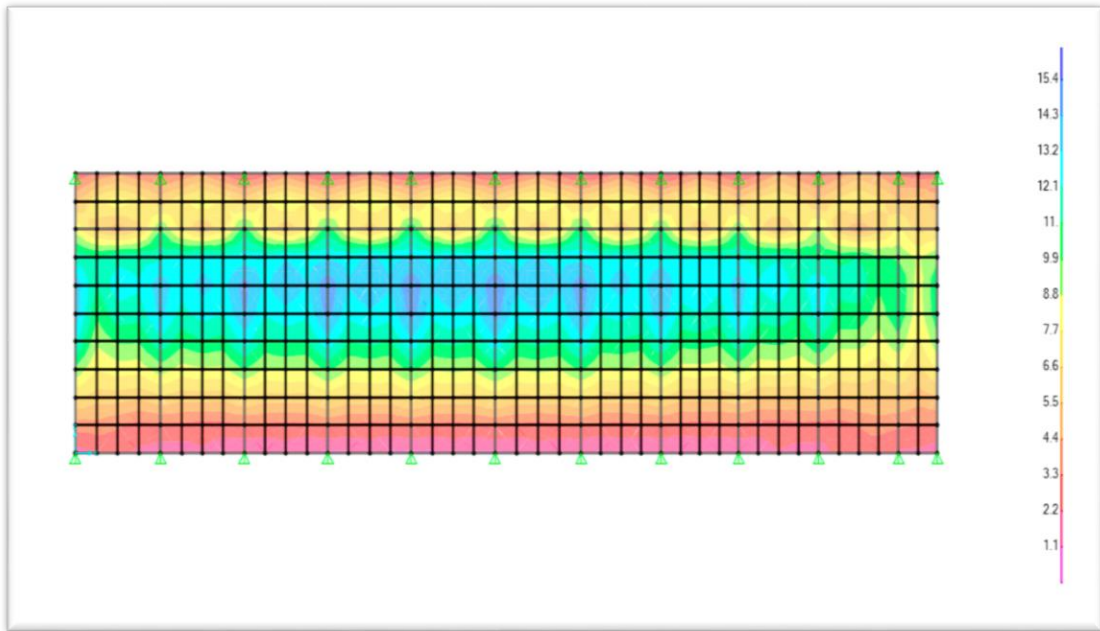


Ilustración 32. Esfuerzos UCR (fuerza sísmica). Fuente: Propia

A continuación, se muestra la siguiente tabla de resultados donde se compara el esfuerzo del vidrio debido a presión de viento con el esfuerzo por la aplicación de la fuerza de sismo.

Tabla 32

Comparación de esfuerzos, modelo con continuidad		
Edificación	Esfuerzos debido a fuerza de sismo kg/cm^2	Esfuerzos debido a presión de viento kg/cm^2
INS	55.44	35.10
UNA	44.5-50.6	30.64
UCR	15.43	71.21

Fuente: Propia

Revisión de esfuerzos, INS:

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 55.44 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 35.10 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

Revisión de esfuerzos, UNA:

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 50.6 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 30.64 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

Revisión de esfuerzos, UCR:

$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 15.44 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$

$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 57.77 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$

3.6.2. Esfuerzos (modelo 2).

- Modelación completa con *suposición de estructura de vidrio sin continuidad* con elementos finitos ante los esfuerzos por la acción de la presión de viento.

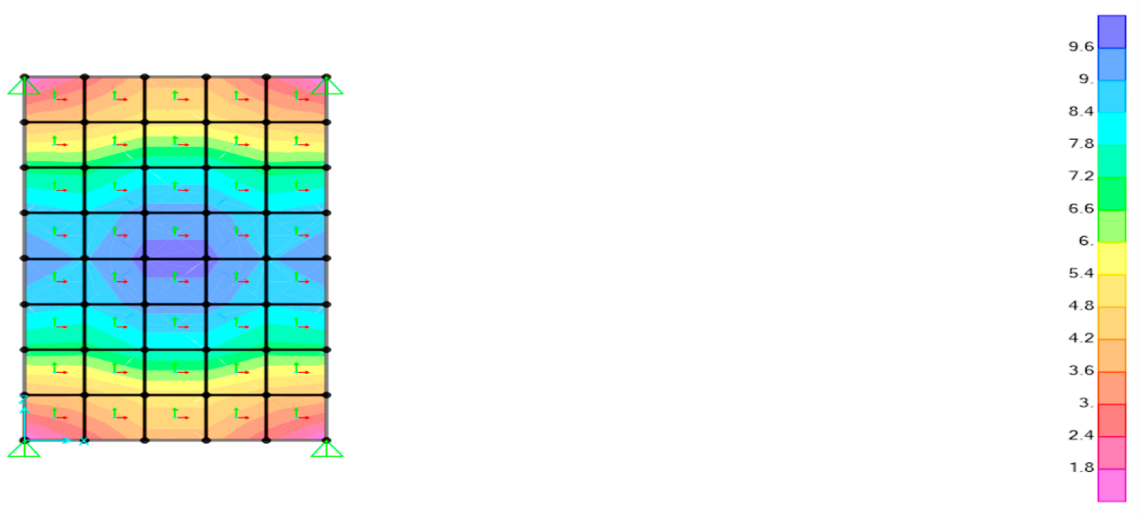


Ilustración 33. Esfuerzos INS (Presión de viento). Fuente: Propia

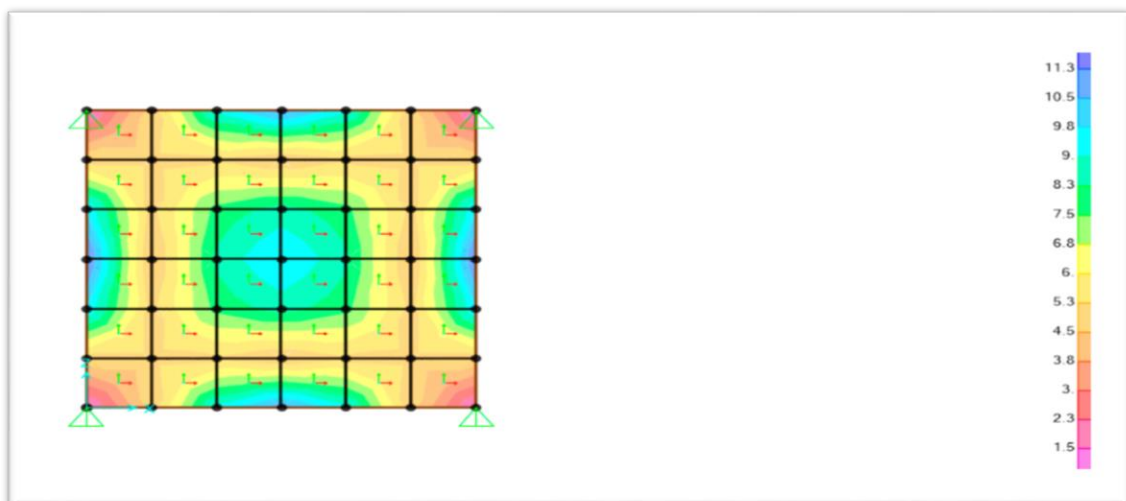


Ilustración 34. Esfuerzos UNA (Presión de viento). Fuente: Propia

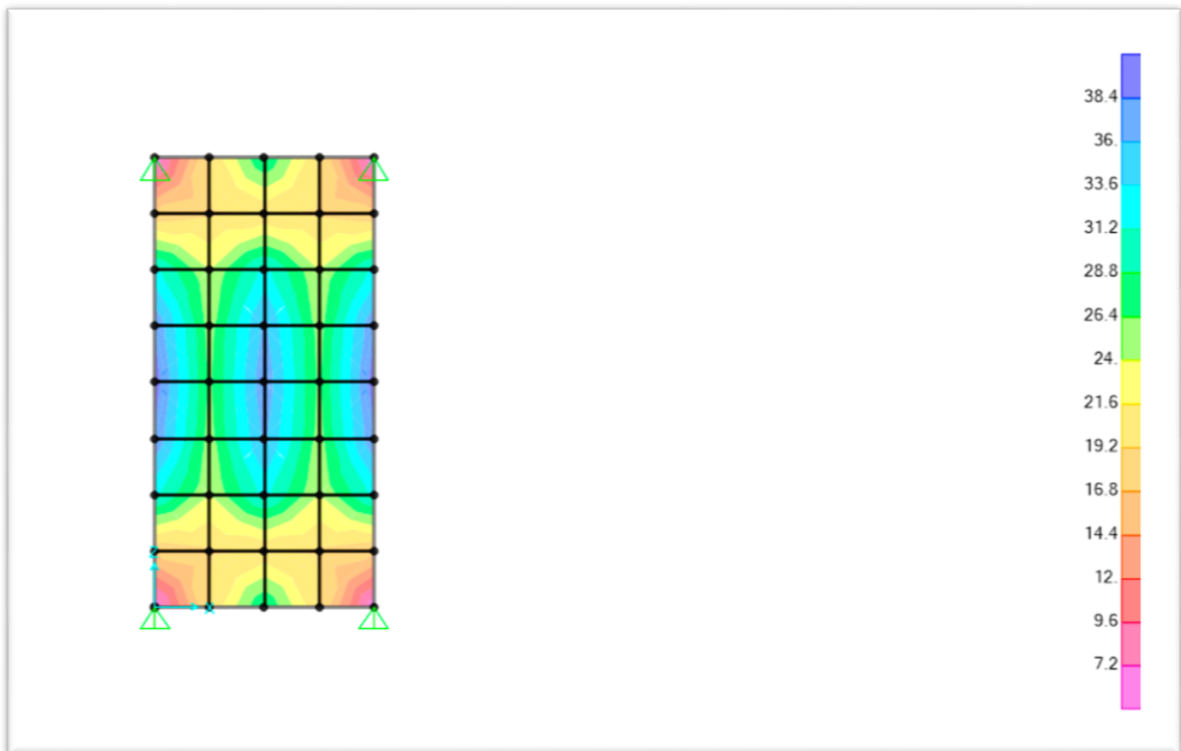


Ilustración 35. Esfuerzos UCR (Presión de viento). Fuente: Propia

- Modelación completa con suposición *de estructura de vidrio sin continuidad* con elementos finitos ante los esfuerzos por la acción de la fuerza de sismo.

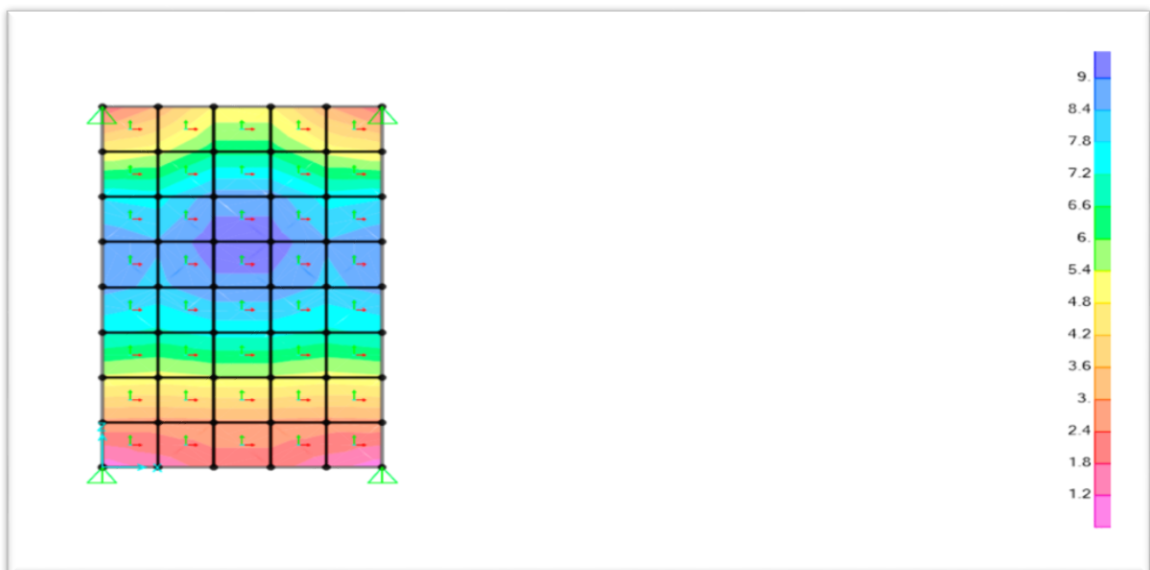


Ilustración 36. Esfuerzos INS (Fuerza de sismo). Fuente: Propia

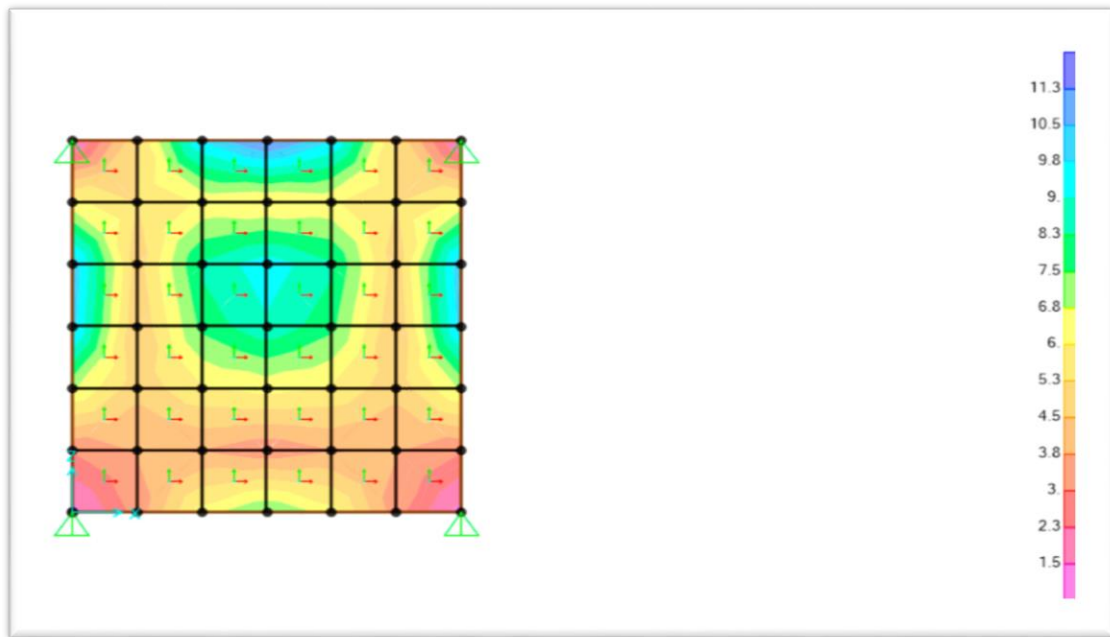


Ilustración 37. Esfuerzos UNA (Fuerza de sismo). Fuente: Propia

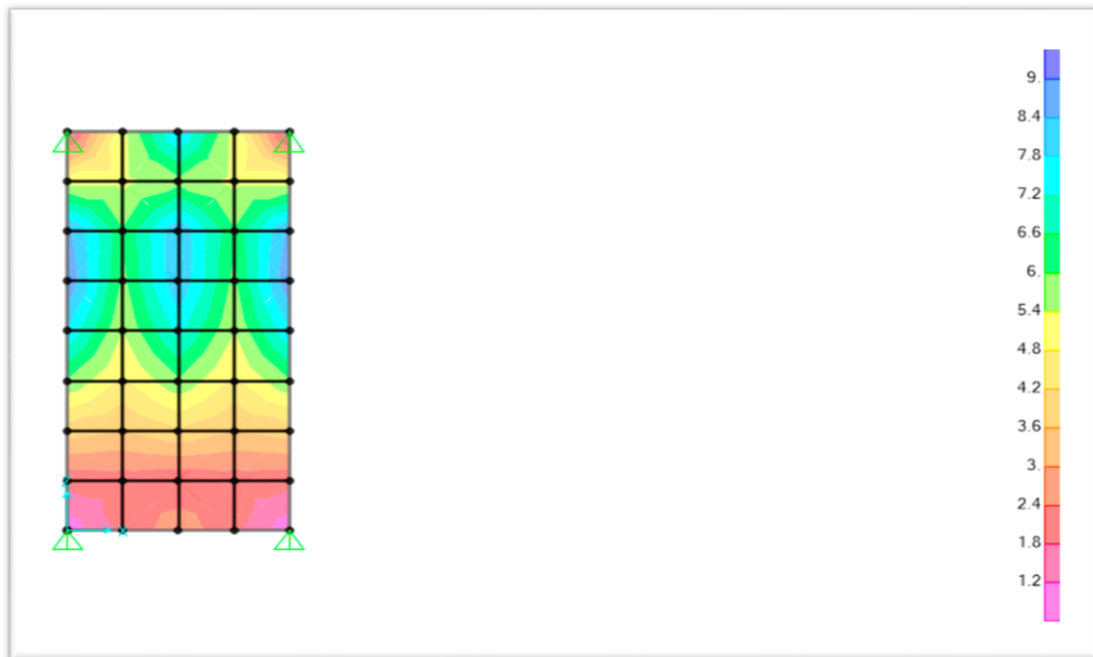


Ilustración 38. Esfuerzos UCR (Fuerza de sismo). Fuente: Propia

A continuación, se muestra la siguiente tabla de resultados donde se compara el esfuerzo del vidrio debido a presión de viento con el esfuerzo por la aplicación de la fuerza de sismo.

Tabla 33

Comparación de esfuerzos, modelo sin continuidad		
Edificación	Esfuerzos debido a fuerza de sismo kg/cm^2	Esfuerzos debido a presión de viento kg/cm^2
INS	9.37	9.08
UNA	11.6	11.53
UCR	9.65	39.78

Fuente: Propia

Revisión de esfuerzos, INS:

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 9.37 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 9.08 \rightarrow \text{Cumple}$$

Revisión de esfuerzos, UNA:

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 11.6 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 11.53 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

Revisión de esfuerzos, UCR:

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 9.65 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$815.77 \text{ kg/cm}^2 > 39.78 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \text{Cumple}$$

Conclusiones

- Carga de sismo (sismo de servicio)

La utilización de un sismo de servicio, es más adecuada para un sistema no estructural como el muro cortina, ya que la vida útil de un sistema de vidrios es menor que la de todo el sistema estructural del edificio, por esta razón, no se espera que tenga la misma capacidad de atenuación ante un sismo de gran tamaño, como es el caso de las estructuras de un edificio, sin embargo, se espera que el vidrio pueda resistir sismos moderados con una probabilidad de excedencia de 50% en 50 años con períodos de retorno de 72 años, es decir con mayores frecuencias que se pueda dar un sismo de mediana intensidad, lo descrito anterior corresponde a una construcción típica, es decir que no tipo esencial, en la cual se permiten daños moderados en el elemento no estructural.

El Código Sísmico de Costa Rica del año 1986, es una herramienta útil para cambiar las aceleraciones de acuerdo con el período de retorno, sin embargo, los diagramas de isoaceleraciones se encuentran obsoletos, no obstante, fue de utilidad para verificar los períodos de retorno en análisis y asignar que la estructura por utilizar es de tipo miscelánea y para sismo moderado.

- Desplazamientos y esfuerzos

Se logra comparar las cargas de viento con las de sismo, donde se comprueba que en ocasiones la carga crítica es la de sismo y no la de viento para los vidrios.

Se presentan dos condiciones de modelación, en primera instancia se tiene que vidrio se encuentra apoyado por un sistema de aluminio que le podría dar una condición de continuidad parcial, y el modelo 2 en el cual no hay continuidad y solo se modela el vidrio de todo el sistema muro corina más grande, sin embargo, esta teoría debe de respaldarse con muestras reales, por esta razón, se analiza el vidrio en sus dos condiciones y se presenta que el modelo crítico es el

modelo que designamos como 1, que tiene la condición de continuidad en cuanto a los parámetros dinámicos, así como también, en los esfuerzos y deformaciones.

En relación con los desplazamientos no cumplen en los vidrios de la Universidad Nacional con el modelo 1 (con continuidad), en donde el desplazamiento permisible es de 8mm y los datos arrojados para carga de sismo en dirección Y genera un desplazamiento de 15 mm y para la presión de viento en dirección X es de 10 mm, sin embargo, se encuentran entre el rango de desplazamiento esperado de 19 mm como máximo.

Acerca de los esfuerzos en condiciones de servicio, en el caso de la Universidad Nacional e Instituto Nacional de Seguros (uso de oficinas), se puede comprobar que la carga crítica es la de sismo y no la de viento, en el caso del edificio Universidad de Costa Rica según el artículo extraído del congreso de estructuras para el nuevo capítulo del Código Sísmico de Costa Rica, genera un cuadro donde se expresa los periodos de retorno en comparación con el tipo de edificación y como es una estructura para actividades educativas para carga de viento no se puede hacer sismo de servicio, por esta razón, la carga de viento rige como crítica y es mayor a pesar de que no es el edificio con mayor altura, adicionalmente para este edificio, se estimó la presión de viento mayor. Revisando los contornos de esfuerzos en los elementos finitos el sistema muro cortina no tiene accesorios en el vidrio que puedan generar concentraciones de esfuerzos, más bien, la distribución de los esfuerzos sobre el vidrio no se concentra y se distribuye, por esta razón los esfuerzos son menores.

- Análisis dinámico

El período está en función de la rigidez del elemento (dependiente del módulo de elasticidad e inercia) y la masa donde esté colocada, así como, su capacidad de atenuación o amortiguamiento que pueda tener la estructura y la afectación de los edificios con sus componentes estructurales (vigas, columnas, muros, entre otros) ante las aceleraciones del suelo se ven afectadas según su tamaño.

En cuanto al sistema de un edificio se comporta como una sola masa por esta razón en edificios de mayor tamaño se obtiene el mayor periodo de vibración del edificio y decrece para los edificios de pequeña y mediana intensidad, con rangos de 0.24-1.92, mientras que, para los sistemas muro cortina se puede comprobar que su respuesta es propia, es decir, al dividir los vidrios en muchas cantidades y reforzarlo con aluminio haciendo un mallado, incide en su respuesta y no tiene que ver el tamaño total del sistema de ventanas por esta razón los periodos no decrecen como en el caso de los edificios, más bien está relacionado con cada ancho, altura y espesor de cada elemento, para el modelo 1 se obtiene rangos de 0.14-0.21, en cuanto al modelo 2 los valores son muy similares y rondan entre 0.06-0.07.

En cuanto a la revisión de las frecuencias del edificio frente a las del muro cortina se comprueba por medio del factor de mayoración que no entran en resonancia, sin embargo, en el caso de que se empiecen a parecer, se puede cambiar la frecuencia de los vidrios por medio de los tamaños de la ventana en términos de rigidez y masa.

Para la amortiguación viscosa de cada vidrio en particular se puede comprobar mediante la toma de las muestras de los cristales de la cuadrícula del muro cortina más grandes, que es menor al 5% que genera el Código Sísmico de Costa Rica, los datos arrojan para la muestra tomada en el Instituto Nacional de Seguros tiene un amortiguamiento de 1%, para la Universidad Nacional, 3.68% (tiene mayor amortiguación por motivo que el largo es el menor de todas las muestras y por ende tiene mayor rigidez) y la Universidad Latina de Costa Rica 0.63%.

Recomendaciones

- Carga de sismo

Se recomienda la validación de una comisión técnica en el país, para cambiar las sacudidas sísmicas en componentes no estructurales como el vidrio, delimitando los niveles de desempeño acorde a los mismos.

- Carga de viento

Se utilizó la metodología en la introducción al nuevo capítulo de viento del CSCR-2010, en donde, se presenta la salvedad de que no se tiene con las velocidades de viento en Limón, en esta zona se presenta una condición atípica de probabilidad de huracán, por lo que se recomienda el estudio para de todo el sistema de ventanería para una condición de huracán.

- Metodología de modelaje

Se recomienda realizar pruebas de laboratorio, para verificar el análisis dinámico, puesto que, como se ha mostrado en la presente tesis, los factores de amortiguamiento para el caso del vidrio pueden ser menores al 5% estipulado en el CSCR-2010, y es necesario modificar este para la construcción de los espectros el verdadero amortiguamiento que tiene la estructura. Adicionalmente, se propone la verificación de un modelo de sistema con continuidad y otro sin continuidad para verificar la conducta de la unión del vidrio con el aluminio.

- Muro cortina

Se recomienda analizar las variaciones, que puede la colocación del aluminio en sistemas muro cortina con silicón estructural, muro cortina con tapa y el sistema mixto, con respecto a las deformaciones y esfuerzos, así como también revisar por medio de pruebas de laboratorio si la estructura muro cortina presenta continuidad.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez, M. Q. (2018).
- Arbós, F. (s.f.). *El Vidrio en la ingeniería Estructural*.
- Arias, R. D. (2016). *Diseño e implementación de un programa para el cálculo de acciones climáticas de viento y de nieve sobre edificios según el CTE-SE-AE y el EC-1*.
- ASCE 7-16. (2016). *Minimum Desing Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* . California .
- Bazán, E., & Meli, R. (s.f). *Diseño Sísmico de Edificios*. Limusa.
- Castillo, A. L. (sf).
- CFIA. (1986). *Código Sísmico de Costa Rica 1986*.
- CFIA. (2014). *Codígo Sísmico de Costa Rica*. San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- CFIA. (2016). *Guía de normativa y consideraciones aplicadas a la construcción*.
- Chacón, G. (Noviembre de 2018). Definición de Fuerza Sísmica. (M. P. Castillo, Entrevistador)
- Clastle, T., Ficcadenti , W., & Walnul, C. (s.f.). *Desingning with glass aluminum and stainless steel*.
- Contreras, G. D. (2011). *Dinámica Estructural*.
- Copra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana .
- Corporación de desarrollo Tecnológico . (2006). *Recomendaciones Técnicas para Muro Cortinas* . Chile: Trama Impresores S.A .
- Din 18008-1. (2010). *Glas im Bouwesen-und Konstruktionsregeln*.
- Dunham, M. (s.f.). *Glass performance days 2017*.
- Extralum. (2009).
- Extralum. (2019).

- FEMA. (2011). *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide*. Washington.
- Froling, M. (2013). *Strength desing methods for glass structure*. Copyrighth.
- García, L. E. (1998). *Dinamica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá.
- Graham Coult, P. (2010). Damping of glass structures and components . *Conference on Architectural and Structural Aplication of Glass*, (pág. 10). Londres .
- Hibbeler, R. (2004). *Mecánica Vectorial para ingenieros dinámica*. (pág. 712). Person Educación de México.
- INS. (s.f.).
- McCormac, J., & Csernak, S. (s.f.). *Diseño de estructuras de acero*. México : Alfaomega.
- Paz, M. (1991). *Dinámica estructural*.
- prEN 13474-3. (2009). *Glass in building-Determination of strength of glass panes-Part: 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing* .
- Ramírez, C. (2006). *Muro cortinas desafíos en el aire*.
- Salas, B. M. (2017). Indroducción al nuevo Capítulo de viento del CSCR . *Congreso de Estructuras 2017*, (pág. 26). San José.
- Sanz, M. E. (2018). *Actualización de elemntos finitos para placas de vidrio sometidas a impacto humano*.
- SEOC. (1995). *Sociedad de Ingenieros Estructurales* . California .
- Ulate, N. S. (2010). *Comportamiento de sistemas de muro cortina ante cargas de viento en la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica* . Heredia.

Anexo A1. Fachada flotante

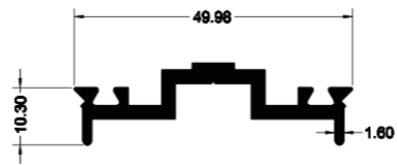
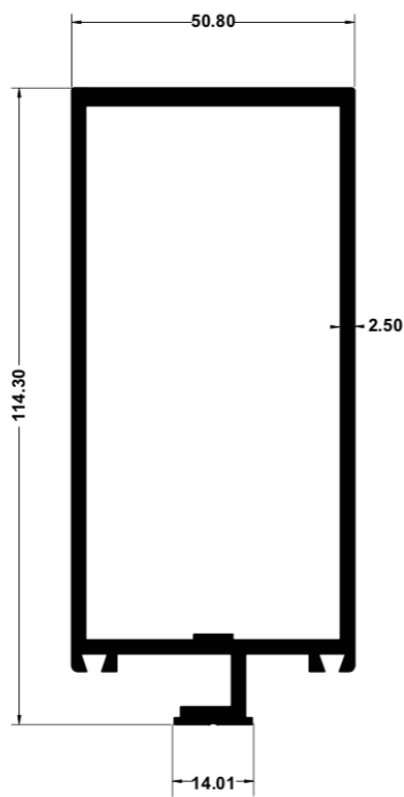


FACHADAS

FACHADA FLOTANTE

MARCO MURO CORTINA 101.60 mm

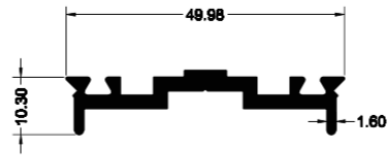
ENVIDRIADOR MURO CORTINA 10.00 mm



MC0454

PER. EXP.:	180.04 mm	7.093 pulg
PESO:	530.62 gr/m	0.356 lbs/pie

ENVIDRIADOR MURO CORTINA 6.00 mm



MC0450

PER. EXP.:	377.59 mm	14.877 pulg
PESO:	2348.57 gr/m	1.574 lbs/pie

MC0455

PER. EXP. .:	167.24 mm	6.589 pulg
PESO:	488.99 gr/m	0.328 lbs/pie

Anexo A2. Fachada flotante

FACHADAS



FACHADA FLOTANTE

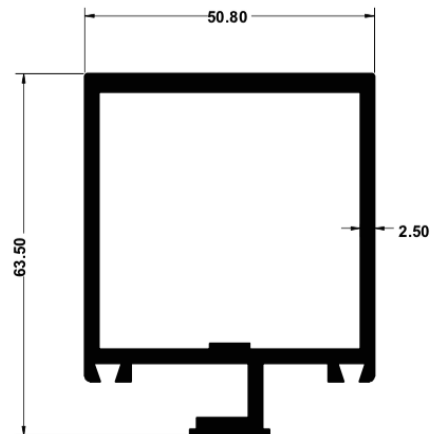
TAPA MURO CORTINA



MC0456

PER. EXP.:	172.03 mm	6.777 pulg
PESO:	364.33 gr/m	0.244 lbs/pie

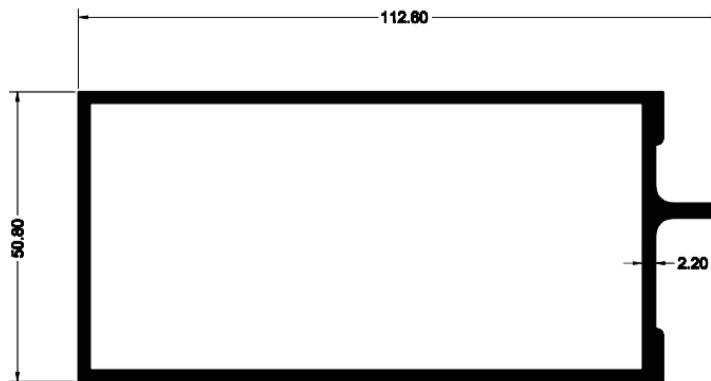
EXTENSION MULTIPLE



LH0469

PER. EXP.:	281.27 mm	11.082 pulg
PESO:	1659.85 gr/m	1.112 lbs/pie

HORIZONTAL F.F. SILICON ESTRUCTURAL



FF0741

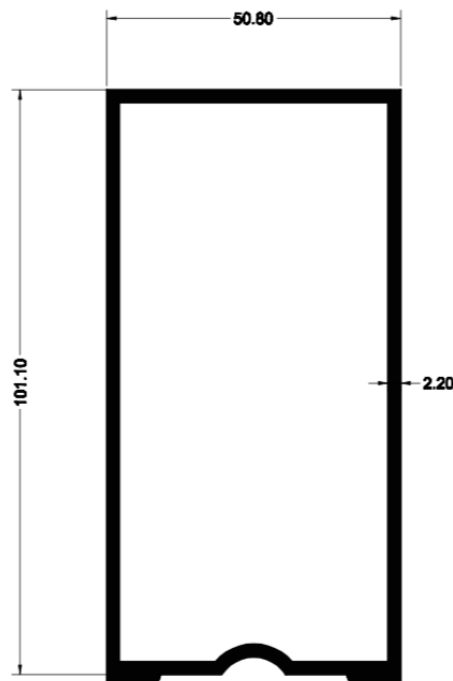
PER. EXP.:	328.97 mm	12.961 pulg
PESO:	1786.00 gr/m	1.197 lbs/pie

Anexo A3. Fachada flotante



FACHADAS

FACHADA FLOTANTE

VERTICAL FACHADA FLOTANTE
SILICON ESTRUCTURAL

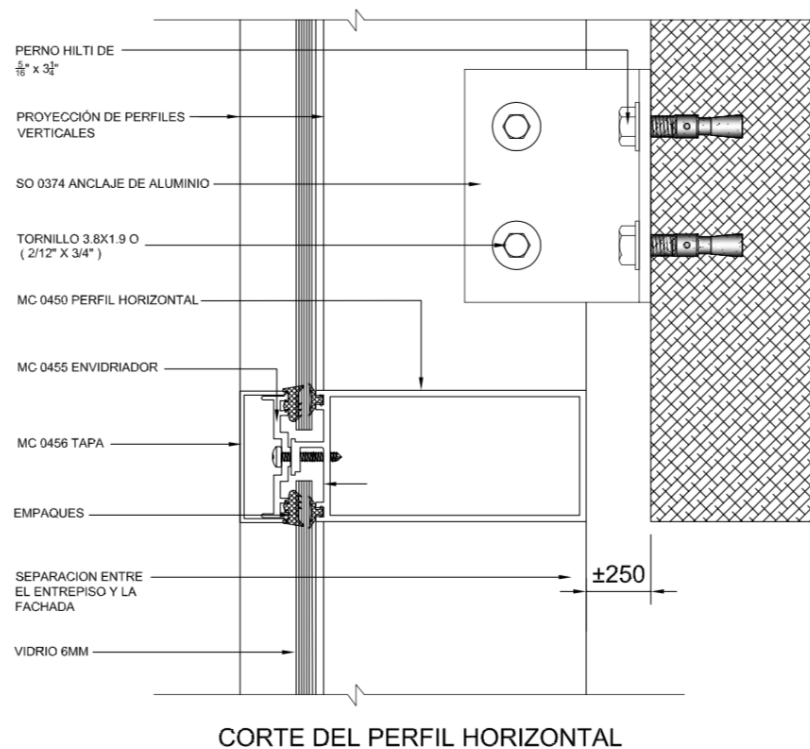
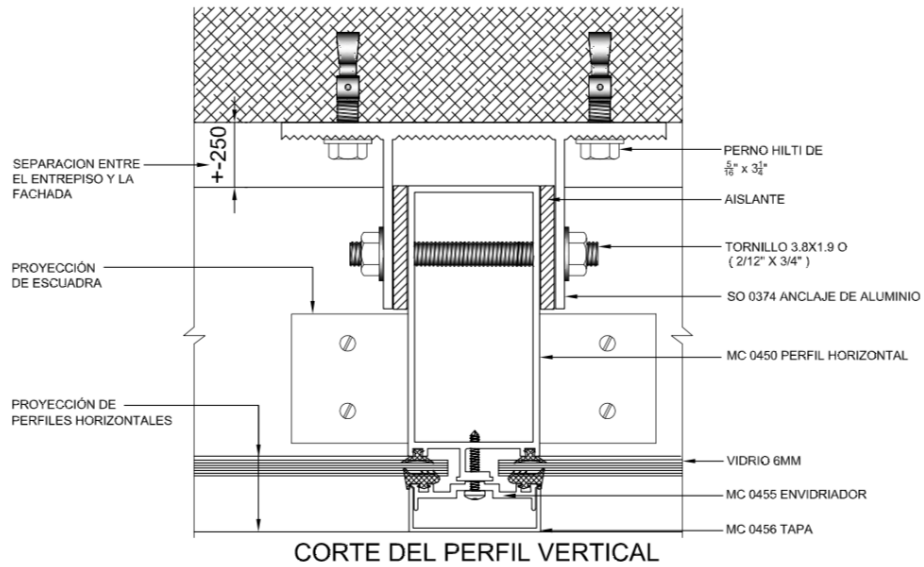
FF0742

PER. EXP.:	310.61 mm	12.228 pulg
PESO:	1841.15 gr/m	1.234 lbs/pie

Anexo B1. Muro cortina con tapa



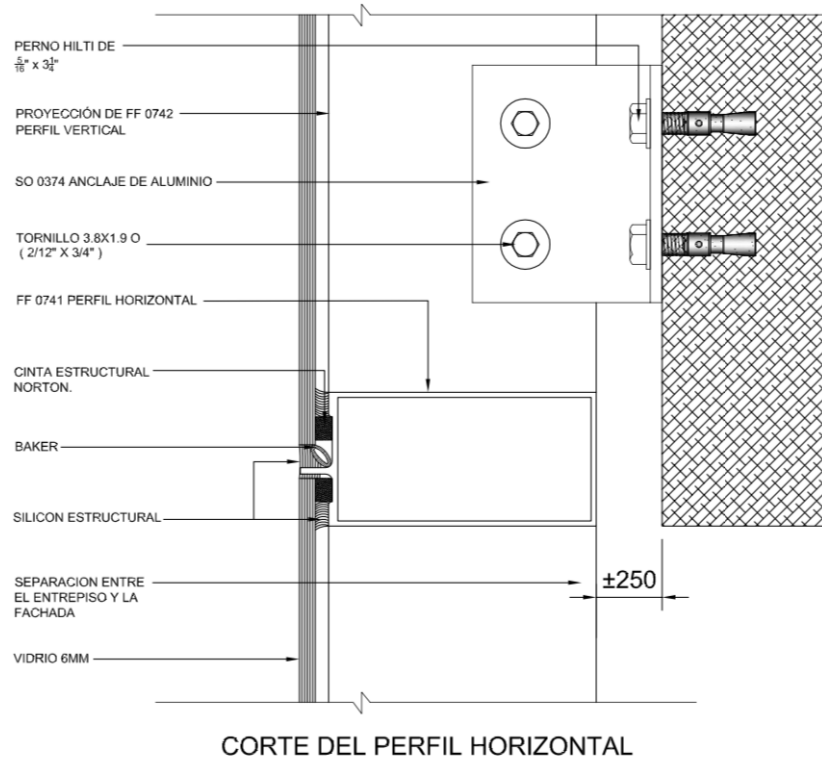
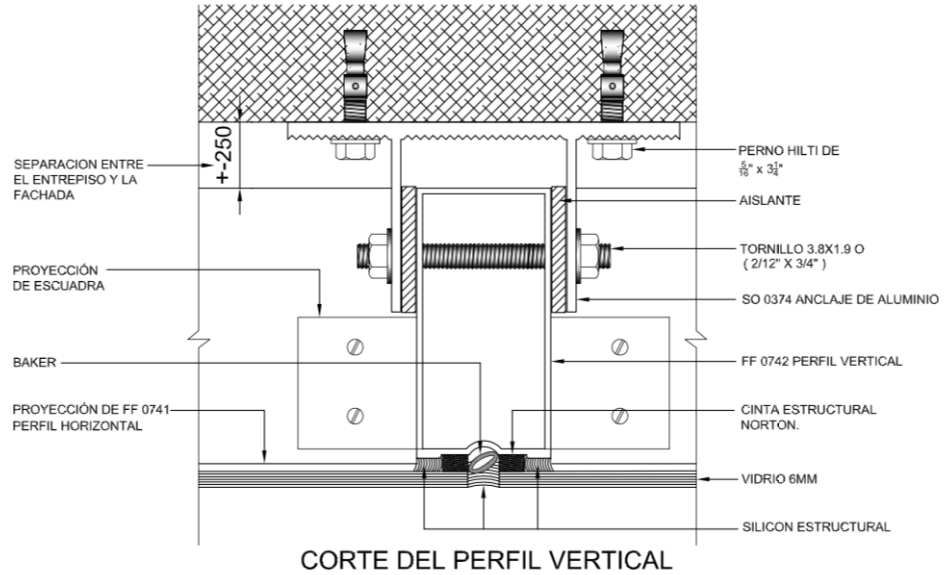
MURO CORTINA CON TAPA



Anexo B2. Muro cortina silicón estructural



MURO CORTINA, SILICÓN ESTRUCTURAL



Anexo C1. Generalidades



GENERALIDADES

DEFINICIONES

R.T.F.: Resistencia final a la Tracción

R.P.C.: Resistencia al punto cedente

R.C.O.: Resistencia al Corte o Esfuerzo Cortante

R.F.A.: Resistencia a la fatiga

Densidad del aluminio: 2.71 gr/cm³

Conductividad térmica:

6063 T5 = W/mk (121 Btu/ft²h²oF)

6005 T5 = W/mk (97 Btu/ft²h²oF)

Módulo de elasticidad:

6063 T5 Tensión = 68.30 Gpa

6063 T5 Corte = 28.50 Gpa

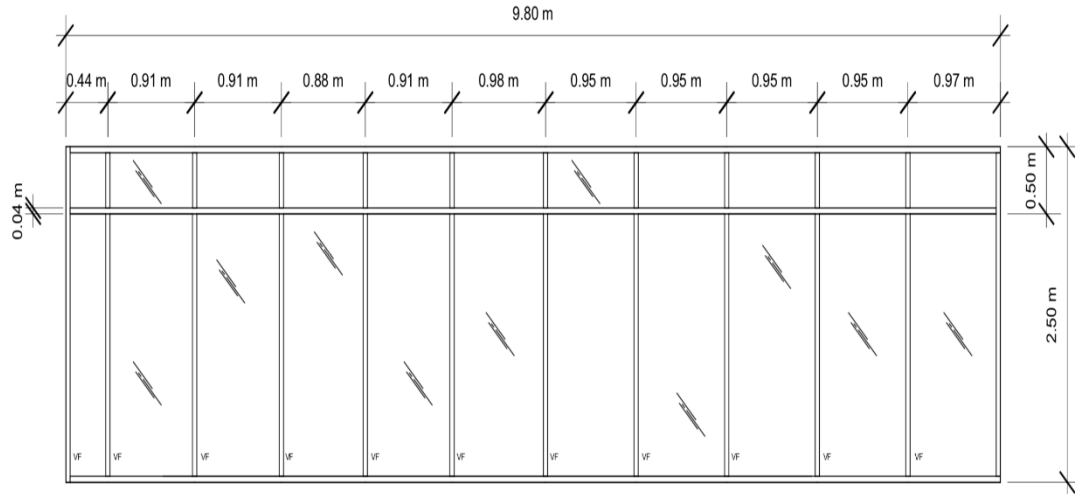
6063 T5 Compresión = 69.70 Gpa

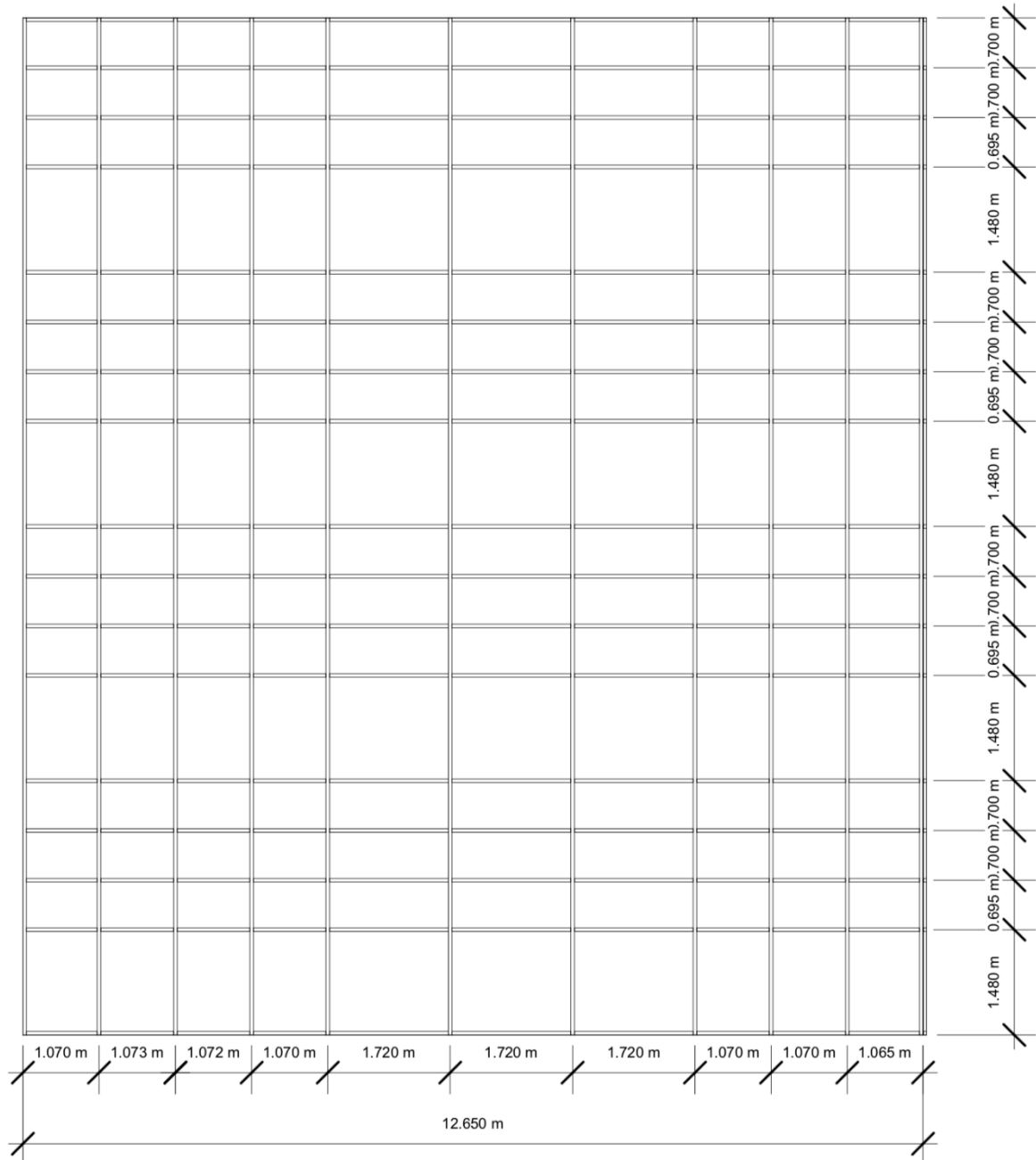
6005 T5 Tensión = 69.00 Gpa

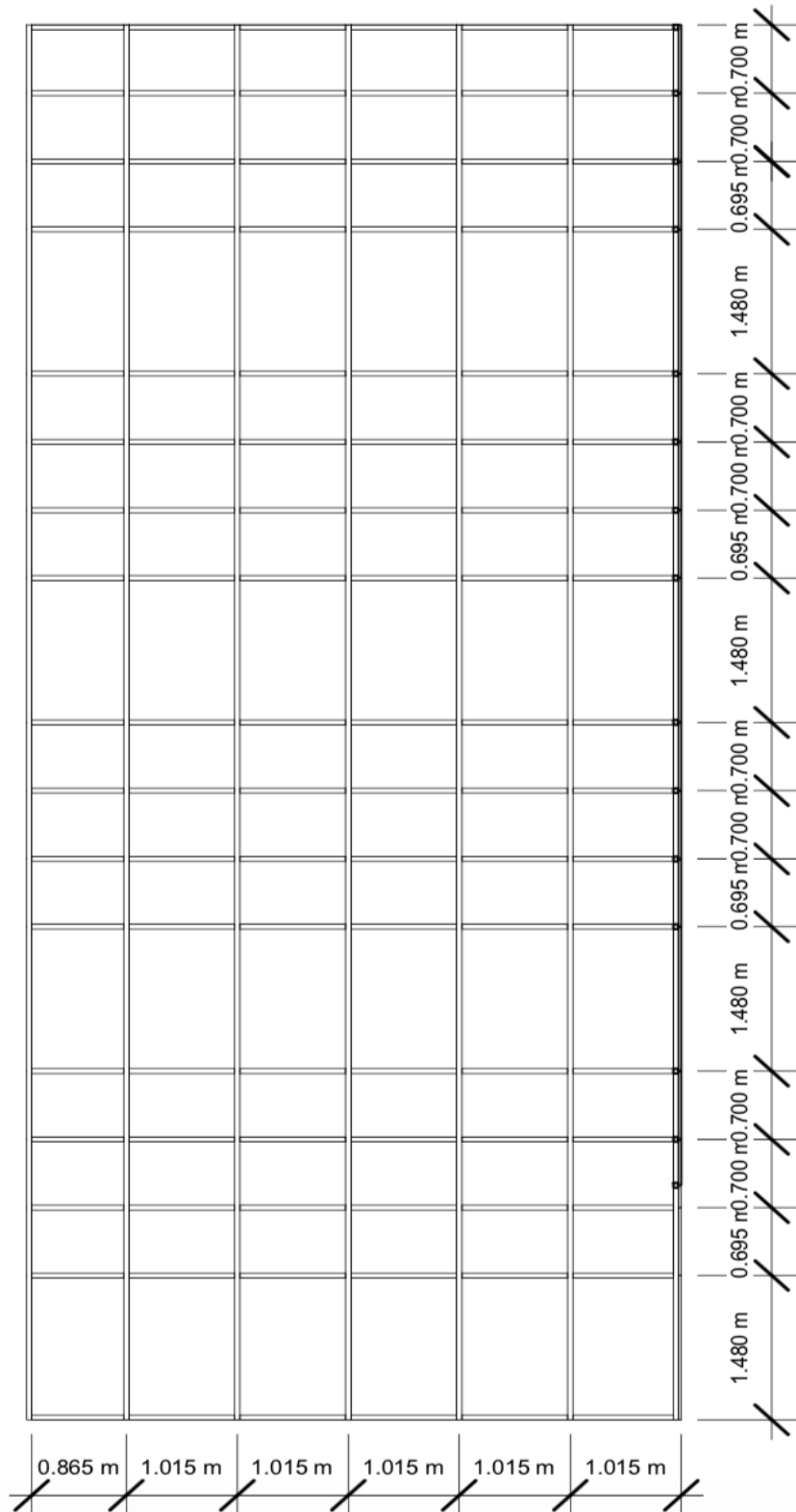
6005 T5 Corte = 25.40 Gpa

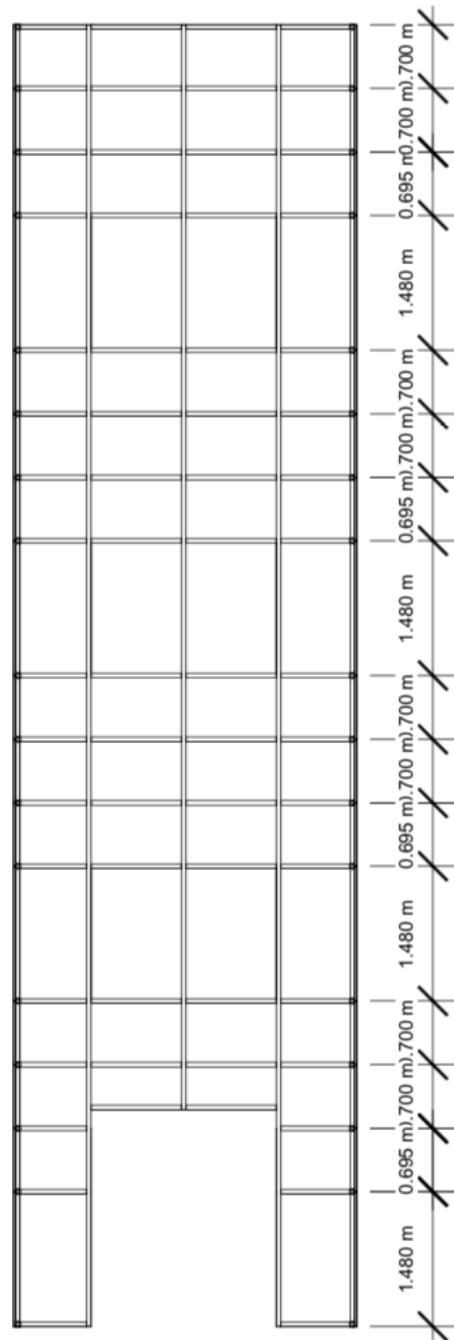
Nota :

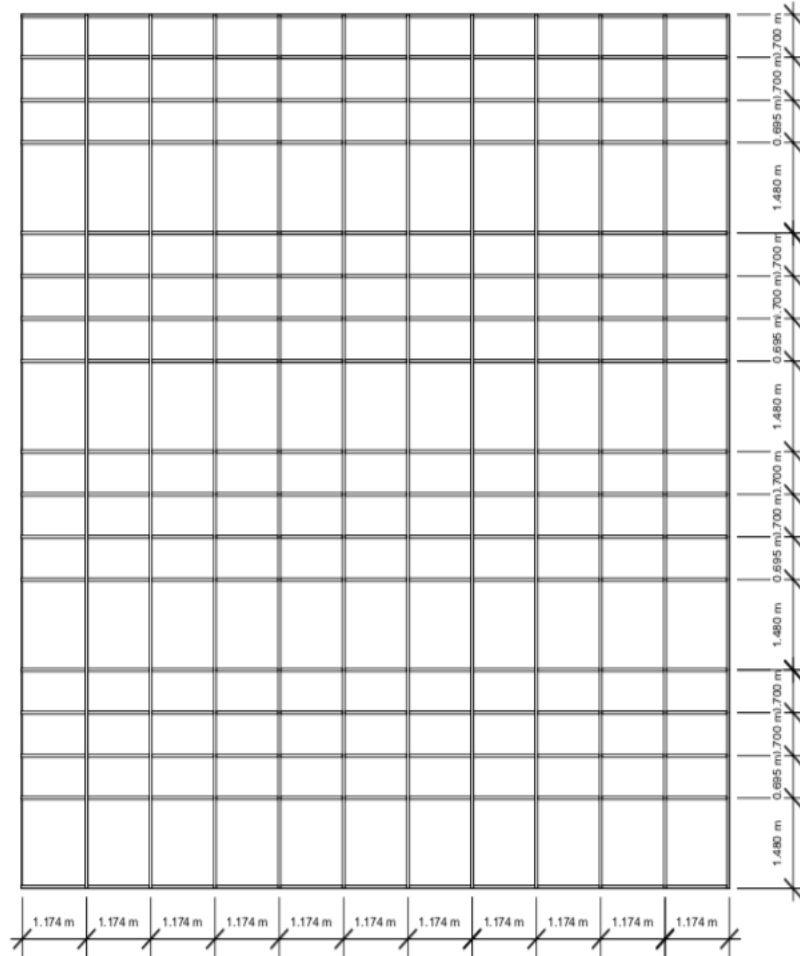
Para convertir Kg/mm² A KSI SE MULTIPLICA EL VALOR POR EL FACTOR 1.42.

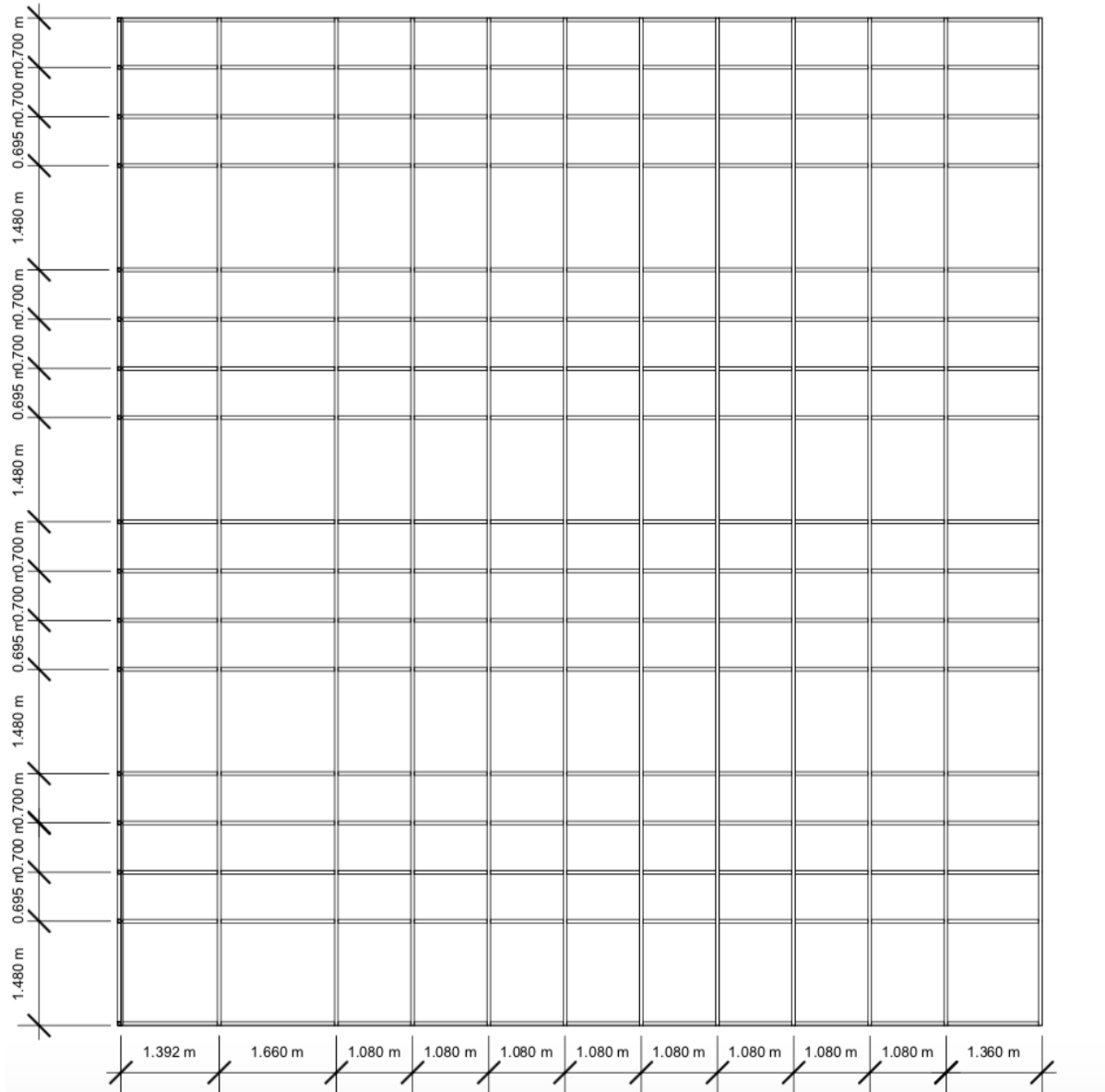
Anexo D1. Sistema de ventanas UCR

Anexo E1. Sistema de ventanas UNA (Fachada 1)

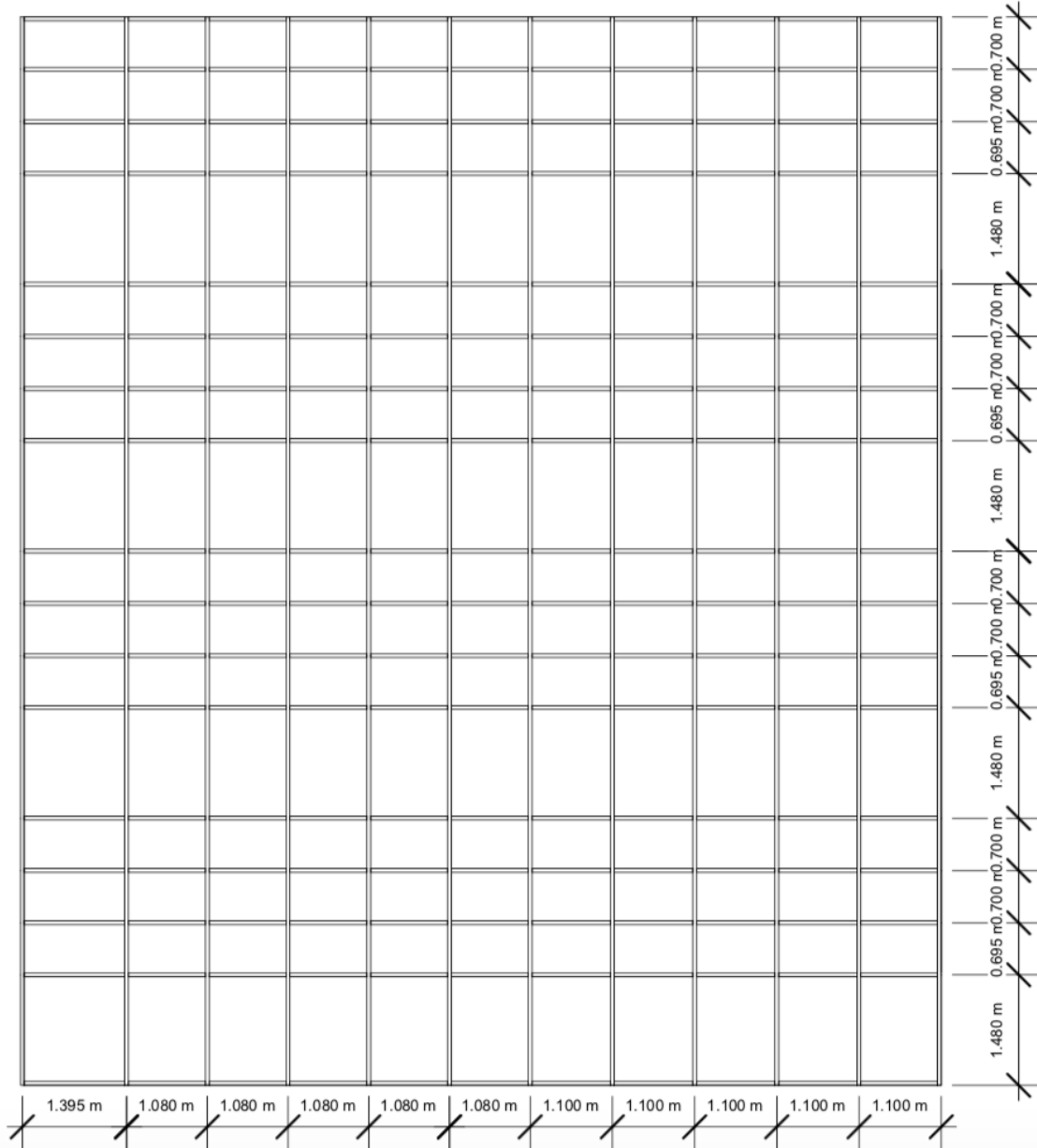
Anexo E2. Sistema de ventanas UNA (Fachada 2)

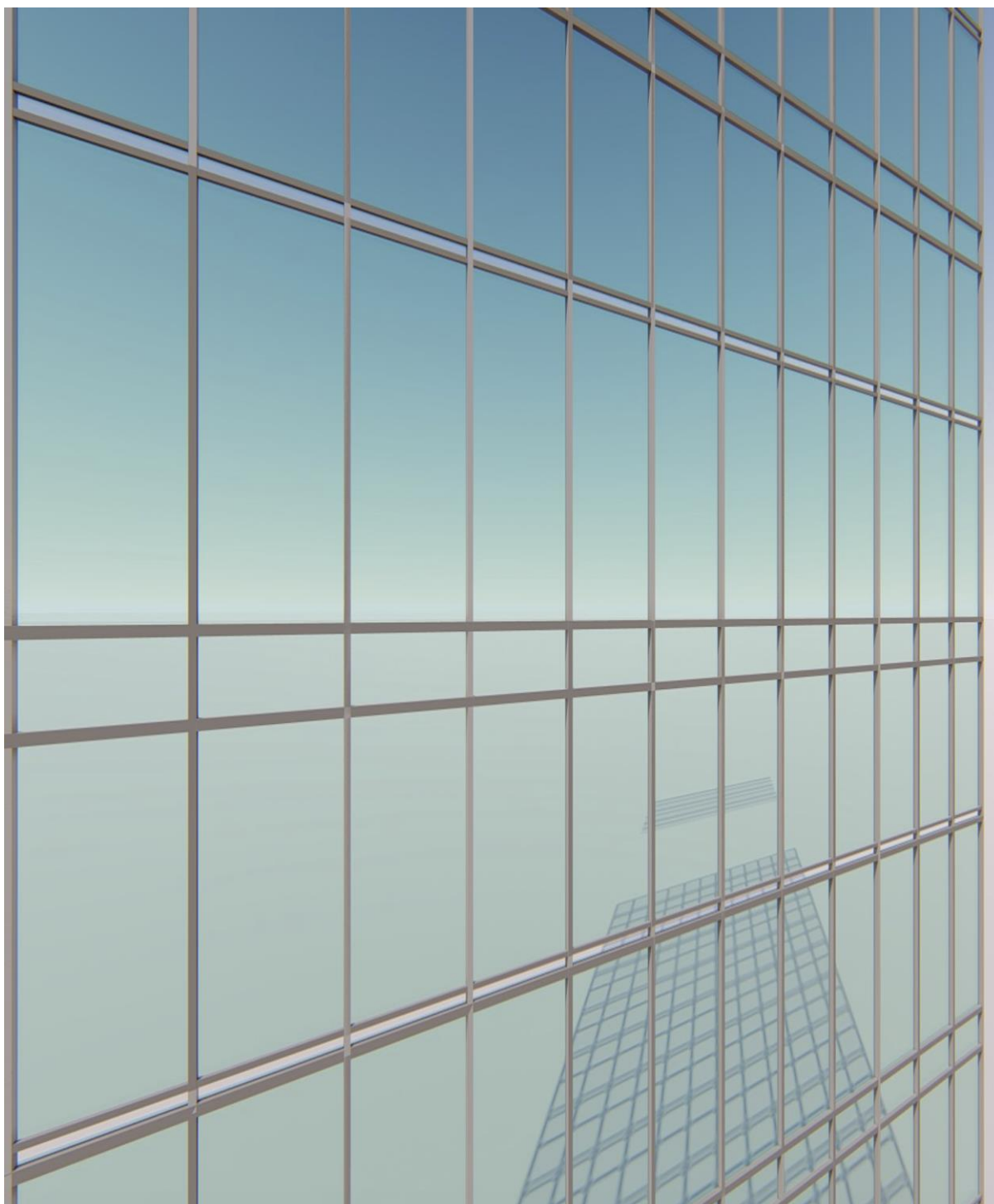
Anexo E3. Sistema de ventanas UNA (Fachada 3)

Anexo E4. Sistema de ventanas UNA (Fachada 4)

Anexo E5. Sistema de ventanas UNA (Fachada 5)

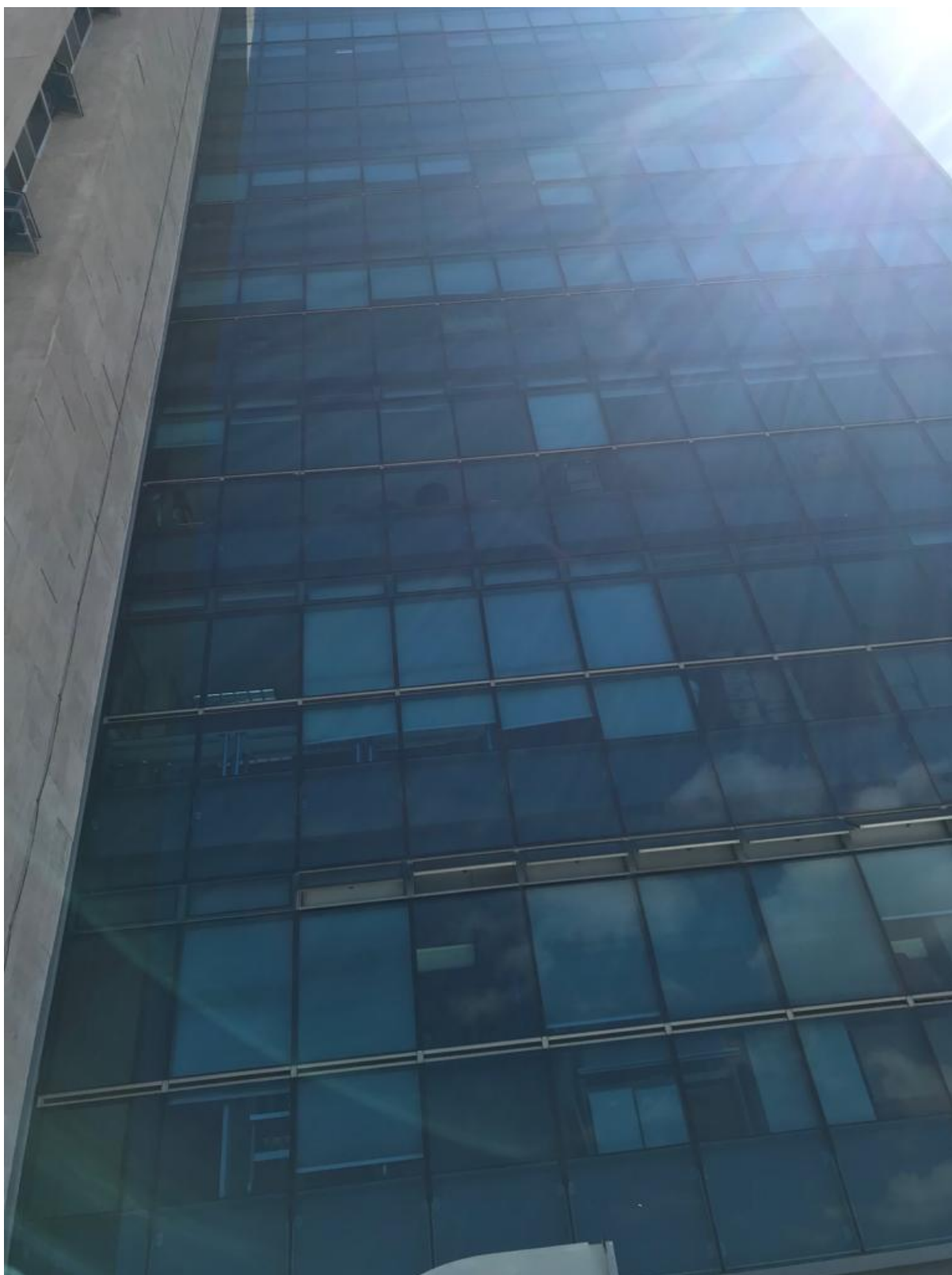
Anexo E6. Sistema de ventanas UNA (Fachada 6)



Anexo F2. Detalle de ventila INS

Anexo G1. Detalle de apoyos INS

Anexo G1. Detalle de apoyos UNA

Anexo H1. Edificación INS

Anexo H2. Edificación UNA



Anexo H3. Edificación UCR