

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL VIDRIO
ARQUITECTÓNICO A ESCALA NANOMÉTRICA Y
MACROMÉTRICA”**

POR:

ARQ. ADRIÁN ORTEGA GARCÍA

ASESORES:

**POR EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, EL
DR. ABEL HURTADO MACÍAS**

**POR LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA, EL
DR. ALBERTO DÍAZ DÍAZ**


**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

OCTUBRE 2021



Análisis de las Propiedades Mecánicas del Vidrio Arquitectónico a Escala Nanométrica y Macrométrica. Tesis presentada por Arq. Adrián Ortega García como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Estructuras, ha sido aprobada y aceptada por:



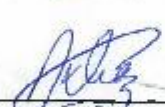
M.I. Javier González Canú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.A. María de Lourdes Flores Portillo
Coordinadora Académica



Dr. Alberto Díaz Díaz,
Director de Tesis

Comité:
M.E. Mirna Teresita Armondáriz Hernández,
Dr. Alejandro Calderón Landaverde.

Revisor Externo,
Dr. Alfredo Alan Rey Calderón.

Octubre 2021

Derechos Reservados

Adrián Ortega García
C. 5ª No. 1801 Col. Sta. Rosa. C.P. 31050
Chihuahua, Chih., Méx.

Octubre 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

19 de octubre de 2021.

ARQ. ADRIAN ORTEGA GARCIA

Presento.-

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Estructuras, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director Dr. **Alberto Díaz Díaz** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL VIDRIO ARQUITECTÓNICO A ESCALA NANOMÉTRICA Y MACROMÉTRICA"**.

Índice de Contenido

Dedicatoria
Agradecimientos
Índice de contenido
Índice de tablas
Índice de figuras

CAPÍTULO 1: Introducción

CAPÍTULO 2: Hipótesis

CAPÍTULO 3: Justificación

CAPÍTULO 4: Objetivos

- 4.1 Objetivo General
- 4.2 Objetivos Específicos

CAPÍTULO 5: Antecedentes

- 5.1 Descripción del proceso de producción de vidrio plano
- 5.2 Descripción del proceso de endurecimiento por templado

CAPÍTULO 6: Fundamentación Teórica

- 6.1 Fundamentos de los materiales cerámicos. Vidrio de silicato
- 6.2 Determinación de propiedades mecánicas mediante ensayos de tensión. Gráfica esfuerzo deformación
- 6.3 Caracterización de materiales por difracción de rayos X
- 6.4 Determinación de propiedades mecánicas para materiales frágiles mediante ensayos de flexión a tres puntos en elementos prismáticos.
- 6.5 ensayos de resistencia a la fractura en materiales cerámicos por el método de indentación de Vickers
- 6.6 Determinación de la dureza y módulo elástico mediante nano-indentación
- 6.7. conceptos básicos de dinámica estructural y método del elemento finito.
- 6.8 Método del elemento finito (MEF)

FACULTAD DE INGENIERÍA
Calle No 1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México, C.P. 31125
Tel. (51-) 442-95-50
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 7: Desarrollo de las pruebas mecánicas y resultados

- 7.1 Diseño y preparación de las muestras
- 7.2 Caracterización del material por difracción de rayos X
- 7.3 Pruebas de resistencia a la flexión en tres puntos
- 7.4 Pruebas de dureza mediante microindentación Método Vickers
- 7.5 Pruebas de resistencia a la fractura mediante nano indentación
- 7.6 Conclusión de los estudios mecánicos

Capítulo 8: Definición de un caso práctico de elementos estructurales de vidrio templado.

- 8.1 Definición de sistema estructural
- 8.2 Creación del modelo paramétrico en COMOSOL
- 8.3 Definición de las condiciones iniciales del modelo.
- 8.4 Definición de la acción de las cargas de viento

Capítulo 9: Estudios mecánicos del sistema estructural

- 9.1 Caso de estudio 01: Elementos de vidrio templado con 6mm de espesor
- 9.2 Caso de estudio 02: Elementos de vidrio templado con 12mm de espesor
- 9.3 Caso de estudio 03: Elementos de vidrio templado laminado con vidrio de 19mm de espesor
- 9.4 Conclusiones a la revisión del caso práctico
- 9.5 Visita al museo interactivo del acertijo de Gómez Palacio, Durango

Capítulo 10: Conclusiones generales

Bibliografía

ATENTAMENTE
"Naturam subleceat alius"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México, C.P. 31125
Tel. (614) 442-85-100
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

Debo aceptar que tras pensarlo por casi seis años, lo más correcto resulta ser el primer impulso, que es dedicarle todo este esfuerzo a mi familia, quienes son mi apoyo incondicional y mi fuerza para seguir presente. Y de manera especial a mi padre, quién puso en mí todo su amor por el conocimiento y esa perseverancia para aprender cosas nuevas cada día.

Agradecimientos

Sin duda alguna a mis asesores, por su confianza, por su paciencia (mucha, debo admitir) y por sus enseñanzas; Cada cuestionamiento, fue el motor para que lo que está aquí plasmado mejorará constantemente, y su persona no fue menos que un gran ejemplo al cual aspirar.

En segundo término al Centro de Investigación en Materiales Avanzados de la ciudad de Chihuahua, con el que he tenido contacto desde que en preparatoria me enseñaron “El Mundo de los Materiales” y sin quienes este trabajo de investigación no habría podido materializarse.

Y por último, a mis docentes de la Maestría en Ingeniería en Estructuras y a la Ing. Silvia Miramontes, quién me enseñó a apreciar tanto el aprendizaje de las estructuras.

Gracias, totales.



Índice de contenido

Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	viii
Índice de contenido.....	v
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. HIPÓTESIS.....	6
3. JUSTIFICACIÓN.....	6
4. OBJETIVOS.....	7
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	7
5. ANTECEDENTES.....	8
5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VIDRIO PLANO.....	9
5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENDURECIMIENTO POR TEMPLADO.....	11
6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	12
6.1 FUNDAMENTOS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS. VIDRIO DE SILICATO.....	12
6.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE ENSAYOS DE TENSIÓN. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN.....	13
6.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	14
6.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS PARA MATERIALES FRÁGILES MEDIANTE ENSAYOS DE FLEXIÓN A TRES PUNTOS EN ELEMENTOS PRISMÁTICOS.....	15
6.5 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FRACTURA EN MATERIALES CERÁMICOS POR EL MÉTODO DE INDENTACIÓN DE VICKERS.....	18
6.6 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y MÓDULO ELÁSTICO MEDIANTE NANO-INDENTACIÓN.....	20
6.7 CONCEPTOS BÁSICOS DE DINÁMICA ESTRUCTURAL Y MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO.....	24
6.7.1 ECUACIONES DE MOVIMIENTO PARA SISTEMAS SIMPLES, MÚLTIPLES Y CONTINUOS.....	25
6.8 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF).....	29
7. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS Y RESULTADOS.....	30
7.1 DISEÑO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	30
7.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	32
7.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.....	33
7.4 PRUEBAS DE DUREZA MEDIANTE MICRO INDENTACIÓN. MÉTODO VICKERS.....	43
7.5 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FRACTURA MEDIANTE NANO INDENTACIÓN.....	49
7.6 CONCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS MECÁNICOS.....	55
8. DEFINICIÓN DE UN CASO PRÁCTICO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE VIDRIO TEMPLADO.....	56
8.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	56
8.2 CREACIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO EN COMSOL.....	59
8.3 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES DEL MODELO.....	61
8.4 DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN DE LAS CARGAS DE VIENTO.....	62
9. ESTUDIOS MECÁNICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	63
9.1 CASO DE ESTUDIO 01: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO CON 6 mm DE ESPESOR.....	63
9.1.1 ESTUDIO ESTÁTICO.....	63
9.2 CASO DE ESTUDIO 02: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO CON 12 mm DE ESPESOR.....	67
9.2.1 ESTUDIO ESTÁTICO.....	67
9.3 CASO DE ESTUDIO 03: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO LAMINADO CON VIDRIO DE 19 mm DE ESPESOR.....	70
9.3.1 ESTUDIO ESTÁTICO.....	70
9.3.2 ESTUDIO DINÁMICO.....	80
9.4 CONCLUSIONES A LA REVISIÓN DEL CASO PRÁCTICO.....	84
9.5 VISITA AL MUSEO INTERACTIVO EL ACERTIJO EN GÓMEZ PALACIO, DURANGO.....	85
10. CONCLUSIONES GENERALES.....	87
REFERENCIAS.....	88
CURRICULUM VITAE.....	89



Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados de composición química para las muestras mediante difracción de rayos X.	32
Tabla 2. Categorización de las muestras a someterse a prueba de flexión a tres puntos.	33
Tabla 3. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de vidrio estándar (S) para cada espesor estudiado.	36
Tabla 4. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de vidrio templado.	39
Tabla 5. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de mica protectora.	42
Tabla 6. Dimensiones diagonales en huellas de indentación y cálculo de dureza para vidrio arquitectónico recocido y templado.	44
Tabla 7. Dimensiones diagonales en huellas de indentación y cálculo de dureza para vidrio con aluminosilicatos utilizado como mica protectora de teléfonos celulares.	45
Tabla 8. Dimensiones de fracturas radiales de indentación y cálculo de fractura promedio para vidrio arquitectónico recocido y templado con una carga de 1 Kgf	46
Tabla 9. Dimensiones de fracturas radiales de indentación y cálculo de fractura promedio para mica protectora de teléfono celular con una carga de 0.5 Kgf y 0.25 Kgf respectivamente.	47
Tabla 10. Valores de resistencia a la fractura (K_{ifr}) calculados para cada indentación en muestras de vidrio arquitectónico y promedios, evaluados según metodología de tres normas distintas que utilizan el método Vickers.	48
Tabla 11. Valores de resistencia a la fractura (K_{ifr}) calculados para cada indentación en muestras de mica y {promedios, evaluados según metodología de tres normas distintas que utilizan el método Vickers.	48
Tabla 12. Tabla de datos del Nanoindentador obtenidos durante el proceso de carga en la muestra de Vidrio Estándar (S).	50
Tabla 13. Tabla de datos del Nanoindentador obtenidos durante el proceso de descarga en la muestra de Vidrio Estándar (S). Se realiza el cálculo de la pendiente en el periodo aprox. de 20 % tras iniciar la descarga.	51
Tabla 14. Resultados para modulo elástico y dureza obtenidos de las nano indentaciones de 2.5 mN realizadas en vidrio arquitectónico estándar (S) y templado (T) por el nano indentador modelo G200 de Agilent Technologie. .	53
Tabla 15. Resultados para módulo elástico y dureza obtenidos de las nano indentaciones de 0.05 mN realizadas en la mica protectora para teléfono celular por el nano indentador modelo G200 de Agilent Technologies	54
Tabla 16. Resultados de las pruebas para los tres materiales estudiados a diferentes escalas mecánicas. Además se incluye los valores del Borosilicato y el Acero como referencia.	55
Tabla 17. Parámetros utilizados para construir el modelo paramétrico en COMSOL Multiphysics.	59
Tabla 18. Límites permitidos de deflexión para acristalamiento continuo del Código Nacional Alemán. (NAVARRO, 2011) (p. 25)	64

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de fabricación de vidrio plano Colburn – Libbey -Owens. (1) Flujo de vidrio, (2) Rodillo plegador, (3) Rodillos portadores, (4) Refrigeradores, (5) Moletas.....	9
Figura 2. Proceso de fabricación de vidrio plano de la patente Pilkinton Brothers (PB).	10
Figura 3. Proceso de fabricación de vidrio plano de la patente Pittsburg Plate Glass Company (PPG).....	10
Figura 4. Esquema de un horno templado térmico de vidrio plano. Se divide en cuatro partes: Carga de vidrio, horno de calentamiento, zona de templado y zona de descarga.	11
Figura 5. En el vidrio, el silicio comparte electrones con cuatro átomos de oxígeno dando así un total de ocho electrones para cada átomo de silicio. Sin embargo, el oxígeno tiene una valencia de seis y comparte electrones con dos átomos de silicio solamente. (ASKELAND, 1998).....	12
Figura 6. Curva esfuerzo – deformación típica	13
Figura 7. Se observa un difractograma típico. Las intensidades se toman como alturas de los picos o para trabajos más precisos las áreas. Al pico más intenso se le asigna un valor de 100 y el resto se escala con respecto a este. (PÉREZ, s.f.)	14
Figura 8. Diagrama para prueba de flexión a tres puntos.	16
Figura 9. La figura muestra una curva típica de carga-desplazamiento y el patrón de deformaciones de una muestra elasto-plástica durante y después de la indentación.	20
Figura 10. Conceptos usados para comprender el área efectiva bajo el indentador	21
Figura 11. Funciones de área calibradas para tres tipos de indentador. A pesar de que el área ideal $A = 24.5 d^2$ es utilizada en todos los casos, existen diferencias notables debido al grado de redondez de la punta.	22
Figura 12. Importancia de la masa en la respuesta de una estructura ante una carga dinámica.....	24
Figura 13. Modelo de un grado de libertad sin amortiguamiento.....	26
Figura 14. Modelo de dos grados de libertad sin amortiguamiento.....	27
Figura 15. Ejemplo de mallado a diferente nivel de detalle (Coarse, Fine y Extra fine en COMSOL Multiphysics) de un volumen rectangular.	29
Figura 16. Esquema de colocación de las etiquetas para las probetas de vidrio a someterse a falla por flexión.	30
Figura 17. Imágenes del proceso de corte. A la izquierda se corta una pieza de vidrio de manera manual, debido a las dimensiones de la probeta utilizada como base. A la derecha la máquina de corte utilizada.	30
Figura 18. Imágenes de las muestras extraídas de cada probeta de izquierda a derecha el vidrio estándar (S), el vidrio templado (T) y la mica protectora (M).	31
Figura 19. Equipo y herramientas utilizadas en el proceso de limpieza de las piezas. A la izquierda equipo de laboratorio y solventes. A la derecha máquina de ultrasonido Branson 2510 frecuencia de 40 Hz.	31
Figura 20. Difractograma de las piezas de vidrio estudiadas. Las muestras estándar (S) y templada (T) se observan próximas entre sí, al ser el mismo material el que las conforma. La mica (M) se despega de ambas suponiendo diferencias en su composición presentando una variación considerable en el porcentaje de en la muestra.	32
Figura 21. Paquetes de probetas de vidrio. A la izquierda vidrio estándar en tres espesores distintos (6, 10 y 12 mm.) A la izquierda vidrio templado en los mismos espesores.	33
Figura 22. Probetas de mica protectora para Celular utilizadas en la prueba a flexión en tres puntos.	34
Figura 23. Imagen donde se muestra una probeta de vidrio estándar sobre los apoyos de la máquina de pruebas. Se aprecia el perfil circular colocado en el punto de aplicación de la carga para distribuir la fuerza uniformemente.....	35
Figura 24. Imágenes que muestran patrones de falla de los materiales utilizados. A la izquierda vidrio estándar. A la derecha vidrio templado.	35
Figura 25. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 6 mm de espesor.	37
Figura 26. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 10 mm de espesor.	37
Figura 27. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 12 mm de espesor.	38
Figura 28. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 6 mm de espesor.	39

Figura 29. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 10 mm de espesor.	40
Figura 30. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 12 mm de espesor.	40
Figura 31. Arriba, Gráfica donde se compara el Esfuerzo Límite promedio para todas las clases de vidrio ensayado. Abajo, Gráfica donde se compara el módulo elástico para el conjunto de pruebas realizado en las dos variedades de vidrio arquitectónico.	41
Figura 32. A la derecha proceso de prueba de Flexión a tres puntos de la mica protectora para celular. A la izquierda, pieza de mica después de la falla provocada por el ensayo de flexión a tres puntos.	42
Figura 33. Esquema de una huella dejada por la indentación de una punta piramidal Berkovich.	43
Figura 34. Indentaciones realizadas utilizando un micro durómetro con una punta piramidal. Se observa la huella dejada por el indentador y grietas que crecen radialmente desde el centro.	44
Figura 35. Indentación de 1 Kgf sobre una mica protectora de celular. Se observa el gran daño que causa esta carga sobre el material lo que no permite obtener dimensiones claras de falla.	45
Figura 36. Matriz de indentaciones sobre una de las muestras. Las indentaciones se realizan a una distancia de 3 μm entre sí. La escala indica la profundidad de la huella en μm	49
Figura 37. Gráfica Carga – Descarga, para la Nanoindentación 001 realizada en la muestra de Vidrio Estándar (S).	52
Figura 38. Etapas de construcción del cubo de vidrio ubicado en el Museo el Acertijo de la ciudad de Gómez Palacio Durango.	56
Figura 39. Esquema de distribución de los elementos principales de vidrio templado del arreglo a analizar.	56
Figura 40. Esquema de conexión viga-placa en la cubierta horizontal del cubo de vidrio.	57
Figura 41. Esquema de conexión de los extremos de dos vigas secundarias con los extremos de dos vigas principales mediante herrajes de aluminio tipo ángulo.	57
Figura 42. Esquema de conexión de los extremos de dos vigas secundarias al centro de una viga principal mediante herrajes de aluminio tipo ángulo.	57
Figura 43. Esquema de la conexión entre piezas verticales del elemento costilla mediante herrajes rectos de aluminio.	58
Figura 44. Esquema de la conexión de la pieza superior del elemento costilla con elemento tipo viga mediante herrajes rectos de aluminio.	58
Figura 45. Esquema de conexión para la pieza inferior del elemento costilla al firme de la estructura mediante ángulos de aluminio.	58
Figura 46. Imágenes que muestran los pasos en el proceso de modelado del cubo utilizando los parámetros antes descritos como generadores.	60
Figura 47. Cubos generados mediante el conjunto de parámetros antes descritos modificando la cantidad de paneles por lado en 2, 4 y 8.	60
Figura 48. En azul se observan los bordes definidos como fijos (FixedConstraint) dentro de la estructura. Estos bordes están en contacto con otros elementos de la estructura que impiden sus desplazamientos y rotaciones.	61
Figura 49. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera el peso propio de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	64
Figura 50. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera el peso propio de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	65
Figura 51. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y carga de viento de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	66
Figura 52. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y carga de viento de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	67
Figura 53. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics). ...	68
Figura 54. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	68



Figura 55. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	69
Figura 56. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	70
Figura 57. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una carga muerta de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	71
Figura 58. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una carga muerta de un Sistema con vidrio templado y vidrio laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	72
Figura 59. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	73
Figura 60. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	74
Figura 61. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	75
Figura 62. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).	76
Figura 63. Sistema con costilla horizontal en sus caras verticales. Se agrega este elemento con el fin de rigidizar las costillas verticales y disminuir sus deformaciones.	77
Figura 64. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	78
Figura 65. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado. (Generado en COMSOL Multiphysics).....	79
Figura 66. Primer modo de vibración del sistema rigidizado K01 asociado a la frecuencia propia de 14.03 Hz, (Generado en COMSOL Multiphysics).....	80
Figura 67. Segundo modo de vibración del sistema rigidizado K01 asociado a la frecuencia de 20.04 Hz, (Generado en COMSOL Multiphysics).....	80
Figura 68. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado (K02) (Generado en COMSOL Multiphysics).....	81
Figura 69. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado (K02) (Generado en COMSOL Multiphysics).....	82
Figura 70. Primeros dos modos de vibración del sistema rigidizado K02, (Generado en COMSOL Multiphysics).....	83
Figura 71. Comparación entre el modelo final y el modelo existente en el Museo el Acertijo en la ciudad de Gómez Palacio Dgo.	84
Figura 72. Logotipo e Interior del Museo Interactivo el Acertijo, vista hacia el área del cubo de vidrio.	85
Figura 73. Herrajes de anclaje al firme de las costillas verticales, se aprecia la estructura secundaria de protección para los cantos del vidrio.	85
Figura 74. Vistas de las costillas verticales donde se observan los herrajes de unión entre placas y la sujeción a las caras del cubo.	86
Figura 75. Muestras del mal mantenimiento del espacio, reflejadas en la acumulación de suciedad en la cara superior del cubo.	86

1. INTRODUCCIÓN.

Es fácil comprender la forma en la que el vidrio se ha utilizado dentro de la historia de la arquitectura para mejorar la calidad del espacio habitable. Tan sólo basta tomar en cuenta sus cualidades físicas: un material sólido, translucido, que es maleable al someterse a altas temperaturas y que ofrece protección de la intemperie sin sacrificar la iluminación de los espacios cerrados, que ha acompañado al hombre en el desarrollo de la industria desde la antigüedad como un material de ornamentación, para la creación de piezas decorativas y que en el imperio romano consigue un lugar dentro del desarrollo de edificaciones. (ESPERÓN CÓRTEZ, 2000)

Continúa como un trabajo de gran destreza artesanal aún en la Francia del siglo XVII, donde se desarrolla uno de los primeros procesos para la creación de placas de vidrio, principalmente utilizado en la fabricación de espejos. El vidrio derretido era vaciado sobre una mesa y era rolado en frío. Después de enfriar se pulía con discos de acero y arenas, para luego ser pulido con felpa. El resultado era un vidrio plano con excelentes cualidades ópticas, sin embargo, aún a costo de grandes inversiones de tiempo y dinero. No fue sino hasta los últimos periodos de la revolución industrial que la importancia de realizar estudios acerca de la relación entre la composición del vidrio y sus cualidades físicas comenzó a surgir en la industria, y con ello, la búsqueda de nuevas técnicas de producción que hicieran más eficiente y accesible su fabricación. El proceso de flotado no fue desarrollado sino hasta después de la Segunda Guerra Mundial por la compañía británica Pilkington Brothers Ltd. e introducido en 1959 a la industria manufacturera. En esta patente el vidrio derretido es vaciado sobre una tina de estaño líquido, para posteriormente ser extendido, aplanado y transportado en una banda continua. De este procedimiento derivan los sistemas de fabricación vigentes hasta la actualidad. (GLASS ONLINE, 2011)

La necesidad de desarrollar un análisis detallado enfocado a las propiedades de un material pocas veces estudiado en los programas de diseño estructural, como es el caso de la Maestría en Ingeniería en Estructuras, surge de mi enfoque como arquitecto en utilizar el conocimiento obtenido como una fuente de innovación dentro del ejercicio arquitectónico. Para ello fue decisiva la experiencia de trabajar dentro de la industria del vidrio templado en conjunto con los conocimientos obtenidos dentro de la Facultad de Ingeniería, para advertir las posibilidades que este material tiene.

La presente tesis busca evaluar el comportamiento mecánico del vidrio templado, un material que tras su fabricación es sometido a un proceso de endurecimiento mediante un cambio controlado de temperatura que genera esfuerzos residuales dentro de la pieza, enfocándose en su uso como material arquitectónico. A pesar de que generalmente este material se estudia enfocándose a pruebas de falla por impacto o desgaste por fricción, en este trabajo se buscan evaluar sus propiedades mecánicas de Módulo Elástico y Esfuerzos Máximos a Tensión y Compresión, con el fin de conocer sus alcances y limitaciones en proyectos de construcción y evaluar mediante la teoría del Método de Elementos Finitos y los datos obtenidos un caso de estudio en el que el material funcione como parte de los elementos arquitectónicos principales sometidos a combinaciones de cargas comúnmente utilizadas en proyectos de edificación.

2. HIPÓTESIS.

Si bien, no se espera que el estudio del material dé posibilidades para que sea utilizado en elementos estructurales primarios, será posible justificar el uso de un espesor comercial de vidrio templado en elementos secundarios de estructuras o dentro de un elemento arquitectónico estable sin poner en riesgo la integridad de la estructura o al usuario.

3. JUSTIFICACIÓN.

El vidrio es un material que ejemplifica el desarrollo industrial del ser humano debido a que sus técnicas de producción van a la par con éste, desde los métodos artesanales hasta la producción en serie. Incluso hoy en día el vidrio continúa perfeccionándose y se encuentra presente en gran parte de la industria tecnológica contemporánea, dentro de la cual sus características mecánicas de resistencia, deformación, o desgaste siguen siendo primordiales. (ESPERÓN CÓRTEZ, 2000)

Para la arquitectura contemporánea es un material imprescindible para confinar un espacio sin separarlo definitivamente del exterior, la cualidad transparente del material debido a su estructura molecular permite el paso de la luz y el calor controlados mediante el diseño arquitectónico y su variedad presente en el mercado (forma, color, revestimientos, vidrios modificados, etc.).(NAVARRO, 2011)

Al estudiar su comportamiento expuesto a cargas externas con características similares a las que se someten comúnmente las estructuras arquitectónicas, mediante conceptos de la mecánica de materiales, equipo de ensayo y nuevas tecnologías, nos permite ampliar su aplicación dentro de elementos estructurales secundarios y primarios obteniendo resultados innovadores. (SANZ-ABLANEDO E., 2010)

El obtener sus propiedades mecánicas para las diversas escalas con el apoyo del Centro de Investigación para Materiales Avanzados (CIMAV) permite comprender las posibilidades del vidrio arquitectónico de manera más amplia; el entender la naturaleza detrás de su respuesta y el evaluar con mayor seguridad su comportamiento como un material estructural, teniendo en cuenta sus limitaciones resultado de la naturaleza frágil del material, abren nuevos caminos en el desarrollo arquitectónico mediante la ingeniería de materiales.



4. OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL.

Estudiar las propiedades estructurales y mecánicas del vidrio templado de uso arquitectónico y analizar una estructura que utilice este material en sus elementos estructurales secundarios.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Preparar muestras para evaluar las propiedades mecánicas de ensayos de flexión e indentación.
2. Caracterizar mediante difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido la estructura química del vidrio estándar, vidrio templado y vidrio modificado (álcali-aluminosilicatos).
3. Determinar las propiedades mecánicas de flexión en vidrio estándar y templado mediante un ensayo de flexión a tres puntos siguiendo la norma ASTM D790.
4. Evaluar la dureza, el módulo elástico y la tenacidad a la fractura por micro- y nano-indentación del vidrio estándar, vidrio templado y vidrio modificado (álcali-aluminosilicatos).
5. Aplicar los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas en el programa COMSOL Multiphysics para evaluar el comportamiento del material en un caso de estudio: El Museo del Acertijo en la ciudad de Gómez Palacio, Durango.

5. ANTECEDENTES.

El vidrio es un material frágil que por naturaleza contiene fallas en su estructura interna, lo cual hace difícil la predicción de su comportamiento ante esfuerzos mecánicos, ya que éstos no pueden recurrir a la deformación plástica para ser distribuidos entre las distintas partes de los elementos. (NAVARRO, 2011). De igual forma las fallas presentes en sus superficies provocadas por rayones, o en los bordes y perforaciones producidas tras cortes son imposibles de evitar y colaboran a su respuesta espontánea. (Ibídem)

Dentro de los estudios preliminares para este trabajo de tesis se realizó un muestreo de fuentes cuyos temas giran en torno al estudio de las respuestas mecánicas de materiales cerámicos, específicamente del vidrio y, de los cuales, se buscó tuvieran relación con esfuerzos mecánicos a los que comúnmente se ven sujetos los elementos arquitectónicos. Para ello se recurrió a documentos de sistemas de publicación libre (Open Access Journals), tesis de distintas universidades, así como artículos publicados en revistas de corte científico. A continuación se mencionan algunos de ellos y su relación con el presente estudio, como parte de la preparación del mismo.

Lo primero que se observa es que diversos estudios se enfocan principalmente en la respuesta al impacto debido a que su uso se ha concentrado en el de servir como una parte más de las envolventes de los edificios, y como tal, es a estos esfuerzos a los que principalmente se ven expuestos los acristalamientos. Tal es el caso del estudio realizado por P.A. HOPPER, et al, en 2012 titulado *On the blast resistance of laminated glass* donde el interés recae en generar una base de datos experimental para predecir la respuesta ante la fractura del vidrio laminado con capas de Polivinil butiral (PVB). Dentro de esta misma categoría encontramos aquellos estudios en los que el enfoque se da específicamente hacia el uso arquitectónico, ejemplo de ello es el estudio de Paolo del Linz para el Imperial College de Londres en 2014, *Blast resistance of laminated glass facades*, que se enfoca en la importancia que tiene el diseño de las secciones de acristalamiento en fachadas en la seguridad del usuario ante acciones naturales y fallas provocadas por explosiones. Vale la pena anotar que históricamente, la mayoría de las lesiones producto de explosiones de bomba se deben a los fragmentos de vidrio lanzados por las mismas (HOPPER, 2012).

En todos estos casos el vidrio es atendido como un material presente en elementos estructurales secundarios, pasivos en la transmisión de cargas y que sólo responden ante la agitación del resto del edificio. En este sentido tomamos el trabajo *Performance of glass panels under seismic loading* de Ryan Andrew Dow (2001) que categoriza las estructuras de vidrio con base en su relación con la estructura portante ya sea permitiendo la transmisión de mínimas cantidades de esfuerzo o bien manteniendo a los acristalamientos exentos de la transmisión de cargas. En su conclusión hace hincapié en la rápida evolución de las metodologías de diseño de sistemas de vidrio y en cómo las nuevas tecnologías permiten minimizar la incertidumbre del comportamiento de los mismos.

Del mismo modo, enfocado al estudio de las posibilidades de innovación para los sistemas de vidrio en la arquitectura encontramos el trabajo *Structural opportunities for glass*, realizado por Elise Bond (2009) que explora la manera en la que la industria del vidrio y sus productos pueden trabajar de la mano con arquitectos e ingenieros para que, desde los procesos de manufactura, el vidrio pueda ajustarse a nuevas necesidades. Por último a la par con esta perspectiva existen diversos estudios enfocados en el desarrollo de nuevos materiales alterando la estructura del vidrio para dotarlo de propiedades mecánicas específicas, algunos de los estudiados son *Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes* (Cho, J. 2009) y *Análisis del desgaste y la resistencia a la fatiga estática del vidrio recubierto con una película delgada de óxido de niobio* (González Zavala. 2009).

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VIDRIO PLANO.

En la producción de vidrio plano no surgieron grandes innovaciones sino hasta alrededor de 1905 cuando el ingeniero belga Emile Fourcault logró crear una tira vertical continua de vidrio. Sin embargo, la producción comercial utilizando esta técnica no iniciaría sino hasta cerca del año de 1914. En América, Irving Wightman Colburn desarrolló un nuevo método para la creación de hojas de vidrio. El proceso fue mejorado con apoyo de la firma Libbey – Owens y fue utilizado para uso comercial por primera vez en 1917, en la Figura 1 se observa un esquema de dicho proceso. Posteriormente, al final de la década de 1920, Pennvemon y la Pittsburgh Plate Glass Company (PPG) implementan el proceso que denominaron Pittsburgh combinando y mejorando las técnicas de Fourcault y Libbey – Owens.

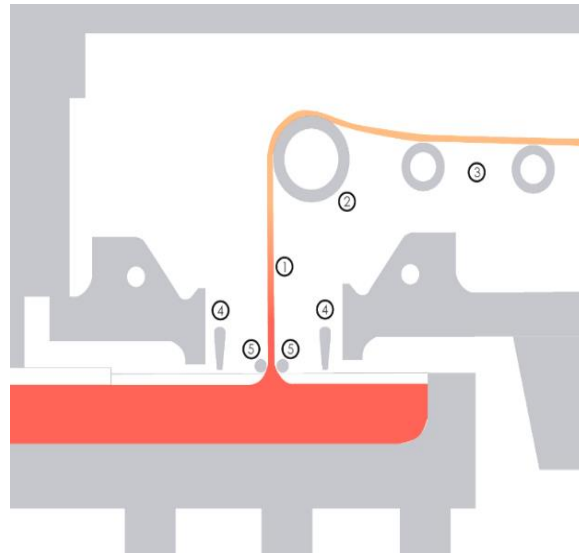


Figura 1. Proceso de fabricación de vidrio plano Colburn – Libbey -Owens. (1) Flujo de vidrio, (2) Rodillo plegador, (3) Rodillos portadores, (4) Refrigeradores, (5) Moletas.

La primera patente en E.U.A. para producir vidrio mediante flotado es para William Heal en 1902. En ella ya se mencionan factores de control en la fuerza del flujo para manipular la esbeltez de la placa, así como problemas relacionados con la adherencia del vidrio a las paredes del tanque. El punto de partida para la industria se da con la compañía Pilkinton Brothers (PB) en 1950 con el principal objetivo de crear una placa de vidrio plano eliminando los posteriores procesos de pulido y terminado. Lograron producir el primer proceso con potencialidad de uso comercial. Sus principales problemas fueron de ingeniería en el desarrollo del equipo necesario para la producción y la química detrás de los procesos. (CÁRDENAS, 1991)

Los criterios de selección del baño de flotado son principalmente que éste sea un líquido el cual entre 1000 °F y 2000 °F sea más denso que el vidrio con una baja presión de vapor y no reactivo a los componentes del material fundido. Estas determinantes nos limitan a los metales en estado líquido y por las últimas dos razones al galio, el estaño y el indio. Por condiciones de costo es que el estaño resulta la opción más viable para la industria.

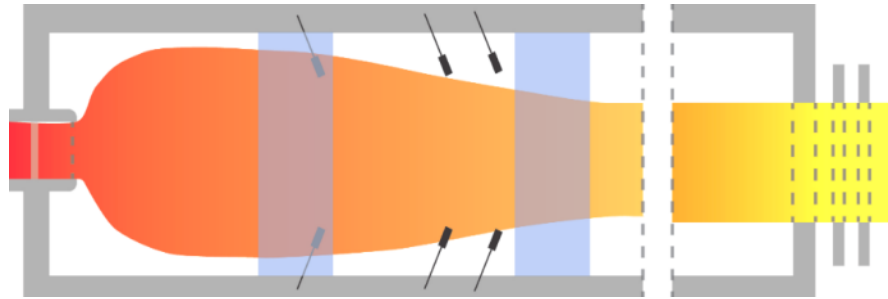


Figura 2. Proceso de fabricación de vidrio plano de la patente Pilkington Brothers (PB).

En el proceso PB, el vidrio fluye desde un tanque hacia un baño de estaño. La temperatura aproximada del vidrio es de 1950 °F, siendo variable debido a consideraciones como la temperatura ambiente y la masa de vidrio, pero siempre por encima de la temperatura que produce el estado líquido; la Figura 2 muestra de manera simplificada el proceso: se vierte el material fundido sobre el tanque tomando una forma más bien ovalada al comienzo, moviéndose cantidad considerable del material en dirección opuesta al flujo por contacto con la superficie de derrame, este material impacta con una pared de retención en la parte trasera que lo devuelve al sentido del flujo normal. Es esta condición de movimiento la que permite que el listón de vidrio continúe moviéndose uniformemente hacia el frente donde sus dimensiones son controladas en los bordes. El listón de vidrio es arrastrado en el tanque de estaño con lo que se hace cada vez más delgado. En un punto del baño el vidrio se enfría hasta conseguir estabilidad saliendo a una temperatura de 1125 °F.(CÁRDENAS, 1991)

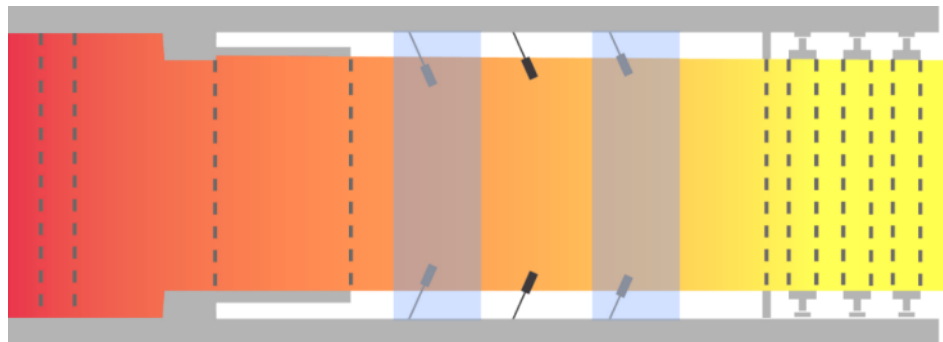


Figura 3. Proceso de fabricación de vidrio plano de la patente Pittsburg Plate Glass Company (PPG)

En 1974 la PPG anunció que contaban con su propio proceso de producción de placas de vidrio mediante flotado. Con la primera línea de producción en la planta de Wichita Falls Tx. El proceso PPG se diferencia en que el vidrio se vierte en el baño de estaño por una apertura amplia que disminuye la interacción con el flujo de vidrio, podemos observarlo de forma simplificada en la Figura. 3, pasando por un grupo de aparatos guías en el borde, continuando con dimensiones constantes controladas por las dimensiones de la cámara. Para mitad de la década de los ochenta estos dos procesos se encontraban produciendo a la par y continúan en la actualidad siendo utilizados.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENDURECIMIENTO POR TEMPLADO.

El vidrio resulta necesariamente relacionado con su condición frágil al aplicársele cargas mecánicas como las generadas por impacto, presión o choque térmico. Además, su naturaleza de fractura produce piezas puntiagudas que suponen un peligro. Un tratamiento de templado da al vidrio una naturaleza menos susceptible a la fractura y reduce considerablemente el riesgo de lesiones ya que su patrón de falla es distinto.

En el proceso de templado el vidrio se calienta hasta una temperatura de aproximadamente 650°C por encima de la temperatura de transformación e inmediatamente es inyectado con aire para enfriarlo, proceso ilustrado en la Figura 4. Como resultado la masa interna del vidrio se enfría más lentamente que la superficie externa produciendo en ésta esfuerzos de compresión en el rango de 70–140 MPa

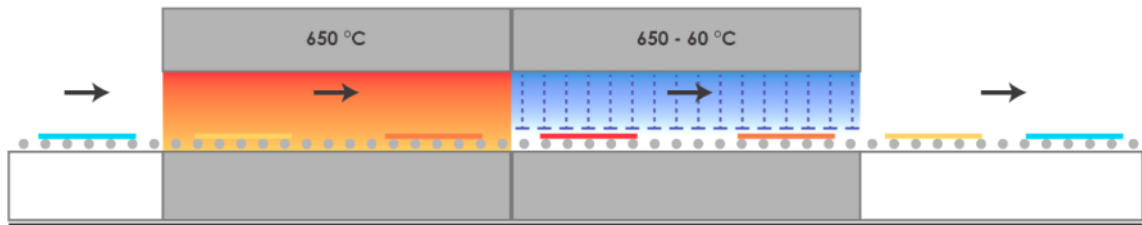


Figura 4. Esquema de un horno templado térmico de vidrio plano. Se divide en cuatro partes: Carga de vidrio, horno de calentamiento, zona de templado y zona de descarga.

Los principales factores que afectan la magnitud de los esfuerzos residuales en el vidrio son la expansión térmica a temperaturas superiores e inferiores de la temperatura de transformación (T_g), su módulo elástico y la diferencia de temperaturas arriba de aquella de transformación que exista en las superficies en contacto con la masa interna del vidrio.

El resultado es un vidrio con las mismas características ópticas, pero con mayor resistencia a la fractura. El vidrio templado permite contar con la seguridad necesaria para ser utilizado como un material con versatilidad para el diseño arquitectónico, haciéndolo seguro en grandes formatos y en elementos propensos a recibir impactos. Sin embargo, se mantiene una respuesta frágil a cargas de gran magnitud por lo cual su uso como material en elementos estructurales es limitado, si no inexistente.

6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

6.1 FUNDAMENTOS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS. VIDRIO DE SILICATO.

Askeland define los materiales cerámicos como compuestos químicos o soluciones complejas que contienen elementos metálicos y no metálicos. Debido a sus enlaces iónicos o covalentes por lo general son duros, frágiles, con un alto punto de fusión, tienen baja conductividad tanto eléctrica como térmica, buena estabilidad química y térmica y elevada resistencia a la compresión (ASKELAND, 1998). Así mismo, define al vidrio como un material sólido que se ha endurecido y vuelto rígido sin cristalizar. En cierta forma, el vidrio es parecido a un líquido sub-enfriado. Sin embargo, por debajo de la temperatura de transición del vidrio se reduce la velocidad de contracción volumétrica por enfriamiento y el material se puede considerar un vidrio y no un líquido sub-enfriado. Las estructuras vítreas se producen al unirse los tetraedros de sílice u otros grupos iónicos, para producir una estructura reticular no cristalina pero sólida. (ASKELAND, 1998)

La sílice fundida, hecha a partir de SiO_2 puro, tiene un alto punto de fusión y sus cambios dimensionales durante el calentamiento y el enfriamiento son reducidos. Sin embargo, generalmente los vidrios de silicato contienen óxidos adicionales. Aunque los óxidos como la sílice se comportan como formadores de vidrio, un óxido intermedio (como el óxido de plomo o el óxido de aluminio) no forma vidrio por sí mismo, pero se incorpora en la estructura de red de los formadores de vidrio. Un tercer grupo de óxidos, los modificadores, rompen la estructura reticular y finalmente, hacen que el vidrio se desvitrifique, es decir, se cristalice. (ASKELAND, 1998)

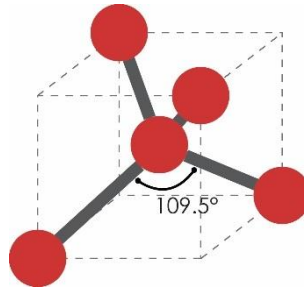


Figura 5. En el vidrio, el silicio comparte electrones con cuatro átomos de oxígeno dando así un total de ocho electrones para cada átomo de silicio. Sin embargo, el oxígeno tiene una valencia de seis y comparte electrones con dos átomos de silicio solamente. (ASKELAND, 1998)

En los vidrios cerámicos, dado que los átomos de oxígeno deben formar ángulos de 109.5° para satisfacer los requerimientos de direccionalidad de los enlaces covalentes se tiene como resultado un orden de corto alcance. Las unidades tetraédricas, como se observan en la Figura 5, pueden estar unidas entre sí de una manera aleatoria. (ASKELAND, 1998)

Es de importancia crítica observar que los materiales cerámicos son frágiles, que los defectos inevitablemente presentes en la estructura pueden hacer que el material falle por su fragilidad, que el tamaño y el número de las imperfecciones difieren de cada pieza cerámica individual y que las propiedades mecánicas sólo pueden describirse de manera estadística. Por estas razones el comportamiento mecánico de los materiales cerámicos es menos predecible que el de los metales, y por ello su uso en aplicaciones críticas de alta resistencia es muy limitado.

6.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE ENSAYOS DE TENSIÓN. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN.

Para un material metálico o polimérico, los resultados de un solo ensayo de resistencia a la tensión son aplicables a todo tamaño y formas de muestras si se convierte la fuerza en un esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en una deformación; a partir de esto se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material.

Los datos que resultan del ensayo se pueden graficar en una curva esfuerzo-deformación de la manera que se muestra a continuación (Fig. 6). En ella, dependiendo de la naturaleza del material, podemos observar la evolución en su comportamiento, partiendo de la etapa elástica del material, prosiguiendo por la etapa plástica y culminando en la falla.

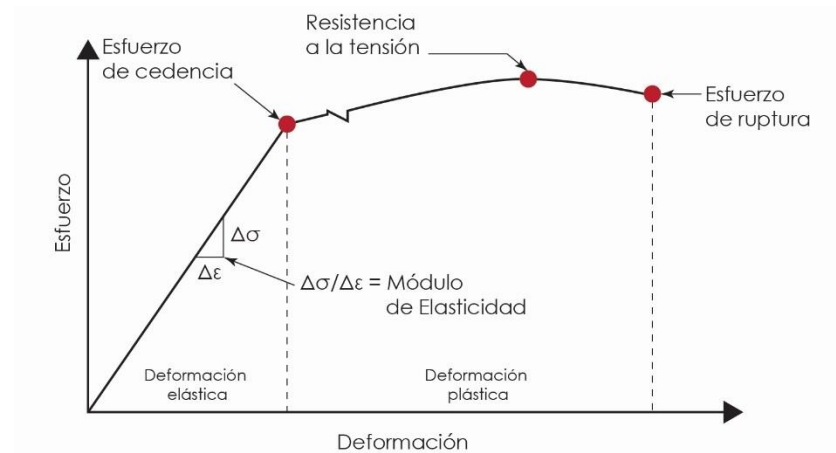


Figura 6. Curva esfuerzo – deformación típica

El límite de elasticidad corresponde con el esfuerzo de cedencia en el cual la deformación plástica se hace importante; es por tanto el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material.

El módulo elástico o módulo de Young (E) es la pendiente de la curva esfuerzo deformación en su región elástica. Este módulo está íntimamente ligado con la energía de enlace de los átomos. La resiliencia (E_r) es el área debajo de la porción elástica de la curva y representa la energía que el material absorbe o libera durante la aplicación o liberación de la carga.

6.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Los rayos x se producen cuando una partícula cargada eléctricamente con suficiente energía cinética es frenada rápidamente. Estos rayos emitidos consisten en un espectro de diferentes longitudes de onda y la variación de intensidad dependiente del voltaje de la fuente utilizada para producirlos. Cuando el voltaje de la fuente supera cierto valor crítico, aparecen picos estrechos y agudos a ciertas longitudes de onda dependiendo del material usado como receptor. Estos picos se denominan líneas características y se agrupan en conjuntos denotados por K, L, M, etc. Por sus longitudes en orden creciente, todas juntas forman el espectro característico para dicho material, el cual se representa gráficamente mediante un difractograma como se observa en la figura 7. Normalmente únicamente las líneas K son útiles en difracción, debido a que las de longitud más larga son absorbidas con demasiada facilidad. (PÉREZ, s.f.)

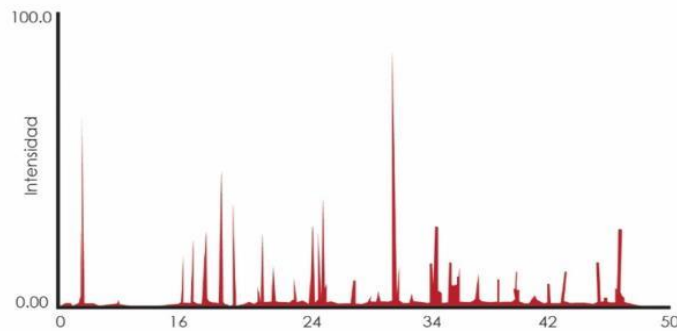


Figura 7. Se observa un difractograma típico. Las intensidades se toman como alturas de los picos o para trabajos más precisos las áreas. Al pico más intenso se le asigna un valor de 100 y el resto se escala con respecto a este. (PÉREZ, s.f.)

Las líneas de rayos x características fueron sistematizadas por Moseley quien encontró que la longitud de onda de una línea particular descendía conforme el número atómico del emisor aumentaba. En concreto encontró una relación lineal entre la raíz cuadrada de la frecuencia y el número atómico Z. (PÉREZ, s.f.)

La interacción de los rayos X con la materia esencialmente ocurre mediante dos procesos:

1. Algunos fotones del haz incidente son desviados sin pérdida de energía. Constituyen la radiación dispersada exactamente con la misma longitud de la radiación incidente.
2. Los fotones pueden sufrir una serie de choques inelásticos al incidir sobre el blanco y su energía incrementa la temperatura de la muestra o da lugar al fenómeno de fluorescencia. (PÉREZ, s.f.)

Un rayo difractado puede definirse como un rayo compuesto de un gran número de rayos dispersados que se refuerzan mutuamente. La difracción es por tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión. Los átomos dispersan la radiación incidente en todas las direcciones y en algunas de ellas los rayos estarán completamente en fase y por tanto se refuerzan formando rayos difractados. Algunas aplicaciones de la difracción de rayos X incluyen: la identificación de fases, valoración de la pureza de muestras, análisis cuantitativo para la composición del material, la determinación de diagramas de fase, determinación de estructuras cristalinas y el estudio de texturas, por mencionar algunos ejemplos.

6.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS PARA MATERIALES FRÁGILES MEDIANTE ENSAYOS DE FLEXIÓN A TRES PUNTOS EN ELEMENTOS PRISMÁTICOS.

La deformación como respuesta a una fuerza de tensión para materiales frágiles no se suele estudiar mediante ensayos de tracción ya que es difícil preparar las probetas debido a que la falla es propensa a provocarse en los puntos de sujeción, y además, existe una diferencia significativa entre los resultados de ensayos realizados bajo cargas de tensión y compresión. Por esto es común que se opte por un ensayo de flexión, en el cual una probeta de sección prismática, rectangular o circular, es sometida a una carga que la flexiona en uno o dos puntos teniendo dos puntos de apoyo. La flexión en la probeta produce esfuerzos de compresión en las fibras de la cara superior y esfuerzos de tensión en la inferior. Existen suposiciones básicas para dichos ensayos en la teoría clásica de vigas:

1. Los planos perpendiculares al eje longitudinal permanecen perpendiculares a dicho eje aún cuando éste se curva por efecto de la carga.
2. Como las deformaciones unitarias están relacionadas directamente con las deformaciones totales esto implica que la deformación unitaria longitudinal varía linealmente con la profundidad de la viga desde el extremo superior con un valor de compresión máximo hasta un valor de tensión máximo en el extremo inferior.
3. Las fibras para las cuales la deformación es igual a cero están situadas en la superficie neutra de la viga. La intersección de esta superficie con el plano vertical de momentos se denomina eje neutro. Esto toma como únicos esfuerzos los esfuerzos normales producidos en el *plano xy* despreciando la deformación en dirección de *z* por el efecto de Poisson.
4. El material de la viga se comporta linealmente, es decir, que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones unitarias, de acuerdo con la ley de Hooke los esfuerzos varían con la profundidad de la viga.

Estas suposiciones no son estrictamente aplicables cuando se presenta corte simultáneo a la flexión. Sin embargo, en la teoría de vigas de Euler-Bernoulli las deformaciones por corte son generalmente despreciables comparadas con las producidas por flexión. Con base en esto, la variación lineal para los esfuerzos normales se puede expresar de la siguiente manera, siendo σ_{ext} el esfuerzo máximo al centro de la fibra exterior y σ_x el esfuerzo a una profundidad de la viga determinada:

$$\sigma_x = \frac{y}{c} \sigma_{ext} \quad (6.4.1)$$

Donde y es la distancia del punto x al eje neutro y c es la distancia a la fibra exterior desde el eje neutro. Si se aplica un momento positivo, M_z , las condiciones de equilibrio requieren que en cualquier sección transversal se cumpla una suma de fuerzas en dirección de x igual a cero. Entonces, de acuerdo con la relación entre las componentes del esfuerzo y las acciones internas, integrando en la sección, se obtiene.

$$P = \int \sigma_x dA = 0 \quad \text{o bien} \quad \frac{\sigma_{ext}}{c} \int y dA = 0$$

Donde para valores de σ_{ext} y c distintos a cero debemos tener:

$$\int y dA = 0$$

Esto implica que el eje neutro coincide con el eje centroidal del elemento. Por otro lado se debe satisfacer el equilibrio de momentos, esto necesita que:

$dM_z = y\sigma_x dA$. Integrando a toda la sección:

$$M_z = \int y\sigma_x dA \quad (6.4.2)$$

Sustituyendo σ_x por el valor dado anteriormente tenemos:

$$M_z = \int y\sigma_{ext} \left(\frac{y}{c}\right) dA = \frac{\sigma_{ext}}{c} \int y^2 dA$$

Por definición el término a integrar es el momento de inercia del área de sección transversal con respecto del eje x designado por I . Reemplazando en M se obtiene.

$$M_z = \frac{\sigma_{ext} I}{c} \quad (6.4.3)$$

$$\text{O bien: } \sigma_{ext} = \frac{M_z c}{I} \quad (6.4.4)$$

En un ensayo de flexión tres puntos tenemos la configuración de la Figura 8.

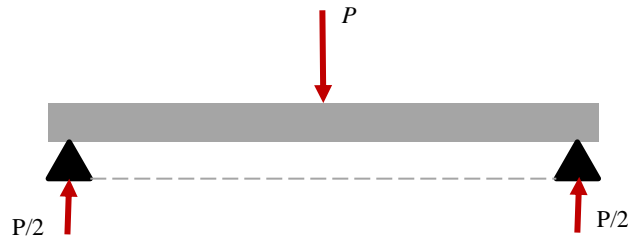


Figura 8. Diagrama para prueba de flexión a tres puntos.

$$0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad M = \frac{P}{2}x, \text{ Para } x = \frac{L}{2} \text{ resulta}$$

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad (6.4.5)$$

Siendo $I = \frac{bh^3}{12}$ para piezas rectangulares.

Este valor puede sustituirse en la ecuación de esfuerzo máximo junto a la definición de inercia dada para obtener una ecuación característica del esfuerzo a flexión para elementos prismáticos la cual corresponde con los métodos descritos en la norma ASTM D790 para la obtención de las propiedades mecánicas en ensayos de flexión en materiales rígidos.

Estos métodos cubren la determinación de propiedades de respuesta a la flexión para materiales rígidos y semirrígidos cuya falla se produce dentro del rango del 5.0 % de deformación en su fibra exterior. El procedimiento se define básicamente en dos puntos:

1. Una barra de sección rectangular simplemente apoyada en sus extremos recibe una carga en su punto medio.
2. La probeta se flexiona hasta que suceda la falla en la superficie exterior o hasta que una deformación máxima al 5.0% se alcance, aquello que suceda primero.

De los datos recabados durante la prueba se definen las siguientes propiedades.

1. Esfuerzo de flexión (σ_f). Cuando un material elástico homogéneo es ensayado como una viga simplemente apoyada en dos puntos y cargado en su centro, el esfuerzo máximo en la superficie exterior del elemento ocurre en el punto de aplicación de la carga. Este esfuerzo puede calcularse en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} = \frac{PL(d/2)/4}{bd^3/12} = \frac{12PLd}{8bd^3} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (6.4.6)$$

Dónde:

σ_f = Esfuerzo al centro de la fibra exterior. MPa.

P = Carga en un punto dado de la curva esfuerzo-deformación. N.

L = Distancia entre apoyos. mm.

b = Ancho de la viga. mm.

d = espesor de la viga. mm.

M = Momento máximo al centro de la viga. N.

c = Distancia del eje neutro a la fibra exterior. mm.

2. Deformación a la flexión (ϵ_f). Definida como la variación nominal en la longitud al centro de las fibras en la superficie exterior, donde la mayor deformación ocurre. Se puede calcular para cualquier deflexión utilizando.

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (6.4.7)$$

Dónde:

ϵ_f = Deformación en la superficie. mm/mm.

D = Máxima deflexión al centro de la viga. mm.

3. Módulo elástico. Corresponde a la razón de cambio, dentro el límite elástico, del esfuerzo correspondiente a la deformación. Y puede definirse como:

$$E = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} = \frac{3PL/2bd^2}{6Dd/L^2} = \frac{3PL^3}{12Dbd^3} = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (6.4.8)$$

Donde la relación P/D corresponde a la pendiente (m) de la tangente a la curva deformación en el punto de estudio.

6.5 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FRACTURA EN MATERIALES CERÁMICOS POR EL MÉTODO DE INDENTACIÓN DE VICKERS.

La resistencia a la fractura es una propiedad importante que caracteriza la fragilidad de un material, es decir, su capacidad de fracturarse con escasa deformación. En las décadas de 1970 y 1980 existía considerable confusión acerca de los métodos de resistencia a la fractura, los resultados eran inconsistentes y parecían depender del método empleado. Esto ponía en duda la existencia de un valor determinado de resistencia a la fractura (K_{Ic}). Con el refinamiento de los métodos de medición disminuyeron los factores de variabilidad y dicho coeficiente comenzó a ser determinado. A pesar de estas complicaciones, ahora es sabido que los materiales frágiles sí poseen una resistencia específica en el sentido clásico. (QUINN, 2006)

El método de indentación de Vickers (IF) o de la longitud de fractura de Vickers es un método no tradicional. Éste no ensaya sobre un espécimen pre fracturado, en su lugar, utiliza un indentador piramidal para dejar una marca sobre la superficie del material. El indentador produce una región deformada plásticamente en el punto de contacto, así como grietas que crecen de manera radial hacia fuera de la huella. La resistencia a la fractura se define en base a las longitudes de dichas grietas, la carga de indentación, la dureza, el módulo elástico, la dimensión diagonal de la huella del indentador y una constante de calibración. El método tiene la ventaja de que utiliza equipo convencional, una superficie pequeña de ensaye y no requiere de elaborados procesos de pre falla. (QUINN, 2006)

La dureza caracteriza la resistencia a la deformación plástica debajo del indentador. Lo usual para definir la dureza Vickers (HV) según Quinn, es la carga dividida entre el área de contacto de las cuatro caras del indentador. Teniendo un indentador de punta piramidal con un ángulo del eje a la cara exterior de 68° se conduce a la definición:

$$\begin{aligned}HV &= 2 (P/d^2) \text{ Sen } 68^\circ \\HV &= 2 (P/d^2) (0.9271) \\HV &= 1.8544 P/d^2 = 0.4636 P/a^2\end{aligned}\tag{6.5.1}$$

Donde P es la carga de indentación y $d=2a$ es la dimensión diagonal del indentador. Por otro lado, muchos definen la dureza como la carga dividida ente el área proyectada por el indentador.

$$H = 2 P/d^2 = P/(2a)^2 = 0.5 P/a^2\tag{6.5.2}$$

Esta última resulta en un valor 7.9 % más grande al primero. Sin embargo, se toma como un buen estimado del área de contacto debajo del indentador Vickers, al considerarse que las presiones debajo de la punta del indentador no son totalmente uniformes por lo que un promedio es la mejor aproximación. Muchas ecuaciones de resistencia a la fractura toman la dureza en términos generales, H y HV , dependen de la carga del indentador en una tendencia llamada efecto del tamaño de indentador (ISE). La dureza varía apreciablemente en cargas bajas pero esta dependencia a la carga se desvanece o es eliminada en cargas de 20 N o mayores. (QUINN, 2006)

Muchos de los métodos desarrollados durante las décadas de los setentas y ochentas eran principalmente conceptuales y tenían limitado uso práctico, hasta 1976 con Evan y Charles quienes utilizaron un análisis dimensional y evaluaron, tras procesos de experimentación, una curva de ajuste para relacionar la longitud de falla (c) y el tamaño de la huella de indentación (a) con la resistencia a la fractura. Su trabajo fue corregido y refinado por Marshall y Evans en 1981 con la publicación de una nueva fórmula simplificada: (QUINN, 2006)

$$K_{ic} = 0.036 E^{0.4} P^{0.6} a^{-0.7} (c/a)^{-1.5} \quad (6.5.3)$$

El modelo asume que las grietas se propagan del centro de la huella hacia afuera durante el proceso de indentación, que el área deformada plásticamente produce un esfuerzo residual y se comporta como una cavidad en expansión dentro de un sólido y que este esfuerzo distribuido se equivale con la fuerza que propaga las grietas.

La fórmula para resistencia a la fractura en unidades de N/m elaborada por *Anstis et al* (QUINN, 2006), partiendo de la anterior se muestra a continuación. En esta, E es el módulo elástico en GPa. H es la dureza en GPa. P es la carga de indentación en N y c la longitud de grieta en metros. Efectos de geometría y otros términos se agrupan en la constante de calibración (0.016).

$$K_{ic} = 0.016 (E/H)^{0.5} (P/c)^{1.5} \quad (6.5.4)$$

Este modelo puede observarse como compuesto por dos factores principales, la primer parte agrupa una constante de calibración con la relación entre el módulo elástico y la dureza, este factor es conocido como “Factor de Estrés Residual” y es característico para cada material. La segunda parte se conforma de la fuerza de indentación como una fuerza que produce una huella circular (pennyshape) con radio igual a la longitud promedio de la grieta.

Tomando en cuenta estos dos modelos, diversas normas vigentes elaboraron definiciones para el coeficiente de resistencia a la fractura, involucrando distintas constantes de calibración. Niihara desarrolla una ecuación con ligeras variaciones: (QUINN, 2006)

$$K_{ic} = 0.0334 (E/H)^{0.4} (P/c)^{1.5} \quad (6.5.5)$$

Una variante de la ecuación de Niihara, sustituyendo el valor de dureza por una definición de la carga de indentación sobre unidad de área, es una opción de ASTM en su especificación F2094. La cual requiere que P se encuentre en kgf, el valor a y c en micrómetros y E en GPa.

$$K_{ic} = 10.4 E^{0.4} P^{0.6} a^{0.8}/c^{1.5} \quad (6.5.6)$$

La norma JIS R1607 para resistencia a la fractura incluye un método Vickers (IF) en la fórmula conocida como ecuación de Miyoshi, esta sigue el mismo modelo a excepción de que la dureza es reemplazada por la definición para dureza Vickers. (QUINN, 2006)

$$K_{ic} = 0.018 (E/HV)^{0.5} (P/c)^{1.5} \quad (6.5.7)$$

En general se pueden presentar variaciones de hasta un 50% entre distintas normas debido a las calibraciones específicas. Existen más métodos que se fundamentan en la definición de coeficiente de resistencia a la fractura descrito, pero centraremos los estudios de esta tesis en una comparación entre los anteriores.

6.6 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y MÓDULO ELÁSTICO MEDIANTE NANO-INDENTACIÓN.

La indentación ha sido una de las técnicas más comunes para la medición de las propiedades mecánicas de materiales desde su introducción a principios del s. XX por Brinell. (OLIVER, 2004) Este utilizaba una esfera como indentador para deducir propiedades mecánicas en los materiales de la respuesta a la penetración. Desde los años ochenta el perfeccionamiento en las tecnologías de medición ha permitido desarrollar instrumentos capaces de registrar continuamente los resultados carga-desplazamiento durante las pruebas de indentación. Además, estudios durante la década de los setentas demostraron que el módulo elástico podría ser potencialmente medido desde la curva carga-desplazamiento obtenida de una prueba de indentación. Esto provocó el desarrollo de metodologías de estudio que involucraran la técnica.

El método introducido en 1992 por Oliver y Pharr para determinar la dureza y el módulo elástico mediante indentación ha sido ampliamente utilizado para la caracterización del comportamiento mecánico de materiales a pequeña escala. Su atractivo recae en que las propiedades mecánicas pueden ser determinadas directamente desde la carga de indentación y el desplazamiento sin la necesidad de utilizar la impresión del indentador. Fue desarrollado para aplicarse en puntas afiladas, pero se ha extendido al estudio utilizando variedad de puntas axisimétricas incluyendo puntas esféricas.

Una representación común de la información obtenida se observa en la Figura 9, donde P representa la carga y h el desplazamiento relativo a la superficie inicial. Para efectos del estudio la deformación durante el ciclo de carga se supone tanto elástica como plástica, a medida que la impresión del indentador se genera. Durante la descarga se supone que solo desplazamientos elásticos se recuperan; es la naturaleza elástica de la curva de descarga lo que facilita el análisis.

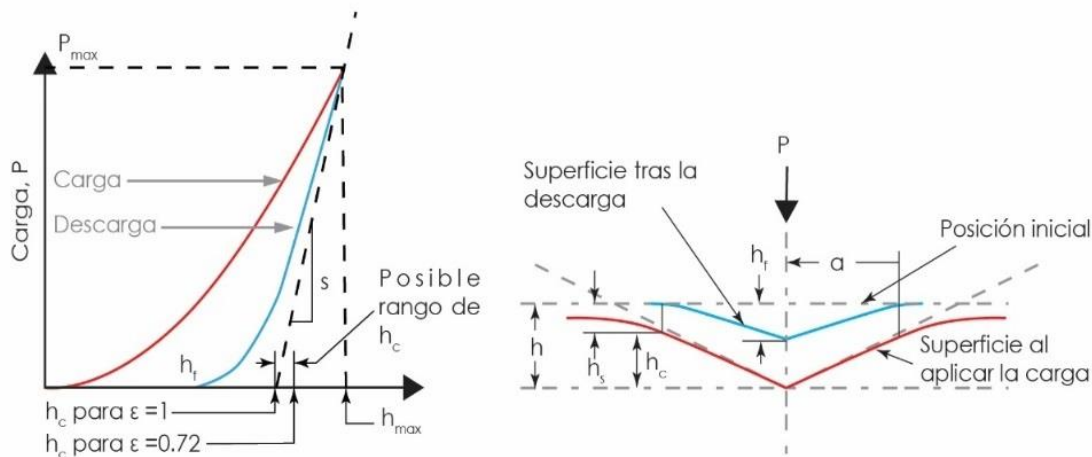


Figura 9. La figura muestra una curva típica de carga-desplazamiento y el patrón de deformaciones de una muestra elasto-plástica durante y después de la indentación.

Existen entonces tres importantes cantidades a determinarse mediante la curva P - h : La carga máxima (P_{\max}), el desplazamiento máximo (h_{\max}), y la rigidez elástica de contacto tras la descarga ($S=dp/dh$), que se define como la pendiente de la porción superior para la curva de descarga, esto es, durante las primeras etapas tras retirar la carga. Otro dato importante es la profundidad final (h_t) que representa la profundidad de la penetración permanente en el material tras retirar el indentador.

El proceso para obtener la dureza (H) y el módulo elástico (E) también se basa en la suposición de que el comportamiento de un indentador Berkovich puede ser modelado como el comportamiento de una punta cónica con un ángulo tal que produzca la misma relación profundidad-área de contacto, en este caso una punta cónica con ángulo $\phi = 70.3^\circ$. Asumiendo que el apilamiento producto de la introducción de la punta en el borde de la impresión es despreciable, la profundidad puede calcularse mediante la relación.

$$h_s = \epsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (6.6.1)$$

Partiendo de la ecuación de h_s la profundidad donde existe contacto entre el material y el indentador se definiría de la siguiente manera:

$$h_c = h_{max} - h_s \quad \text{O bien} \quad h_c = h_{max} - \epsilon \frac{P_{max}}{S}$$

Donde ϵ es una constante que depende de la geometría del indentador, conocida como coeficiente de forma efectiva. Durante el proceso de carga se producen a la par deformación plástica y elástica, esto provoca que la superficie del indentador que queda dentro del material coincida con la superficie de contacto, véase el inciso a) de la figura 10. Sin embargo, al descargar, la deformación elástica es recuperada y la impresión en el material se modifica como se ilustra en el inciso b) de la figura 10. Esta variación es la que produce la curvatura de la porción de descarga en la gráfica y va ligada a este coeficiente. Valores comunes son: de 0.72 para una punta cónica, 0.75 para un paraboloide de revolución, y 1.00 para un contacto plano. Empíricamente el valor de 0.75 es el comúnmente utilizado como estándar, y se ajusta al comportamiento de una punta Berkovich.

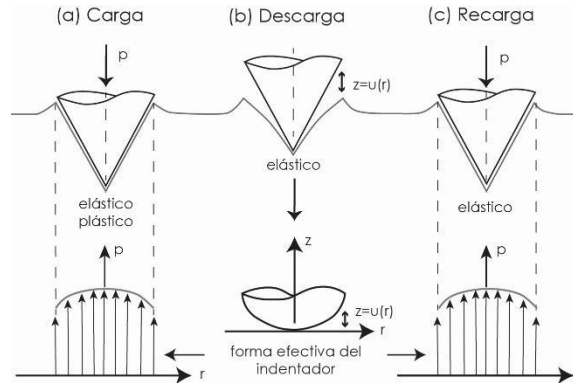


Figura 10. Conceptos usados para comprender el área efectiva bajo el indentador.

Con efectos prácticos se han conducido experimentos para de forma estadística encontrar una expresión que ajuste la curva obtenida en la descarga a un modelo matemático regido por las variables α y m que sirven de valores de ajuste dependientes del material.

$$P = \alpha (h - h_f)^m \quad (6.6.2)$$

El valor S tiene unidades de fuerza por unidad de distancia y es conocida como la rigidez elástica de contacto o simplemente rigidez de contacto y está ligada directamente con el cálculo de dureza (H) y módulo elástico (E). Para su cálculo se utiliza la expresión antes descrita y mediante diferenciación matemática se obtiene el valor de la pendiente para los momentos iniciales de la curva de descarga. Esto es:

$$S = \frac{dp}{dh} = \alpha m (h_{max} - h_f)^{m-1} \quad (6.6.3)$$

De manera muy general podemos decir que el valor de dureza está determinado por la fuerza ejercida dividida entre el área de contacto del indentador con el material, esto es:

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A} \quad (6.6.4)$$

Debemos notar que, ya que esta definición se basa en el área de contacto del material con el indentador bajo la carga definida, se espera que difiera de la definición tradicional de dureza que se mide a partir del área proyectada por la impresión dejada por el indentador, sobre todo si existe una considerable recuperación elástica tras la descarga. Definiendo $F(d)$ como una función de área que describe el área proyectada por el indentador a una distancia d tomada desde su punta, el área de contacto en el material a una distancia h_c se define como:

$$A = F(h_c) \quad (6.6.5)$$

Esta función de área, debe ser cuidadosamente calibrada mediante mediciones independientes para tomar en cuenta las desviaciones causadas por modificaciones en la geometría del indentador. Estas desviaciones suelen ser comunes cerca de la punta del indentador Berkovich, que suele desgastarse generando una pequeña región plana. A pesar de que utilizar el área de contacto idealizada ofrece una descripción cercana a la real, sobre todo a elevadas profundidades de indentación, el desgaste de las puntas debe ser un factor considerado tratándose de estudios a tan pequeña escala. La siguiente figura ilustra la desviación que existe debido a la geometría de la punta respecto a la profundidad de indentación en comparación con un área ideal de contacto.

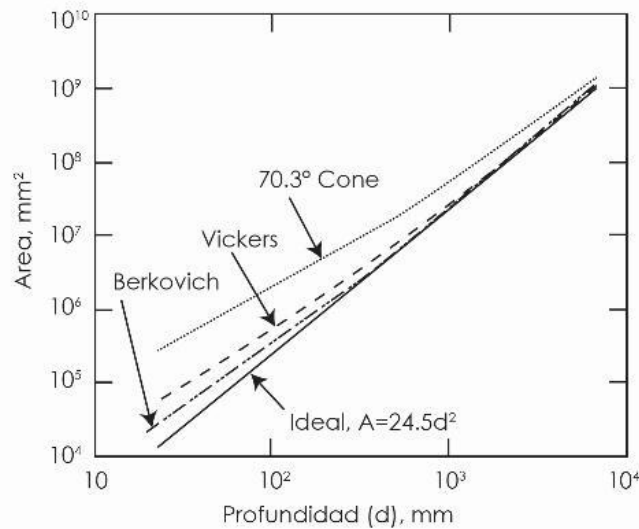


Figura 11. Funciones de área calibradas para tres tipos de indentador. A pesar de que el área ideal $A = 24.5 d^2$ es utilizada en todos los casos, existen diferencias notables debido al grado de redondez de la punta.

Un procedimiento común para evaluar la función de área es realizar una serie de indentaciones a diferentes profundidades en un material de calibración con propiedades elásticas bien conocidas. La suposición que se realiza es que el módulo elástico es independiente de la profundidad del material así que es de suma importancia que el material de calibración esté libre de óxidos u otros contaminantes en su superficie que alteren su comportamiento, así como es importante que el abultamiento sea despreciable por ello uno de los materiales más comúnmente utilizados es el cuarzo.

Una vez obtenidos los datos de carga y descarga para la calibración se obtiene el valor de rigidez de contacto (S) y ya conocido el módulo elástico del material, el área queda definida por:

$$A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{S}{\beta E_r} \right)^2 \quad (6.6.6)$$

El factor de corrección β ocupa un lugar importante si se busca obtener resultados específicos. Afecta no solo al módulo elástico, sino que también guarda relación con la dureza al encontrarse ligado al cálculo del área de contacto. Existen diversas ecuaciones para determinar su valor, todas ellas dependientes del coeficiente de Poisson del material, todas estas resultan dentro de un rango de $1.0226 \leq \beta \leq 1.085$ por lo que un valor de $\beta = 1.05$ funcionaría en caso de evaluaciones aproximadas.

$$\beta = 1.2304 (1 - 0.21\nu - 0.01\nu^2 - 0.41\nu^3) \quad (6.6.7)$$

$$\beta = \pi \frac{\left(\frac{\pi}{4} + 0.1548 \cot \cot \varphi \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)} \right)}{\left(\frac{\pi}{2} - 0.8312 \cot \cot \varphi \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)} \right)^2} \quad (6.6.8)$$

En la ecuación para evaluar la función de área, el valor E_r es el módulo elástico efectivo que toma en cuenta el hecho de que desplazamientos elásticos suceden en el material con un módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν), así como en el indentador con módulo (E_i) y coeficiente (ν_i).

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (6.6.9)$$

Partiendo de estas definiciones podemos definir el módulo elástico de la siguiente manera.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (6.6.10)$$

6.7 - CONCEPTOS BÁSICOS DE DINÁMICA ESTRUCTURAL Y MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

En un sentido amplio, un sistema dinámico es aquel cuyas variables experimentan variaciones en el tiempo y si se conocen las influencias externas que actúan sobre el sistema podrá predecirse el comportamiento de éste. En este caso, los sistemas a estudiarse serán sistemas estructurales y las variaciones en el tiempo serán vibraciones producidas por cargas dinámicas.

Una acción tiene carácter dinámico cuando su variación con el tiempo es rápida y da origen a fuerzas de inercia comparables en magnitud con las fuerzas estáticas. Aunque la carga varíe con el tiempo, la respuesta de una estructura varía radicalmente según la masa que vibra con ella ante una misma función de carga. Como se observa en la Figura 12, una estructura sin masa se deforma sólo durante el instante de aplicación de la fuerza, mientras tanto la presencia de masa genera una respuesta en forma de vibraciones, aún en instantes de tiempo posteriores a la aplicación de la fuerza que decrecen en proporcionalmente a la rigidez del sistema.

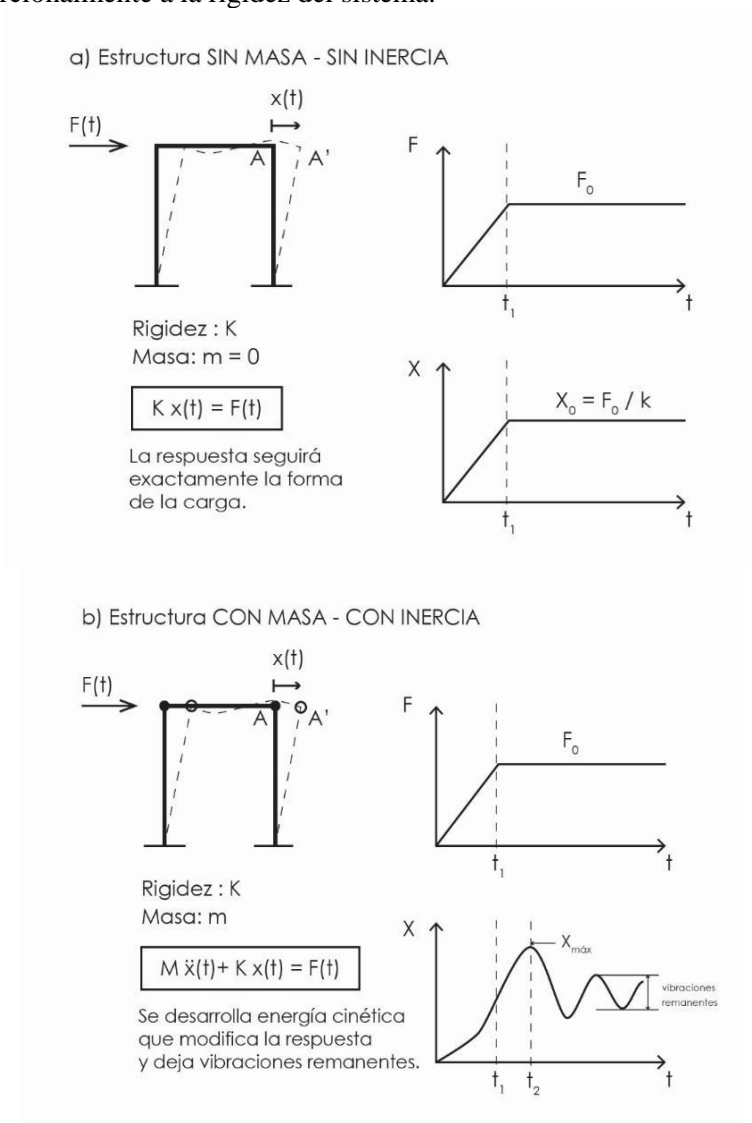


Figura 12. Importancia de la masa en la respuesta de una estructura ante una carga dinámica.



La respuesta de las estructuras está íntimamente relacionada con las formas o modos de vibrar y sus correspondientes frecuencias o periodos propios. En el caso de un oscilador de un grado de libertad este periodo propio se obtiene fácilmente, no así para estructuras de múltiples grados de libertad.

Se definen como grados de libertad (GL) a los puntos de la estructura en los cuales se identifica algún desplazamiento y permiten brindar una gráfica deformada de la estructura. Los grados de libertad dinámicos (GLD) tienen asociada masa para los cuales puede conocerse las vibraciones o movimientos a lo largo del tiempo.

Obtener la respuesta dinámica de una estructura es el resultado de comparar las variaciones de las magnitudes de análisis (desplazamientos, velocidades, aceleraciones, momentos, tensiones, etc.) presentes en la estructura en cada instante de tiempo. Esto requiere que previamente se defina la fuente y clase del movimiento, así como las características estructurales del medio que lo transmite y de la estructura propiamente.

Pueden distinguirse entre modelos dinámicos exactos y discretos. En general, la primera clase solo puede resolverse en casos muy sencillos y con poca aplicación práctica. Por lo que suelen utilizarse los del segundo tipo. Para estos métodos de modelado discretos, se debe tener en cuenta que la subdivisión en dominios finitos es tanto espacial (discretización estructural) como temporal (solución para instantes de tiempo determinados). Un modelo dinámico exacto (con infinitos GLD) acarrearía más inconvenientes en la resolución matemática que beneficios en su precisión, además, en estructuras de edificios y en la mayoría de las estructuras civiles, las masas se encuentran más o menos concentradas en lugares conocidos.

6.7.1 ECUACIONES DE MOVIMIENTO PARA SISTEMAS SIMPLES, MÚLTIPLES Y CONTINUOS.

La segunda ley de la mecánica de Newton establece que la resultante de un sistema de fuerzas que actúan en un cuerpo en movimiento es igual al cambio de la cantidad de movimiento (*momentum*) del mismo. La cantidad de movimiento (μ) está definido en física como el producto de la masa m por la velocidad v .

$$\mu = mv = m \left(\frac{du}{dt} \right) \quad (6.7.1)$$

Donde u denota el desplazamiento del cuerpo. Por tanto, llamando f a la fuerza resultante, la ley de Newton se expresa matemáticamente en la forma siguiente:

$$f(t) = \frac{d\mu}{dt} = \frac{d}{dt} m \left(\frac{du}{dt} \right) \quad (6.7.2)$$

Si, como es usual en mecánica de sólidos, la masa se supone constante en cada instante de tiempo, se tiene que:

$$f(t) = m \frac{d^2u}{dt^2} = m \ddot{u} \quad (6.7.3)$$

Donde \ddot{u} es la aceleración del cuerpo. La anterior es la expresión más conocida de la segunda ley de Newton, que sólo es válida para sistemas cuya masa permanece constante. La fuerza $f_I(t) = \ddot{u}(t)$ se conoce con el nombre de fuerza de inercia, por lo que está asociada a la tendencia de un cuerpo de conservar su estado de movimiento o reposo.

Considerado un sistema como el mostrado en la Figura 13, en el que se tiene una fuerza externa variable con el tiempo $p(t)$, una masa de valor m y un resorte elástico de rigidez k que sujeta al sistema a un apoyo fijo. El diagrama de cuerpo libre mostrado indica que la resultante de fuerzas aplicadas es:

$$f(t) = p(t) - ku(t) \quad (6.7.4)$$

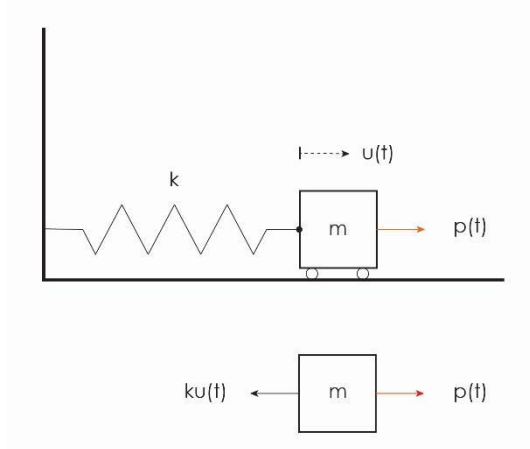


Figura 13. Modelo de un grado de libertad sin amortiguamiento.

De acuerdo con la ley de Newton, esta fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración.

$$f(t) = p(t) - k u(t) = m \ddot{u} \quad (6.7.5)$$

De donde se concluye que:

$$m\ddot{u} + k u(t) = p(t) \quad (6.7.6)$$

La solución de la ecuación diferencial anterior permite conocer los distintos valores de desplazamiento y aceleración del sistema, a partir de la cuales pueden calcularse las impresiones temporales de las fuerzas internas, tales como la desarrollada en el resorte en este caso sencillo.

$$f_R(t) = k u(t) \quad (6.7.7)$$

La fuerza $f_R(t)$, igual en este caso a $ku(t)$, se conoce con el nombre de fuerza de restitución ya que tiene la tendencia a restituir la forma original de la estructura, que en este caso es un simple resorte.

El llamado principio de D'Alembert no es otra cosa que una presentación diferente de la segunda ley de Newton propuesta por D'Alembert con el fin de asimilarla a la primera ley de Newton, según la cual todo cuerpo se encuentra en estado de reposo o de movimiento uniforme a menos que una fuerza externa actúe sobre él. Esta ley gobierna el análisis estático de estructuras, toda vez que implica que la resultante de fuerzas es nula, lo que corresponde a un estado de equilibrio. La primera ley de Newton puede, en consecuencia, abarcar la segunda si se toma como resultante a la fuerza $f(t) - m\ddot{u}$ en lugar de la fuerza $f(t)$. De esta manera se tiene:

$$f(t) - m\ddot{u}(t) = 0 \quad (6.7.8)$$

Lo que equivale al resultado anterior obtenido de manera directa por medio de la segunda ley de Newton.

En lo tratado hasta ahora se ha supuesto siempre que el material de la estructura es elástico lineal, por lo que cumple la ley de Hooke y, en consecuencia, el principio de proporcionalidad. El significado es el siguiente, un material es elástico cuando recupera su forma original después de retirar la carga aplicada; si, además, existe una proporcionalidad entre fuerzas y desplazamientos, se dice que el material es lineal. En este caso, el diagrama de fuerza de restitución/desplazamiento es una línea recta, ya que $f_R(t)$ es directamente proporcional a $u(t)$.

Se denomina sistema múltiple a un modelo estructural que tiene varios grados de libertad, en el sentido en que este término se entiende en Dinámica de Estructuras, es decir, como direcciones de aceleración (traslacional o rotacional) de una masa concentrada cualquiera. Esto la diferencia de los sistemas continuos que se caracterizan por un número infinito de grados de libertad.

Si analizamos un sistema sencillo constituido por dos masas, m_1 y m_2 , como el ilustrado en la Figura 14, unidas en serie por dos resortes elásticos de rigideces k_1 y k_2 . Los desplazamientos $u_1(t)$ y $u_2(t)$ se miden a partir de un punto cualquiera de los cuerpos.

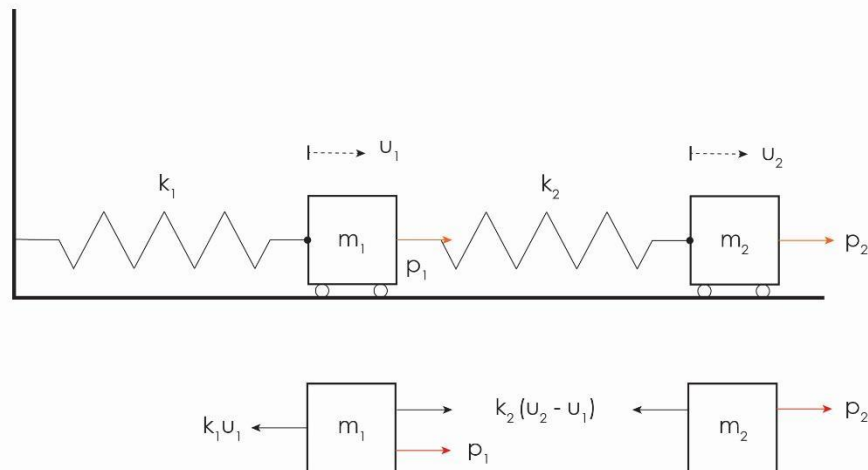


Figura 14. Modelo de dos grados de libertad sin amortiguamiento.

Los diagramas de cuerpo libre mostrados en la figura anterior nos permiten definir las ecuaciones de equilibrio de ambos cuerpos.

$$\begin{aligned} p_1 + k_2(u_1 - u_2) - k_1 u_1 &= m_1 \ddot{u}_1 \\ p_2 + k_2(u_2 - u_1) &= m_2 \ddot{u}_2 \end{aligned}$$

Después de organizar los términos se obtiene.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 + (k_1 + k_2)u_1 - k_2 u_2 &= p_1 \\ m_2 \ddot{u}_2 - k_2 u_1 + k_2 u_2 &= p_2 \end{aligned}$$

Lo cual puede expresarse de manera matricial en la forma.

$$m\ddot{u} + ku = p \quad (6.7.9)$$

Donde:

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$m = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$$

$$k = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}$$

$$p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$$

Las ecuaciones anteriores han sido deducidas a partir de simples consideraciones de equilibrio. Para el análisis de sistemas de muchos grados de libertad, sin embargo, resulta más práctico construir de manera directa las matrices de masa y rigidez, m y k , de acuerdo a un vector preestablecido de desplazamiento u . La ecuación 6.7.9 puede expresarse en la forma:

$$f_I + f_R = p \quad (6.7.10)$$

Dónde f_I es el vector de fuerzas de inercia y f_R el vector de fuerzas de restauración. La expresión anterior no es, pues, otra cosa que una ecuación de equilibrio de fuerzas, en la que los elementos de los vectores de la izquierda tienen la forma general.

$$\begin{aligned} f_{I,i} &= m_{i1}\ddot{u}_1 + m_{i2}\ddot{u}_2 + \dots + m_{in}\ddot{u}_n \\ f_{R,j} &= k_{j1}u_1 + k_{j2}u_2 + \dots + k_{jn}u_n \end{aligned}$$

Dónde se ve que los términos m_{ij} y k_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, n$ admiten la interpretación de coeficientes de influencia que reflejan el efecto del desplazamiento o la aceleración i en el grado de la libertad j .

En un sistema continuo con un número infinito de grados de libertad las matrices de rigidez y de restitución tienen un infinito número de términos. Su estudio se aproxima entonces mediante métodos numéricos como el método del elemento finito.

6.8 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF)

El método del elemento finito (MEF) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales que se basa en dividir un cuerpo, estructura o dominio (llamado medio continuo) sobre el que se definen ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios no intersectantes entre sí, denominados elementos finitos, proceso conocido como discretización. La Figura 15 ejemplifica la división de un medio continuo en diferentes grados de precisión definidos por el tamaño de la malla obtenida.

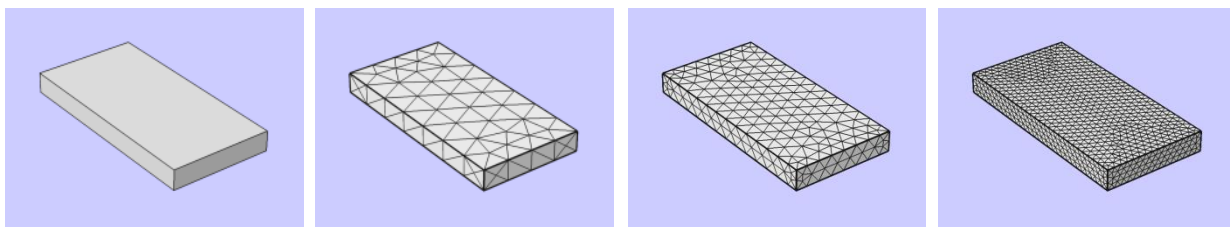


Figura 15. Ejemplo de mallado a diferente nivel de detalle (Coarse, Fine y Extra fine en COMSOL Multiphysics) de un volumen rectangular.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo que está sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla.

Las relaciones que existen de adyacencia o conectividad se relacionan al valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

El alcance de este texto no pretende desarrollar los principios matemáticos que sustentan el método, ya que se trata de un tema extenso y que queda fuera del marco de la investigación. Con los conceptos anteriormente descritos se busca dar sustento a su utilización como método de análisis al problema concreto presentado en esta tesis mediante el uso de un software de Análisis Estructural (COMSOL Multiphysics), cuyos algoritmos de cálculo se basan en esta teoría.

7. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS Y RESULTADOS.

7.1 DISEÑO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las piezas utilizadas para las pruebas mecánicas se realizan con material distribuido por la empresa manufacturera de vidrio Saint Gobain a la empresa local InovaGlass S.A. de C.V. quien presta el servicio de corte y templado. Se considera clave que el material utilizado forme parte del existente en el mercado del vidrio arquitectónico local (el de Chihuahua, Chih., México).

Es necesario preparar muestras distintas para cada escala a la que serán evaluadas (nano, micro y macro mecánica). En el caso de las pruebas macro-métricas se preparan paquetes de diez piezas para tres grupos distintos de espesor: 6, 10 y 12 mm. Con dimensiones de 75 x 300 mm (Dimensión definida como mínima debido a limitantes de las máquinas templadoras). De dichas piezas, cinco de cada grupo de espesor serán templadas, quedando cinco como muestras de referencia en vidrio recocido (Denominado en este estudio como vidrio estándar). Se realiza un diseño de etiqueta para identificar las probetas, como se muestra en la Figura 16, adherida a cada extremo para que sea posible identificar ambas partes tras realizar las pruebas de flexión a tres puntos.



Figura 16. Esquema de colocación de las etiquetas para las probetas de vidrio a someterse a falla por flexión.

Además, se agrega una muestra de vidrio modificado con aluminosilicatos, utilizado como protector para pantallas de teléfono celular, con el fin de comparar las cualidades mecánicas de los vidrios arquitectónicos con una gama del material utilizado por la industria tecnológica, a este material nos referiremos en este estudio como mica.

Las piezas se preparan con una superficie de 1 cm cuadrado utilizando una máquina Cortadora Leco V-50 con disco de corte de borde diamante ALLIED 5 x 0.015 x 1/2 pulgadas y aceite lubricante para evitar daños producidos por la fricción en la superficie. Tanto el equipo como el proceso de corte se muestra en la Figura 17.

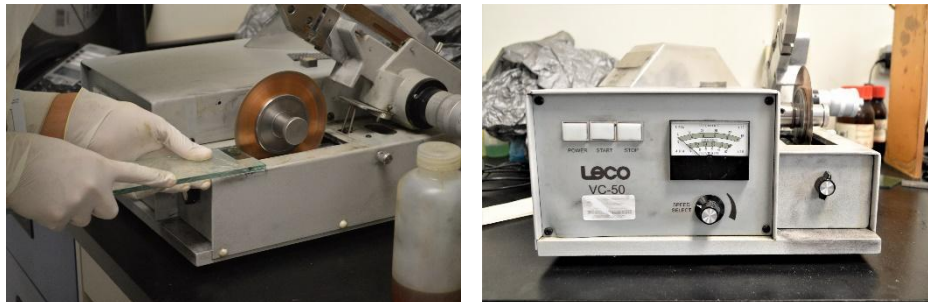


Figura 17. Imágenes del proceso de corte. A la izquierda se corta una pieza de vidrio de manera manual, debido a las dimensiones de la probeta utilizada como base. A la derecha la máquina de corte utilizada.

Debido a la naturaleza de cada probeta se observan resultados distintos al corte: para la pieza de vidrio estándar se realiza sin problema a una velocidad de 20 metros por minuto produciendo un bloque con superficies de acabado fino. Para el vidrio templado se decide utilizar menor velocidad de corte y aplicar cinta de seguridad en la pieza buscando evitar una falla repentina; finalmente se consigue un bloque con buenas superficies pero que al final del corte se astilla en una arista. La pieza de mica es la que muestra más problemas, teniendo que ser cortada con muy baja velocidad, presentando fallas en su superficie, estos resultados se observan en la Figura 18.

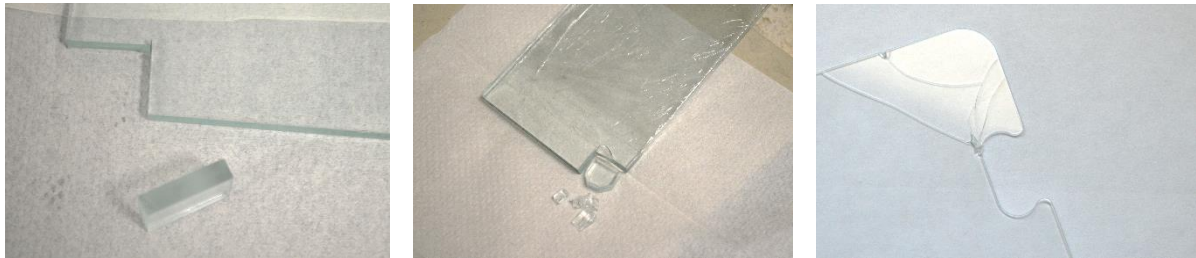


Figura 18. Imágenes de las muestras extraídas de cada probeta de izquierda a derecha el vidrio estándar (S), el vidrio templado (T) y la mica protectora (M).

Posteriormente las muestras resultado del corte se someten a un proceso de limpieza para eliminar todo rastro del aceite lubricante y de cualquier impureza que interfiera al realizar mediciones a tan pequeña escala. La limpieza se lleva a cabo en distintas etapas: primero de forma manual con Etanol para eliminar grasas y partículas de gran tamaño. Mediante vibración por ultrasonido, en dos ciclos de diez minutos, el primero utilizando Acetona y el ultimo con Metanol como solventes para eliminar partículas más pequeñas; tras la limpieza, las piezas se almacenan por separado y se identifican para proceder con las pruebas. Tanto el material como el equipo utilizado en el proceso de limpieza se observan en la Figura 19.



Figura 19. Equipo y herramientas utilizadas en el proceso de limpieza de las piezas. A la izquierda equipo de laboratorio y solventes. A la derecha máquina de ultrasonido Branson 2510 frecuencia de 40 Hz.

7.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Tras preparar las muestras se realiza una caracterización de los materiales analizando su composición química, mediante difracción de rayos x. El equipo compara los datos obtenidos de las muestras del material con una base de datos para obtener la composición química. El difractograma resultado del análisis se muestra en la Figura 20.

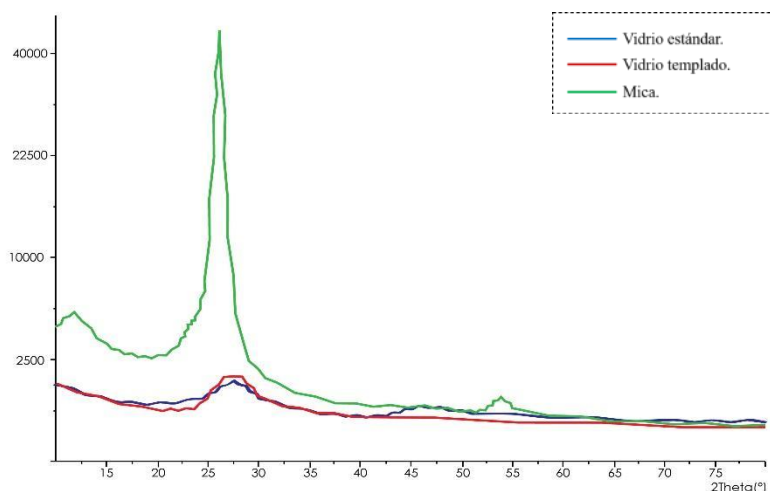


Figura 20. Difractograma de las piezas de vidrio estudiadas. Las muestras estándar (S) y templada (T) se observan próximas entre sí, al ser el mismo material el que las conforma. La mica (M) se despegue de ambas suponiendo diferencias en su composición presentando una variación considerable en el porcentaje de en la muestra.

De las curvas obtenidas observamos como la muestra de la mica se separa de las otras muestras resultado de una composición química distinta. Las dos curvas más cercanas corresponden al mismo material simplemente sometido a un proceso de templado por lo que su composición no difiere (Norma Técnica Complementaria de Diseño por Viento, 2017). Los porcentajes de elementos presentes en los distintos materiales se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de composición química para las muestras mediante difracción de rayos X.

		Vidrio Estandar	Vidrio Templado	Mica
		(%)	(%)	(%)
Oxigeno	O	43.17 ± 0.46	45.03 ± 0.06	23.17 ± 0.15
Silicio	Si	33.37 ± 0.98	34.40 ± 0.36	38.67 ± 0.55
Sodio	Na	9.20 ± 0.17	9.07 ± 0.06	---
Calcio	Ca	6.43 ± 0.15	6.17 ± 0.06	---
Estaño	Sn	3.37 ± 0.15	---	---
Carbono	C	2.20 ± 1.91	3.23 ± 0.49	37.97 ± 0.35
Magnesio	Mg	1.20 ± 0.00	1.27 ± 0.06	---
Alumino	Al	0.50 ± 0.00	0.53 ± 0.06	0.23 ± 0.21
Hierro	Fe	0.30 ± 0.00	---	---
Potasio	K	0.23 ± 0.06	0.27 ± 0.06	---
Titanio	Ti	---	0.07 ± 0.06	---

7.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.

Por medio del análisis de Resistencia a la Flexión en Tres Puntos se procede a encontrar los valores de esfuerzo límite, deformación límite y módulo elástico para las probetas de vidrio estándar (vidrio recocido), vidrio templado y mica. Para estas pruebas se utiliza un equipo Instron Corporation Series IX Automated Materials System.

Buscamos medir la magnitud en el aumento de la resistencia resultado del proceso de templado, así como evaluar si existen factores de tamaño relacionados a las imperfecciones propias del material.

Las probetas de Vidrio Arquitectónico están divididas en tres grupos de distinto espesor (6mm, 10 mm y 12 mm) con cinco especímenes cada uno respectivamente nombrado como se muestra en la Tabla 2 y etiquetados como se observa en la Figura 21.

Tabla 2. Categorización de las muestras a someterse a prueba de flexión a tres puntos.

Espesor		Número				
		1	2	3	4	5
Probetas de vidrio estandar (S)						
S06	6 mm	S06 - 01	S06 - 02	S06 - 03	S06 - 04	S06 - 05
S10	10 mm	S10 - 01	S10 - 02	S10 - 03	S10 - 04	S10 - 05
S12	12 mm	S12 - 01	S12 - 02	S12 - 03	S12 - 04	S12 - 05
Probetas de vidrio templado (T)						
T06	6 mm	T06 - 01	T06 - 02	T06 - 03	T06 - 04	T06 - 05
T10	10 mm	T10 - 01	T10 - 02	T10 - 03	T10 - 04	T10 - 05
T12	12 mm	T12 - 01	T12 - 02	T12 - 03	T12 - 04	T12 - 05

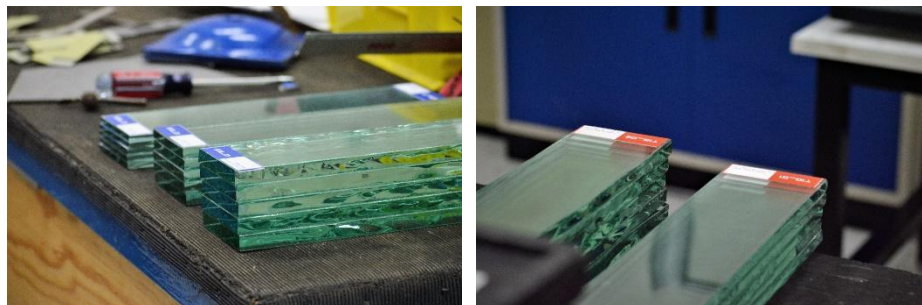


Figura 21. Paquetes de probetas de vidrio. A la izquierda vidrio estándar en tres espesores distintos (6, 10 y 12 mm.) A la izquierda vidrio templado en los mismos espesores.

Para las pruebas en la mica se utilizan cinco piezas del mismo tamaño (80x100 mm con 0.40 mm de espesor) de la gama comercial estándar existente en la ciudad de Chihuahua al momento de realizar el ensayo mostradas en la Figura 22.

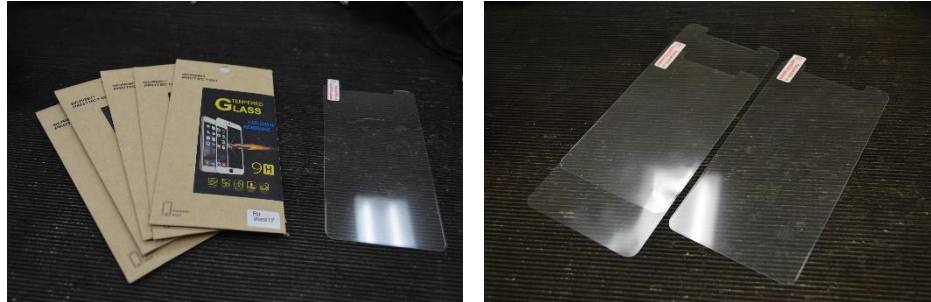


Figura 22. Probetas de mica protectora para Celular utilizadas en la prueba a flexión en tres puntos.

El equipo registra la fuerza límite a la que la pieza falla y utilizando las dimensiones de la pieza se calculan las magnitudes resultado de las siguientes formulas, desarrolladas en el capítulo 6.4 - *determinación de propiedades mecánicas para materiales frágiles mediante ensayos de flexión a tres puntos en elementos prismáticos* de este trabajo de investigación.

1. **Esfuerzo de flexión (σ_f).**

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} = \frac{PL(d/2)/4}{bd^3/12} = \frac{12PLd}{8bd^3} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

2. **Deformación a la flexión (ε_f).**

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

3. **Módulo elástico. (E)**

$$E = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} = \frac{3PL/2bd^2}{6Dd/L^2} = \frac{3PL^3}{12Dbd^3} = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

Donde:

- σ_f = Esfuerzo al centro de la fibra exterior. MPa.
- P = Carga en un punto dado de la curva esfuerzo-deformación. N.
- L = Distancia entre apoyos. mm.
- b = Ancho de la viga. mm.
- d = espesor de la viga. mm.
- M = Momento máximo al centro de la viga. N.
- c = Distancia del eje neutro a la fibra exterior. mm.
- ε_f = Deformación de la superficie.
- D = Máxima deflexión al centro de la viga. mm.
- E = Módulo de Elasticidad. GPa.

Cada pieza de vidrio arquitectónico estándar y templado se coloca entre dos apoyos a 250 mm de distancia, como se observa en la Figura 23, y se someten a un incremento de carga (A una velocidad de 5 mm/min.) concentrada al centro del claro para encontrar la fuerza que soporta hasta el momento de la falla. Se utiliza un perfil metálico cilíndrico en el punto de aplicación para que se realice de manera uniforme.



Figura 23. Imagen donde se muestra una probeta de vidrio estándar sobre los apoyos de la máquina de pruebas. Se aprecia el perfil circular colocado en el punto de aplicación de la carga para distribuir la fuerza uniformemente.

Observamos dos patrones de falla distintos entre cada variedad de vidrio arquitectónico registrados en las imágenes de la Figura 24. Para el vidrio estándar la pieza se fractura en el punto de aplicación de la carga, dividiendo la pieza en dos partes con bordes afilados. Por su parte, las piezas templadas llegan a la falla produciendo una explosión de la pieza en numerosas partes pequeñas con bordes redondeados, esto debido a la cantidad de fuerza residual en la pieza tras el proceso de templado.

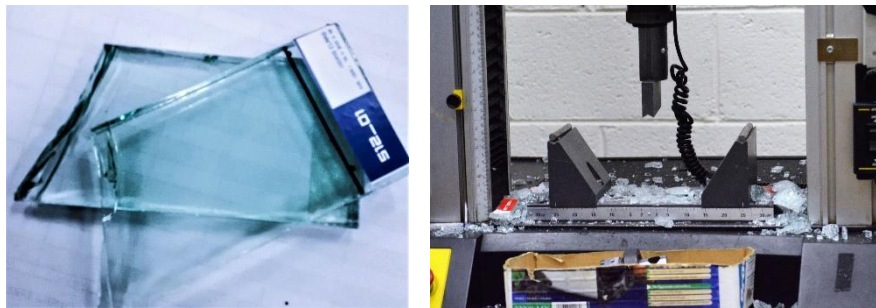


Figura 24. Imágenes que muestran patrones de falla de los materiales utilizados. A la izquierda vidrio estándar. A la derecha vidrio templado.

En la Tabla 3 se muestran los resultados para las pruebas de falla por flexión en las probetas de vidrio estándar. Al incrementar el espesor la pieza resiste mayor carga antes de llegar a la falla, yendo desde 424.65 N para 6 mm hasta 1,837 N en 12 mm. Sin embargo, cabe mencionar que las piezas de 10 mm de espesor mostraron valores más bajos de resistencia que las piezas de 6 mm de manera consistente en ambas variedades del material esto puede significar problemas relacionados con el lote de material suministrado para la prueba.

Tabla 3. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de vidrio estándar (S) para cada espesor estudiado.

	Carga límite	Esfuerzo límite	Deformación límite	Módulo de Elasticidad	Momento máximo
	(N)	(Mpa)	(%)	(Gpa)	(Nm)
S06 - Probetas de Vidrio Recocido de 6 mm de espesor.					
1	400.111	55.571	0.08%	65.904	25.007
2	467.287	64.901	0.10%	65.958	29.205
3	376.477	52.289	0.08%	64.205	23.530
4	472.582	65.636	0.10%	64.209	29.536
5	406.780	56.497	0.09%	63.722	25.424
Promedio	424.648	58.979	0.09%	64.799	26.540
D.E.	42.888	5.957	0.01%	1.052	2.681
S10 - Probetas de Vidrio Recocido de 10 mm de espesor.					
1	877.989	43.899	0.08%	51.726	54.874
2	1030.679	51.534	0.10%	52.694	64.417
3	891.130	44.557	0.09%	51.015	55.696
4	851.609	42.580	0.09%	49.852	53.226
5	902.996	45.150	0.09%	50.884	56.437
Promedio	910.881	45.544	0.09%	51.234	56.930
D.E.	69.640	3.482	0.01%	1.055	4.352
S12 - Probetas de Vidrio Recocido de 12 mm de espesor.					
1	1798.540	62.449	0.10%	64.891	112.409
2	1818.153	63.130	0.10%	64.202	113.635
3	1860.322	64.594	0.10%	65.498	116.270
4	1781.868	61.870	0.09%	66.861	111.367
5	1926.026	66.876	0.10%	65.765	120.377
Promedio	1836.982	63.784	0.10%	65.443	114.811
D.E.	57.757	2.005	0.00%	0.995	3.610

El esfuerzo límite también muestra un incremento proporcional a la carga que soporta la viga, los valores van de 59 MPa para una pieza de 6 mm de espesor hasta 63.8 MPa en 12 mm. La deformación límite permanece en un valor de 0.10 % constante para todos los espesores. El valor de momento máximo dependiente de la carga límite aumenta de 26.5 Nm en 6 mm a 115 Nm para 12 mm. Por último, el valor de módulo elástico correspondiente al vidrio estándar varía de 64.8 GPa en probetas de 6 mm a 65.4 GPa en 12 mm.

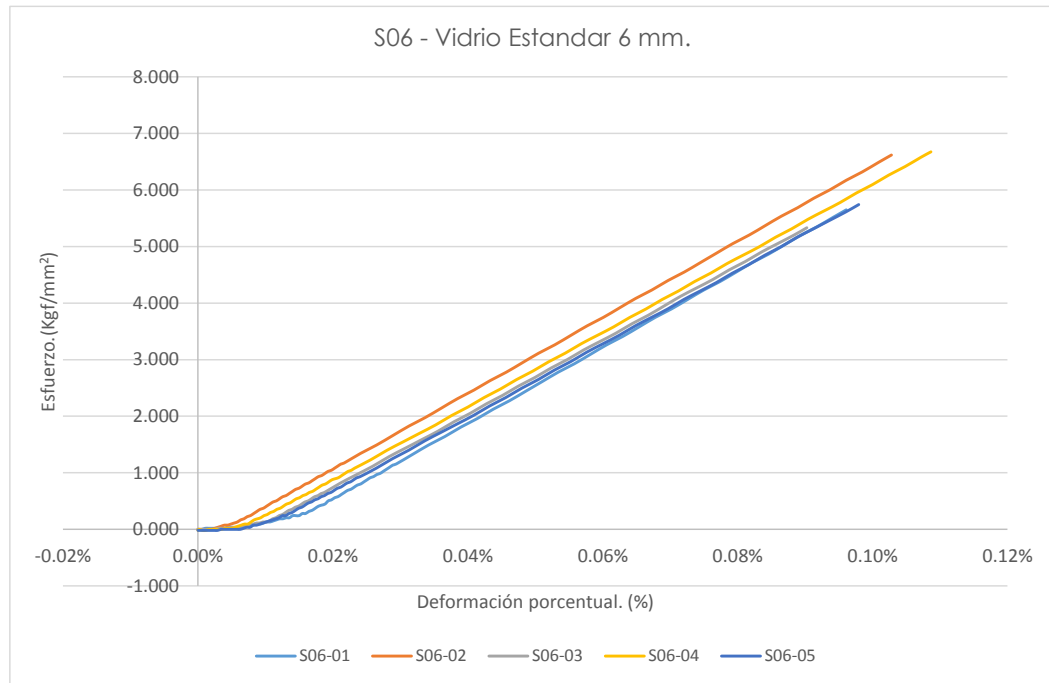


Figura 25. Gráfica esfuerzo (kgf/mm²) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 6 mm de espesor.

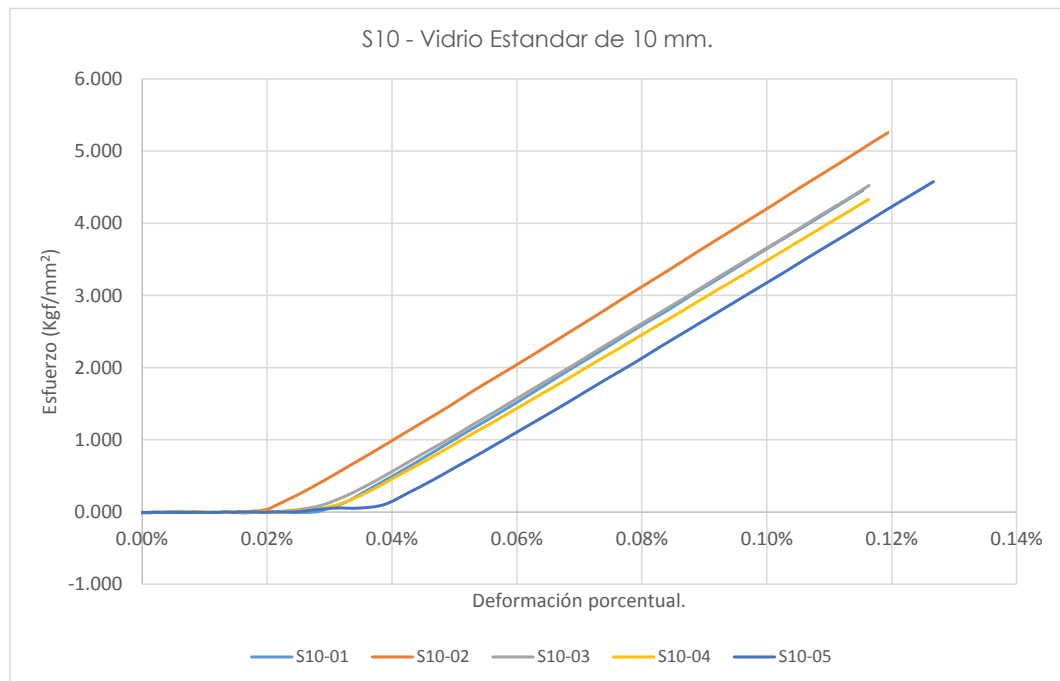


Figura 26. Gráfica esfuerzo (kgf/mm²) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 10 mm de espesor.

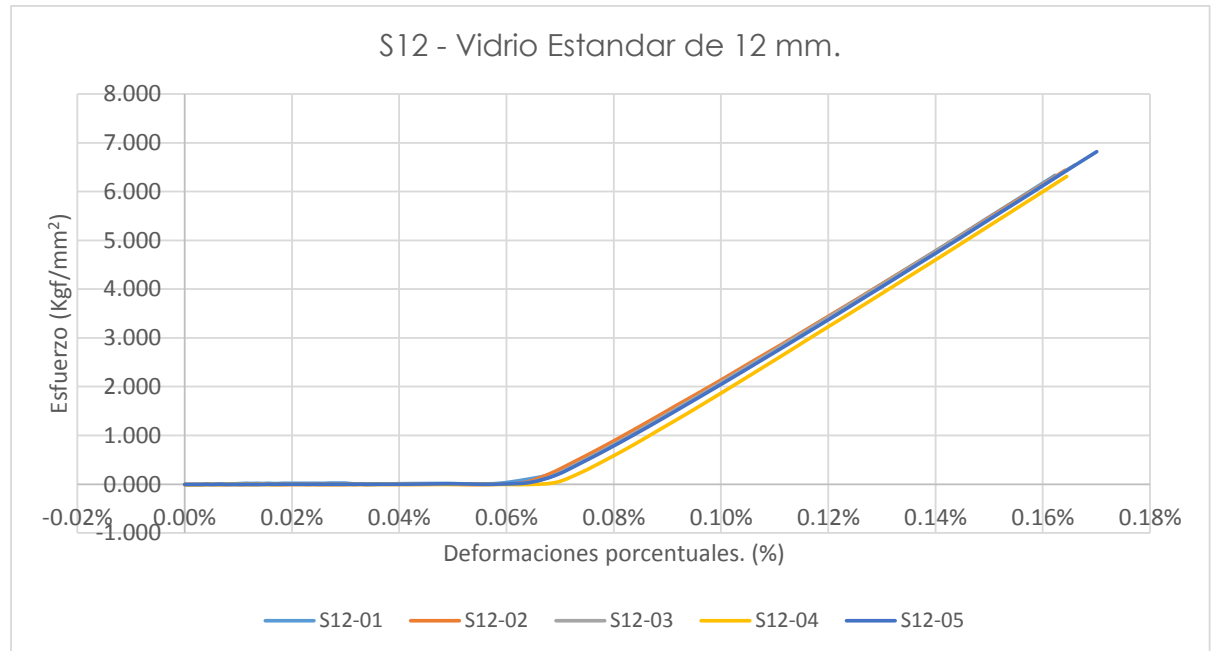


Figura 27. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio estándar con 12 mm de espesor.

Para las piezas templadas obtenemos el mismo patrón de resultados donde la fuerza se incrementa a medida que el espesor aumenta, desde 1.3 kN en espesor de 6 mm hasta 6.0 kN en 12 mm. Para el esfuerzo límite los resultados van de 185.8 MPa a 208.7 MPa. Tenemos en este caso momentos máximos variando en el rango de 83.6 Nm para 6 mm de espesor hasta los 375.8 Nm en el caso de los 12 mm. Todos valores mayores a las piezas estándar, esto gracias al proceso de templado. De igual forma, el valor para la deformación límite se mantiene constante en 0.30 %, valor mayor al caso del vidrio estándar, lo que demuestra que el proceso de templado da al material la capacidad de soportar mayor deformación antes de alcanzar la falla.

Cabe mencionar que de igual forma se observan valores más bajos de carga límite para las piezas de 10 mm de espesor. Sostenemos la hipótesis de que el lote de material en este espesor presenta problemas de calidad; recordemos que el vidrio es un material cuya estructura irregular propicia un comportamiento difícil de prever ante ensayos de falla. (ASKELAND, 1998) Esto hace primordial el énfasis en los controles de calidad en su proceso de fabricación.

Por último, tenemos valores para el módulo elástico que van de 63.3 GPa en promedio para espesores de 6 mm a 68.6 GPa en 12 mm. Tomando en cuenta todos los resultados tenemos un valor promedio de 62.21 GPa correspondiente al material de vidrio templado.

Tabla 4. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de vidrio templado.

	Carga límite (N)	Esfuerzo límite (Mpa)	Deformación límite (%)	Módulo de Elasticidad (Gpa)	Momento máximo (Nm)
T06 - Probetas de Vidrio Templado de 6 mm de espesor.					
1	1449.423	201.309	0.31%	64.125	90.589
2	1279.768	177.746	0.28%	64.199	79.985
3	1172.875	162.899	0.26%	61.631	73.305
4	1339.588	186.054	0.29%	63.888	83.724
5	1445.500	200.764	0.32%	62.533	90.344
Promedio	1337.431	185.754	0.29%	63.275	83.589
D.E.	116.865	16.231	0.02%	1.141	7.304
T10 - Probetas de Vidrio Templado de 10 mm de espesor.					
1	3180.297	159.015	0.30%	53.513	198.769
2	3408.792	170.440	0.32%	53.596	213.049
3	3196.968	159.848	0.30%	53.850	199.810
4	3581.389	179.069	0.33%	54.286	223.837
5	4026.610	201.331	0.34%	58.431	251.663
Promedio	3478.811	173.941	0.32%	54.735	217.426
D.E.	347.871	17.394	0.02%	2.088	21.742
T12 - Probetas de Vidrio Templado de 12 mm de espesor.					
1	4991.585	173.319	0.26%	67.751	311.974
2	6052.664	210.162	0.31%	68.568	378.292
3	6687.155	232.193	0.34%	69.065	417.947
4	5957.540	206.859	0.30%	68.794	372.346
5	6371.381	221.228	0.32%	68.912	398.211
Promedio	6012.065	208.752	0.30%	68.618	375.754
D.E.	638.525	22.171	0.03%	0.518	39.908

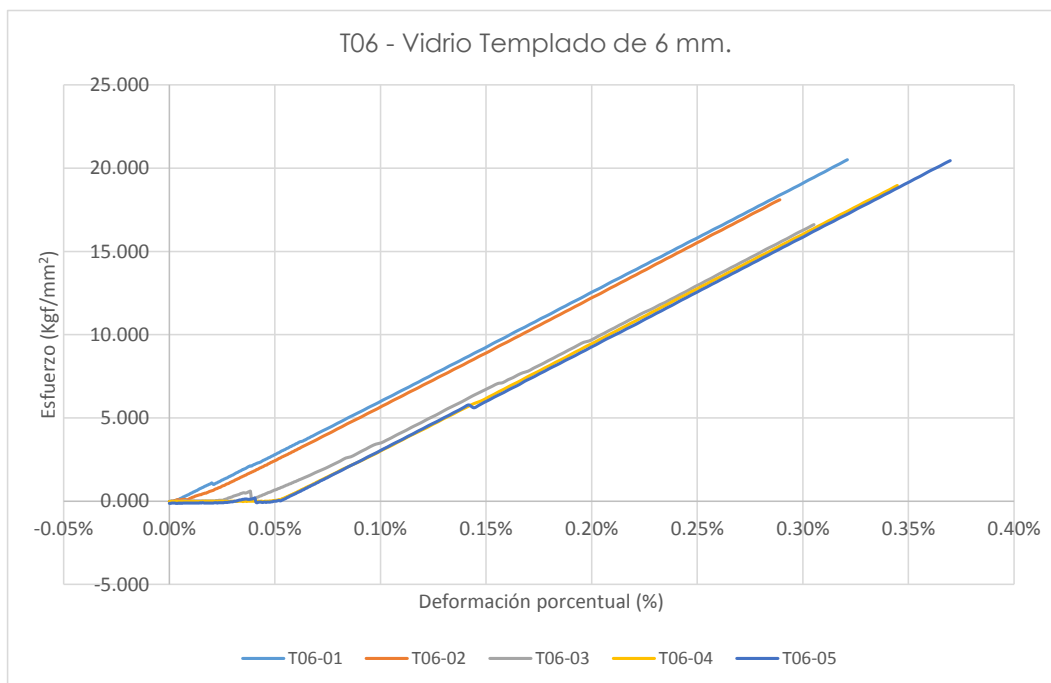


Figura 28. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 6 mm de espesor.

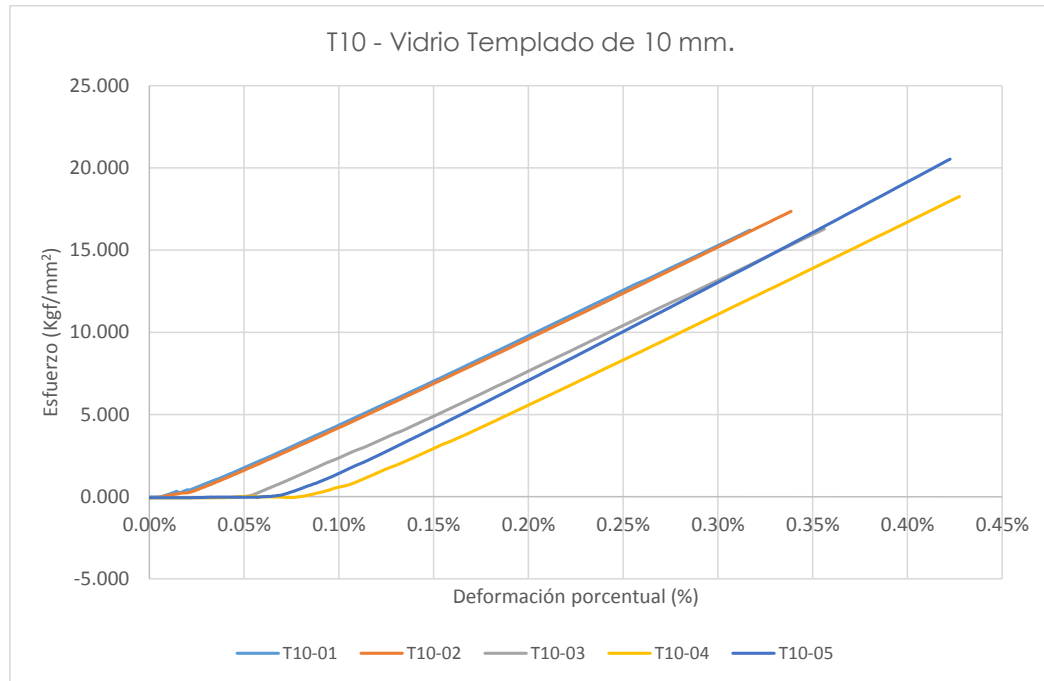


Figura 29. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 10 mm de espesor.

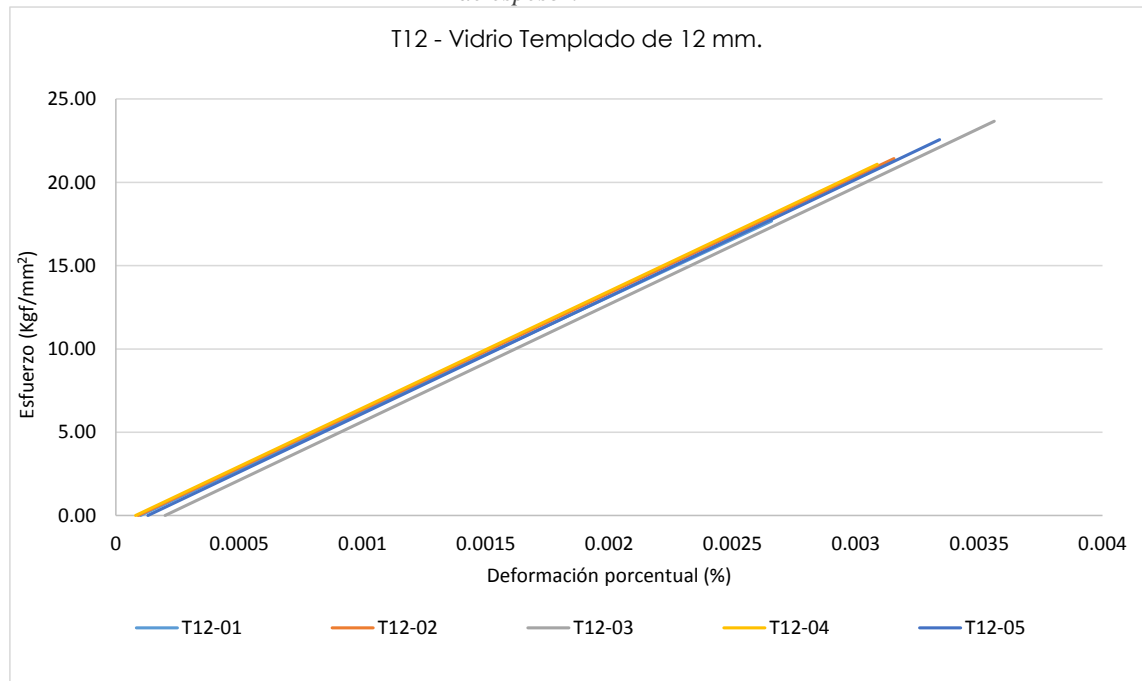


Figura 30. Gráfica esfuerzo (kgf/mm^2) – deformación porcentual para probetas de vidrio templado con 12 mm de espesor.

En los gráficos de esfuerzo – deformación, podemos observar que en las etapas iniciales de deformación no se observan registros del esfuerzo debido a que en la configuración de los elementos involucrados en la prueba se presentan juegos; al ajustarse estos elementos y comenzar la transmisión de los esfuerzos de forma más uniforme se comienzan a registrar valores de esfuerzo en las piezas, de ahí la dispersión de las líneas. Cabe recordar que la pendiente de estas rectas representa el valor del módulo elástico del espécimen estudiado, esta pendiente a simple vista se percibe consistente en las probetas estudiadas de vidrio arquitectónico.

Podemos revisar el conjunto de resultados promedio para las pruebas de resistencia a la flexión para vidrio arquitectónico, específicamente los resultados de esfuerzo límite y módulo elástico. Para el esfuerzo límite observamos que en las piezas de vidrio recocido (S06, S10 y S12) existe una relación más cercana entre los resultados. Los resultados para las variedades templadas (T06, T10 y T12) presentan mayor dispersión, esto apunta a que durante el proceso de templado las piezas pueden generar imperfecciones en su estructura que propicie mayor variabilidad en la respuesta. En cuanto al módulo elástico, la gráfica muestra claramente dos conjuntos de resultados uno correspondiente a las piezas de vidrio estándar y, por encima de éste, valores correspondientes a las piezas templadas.

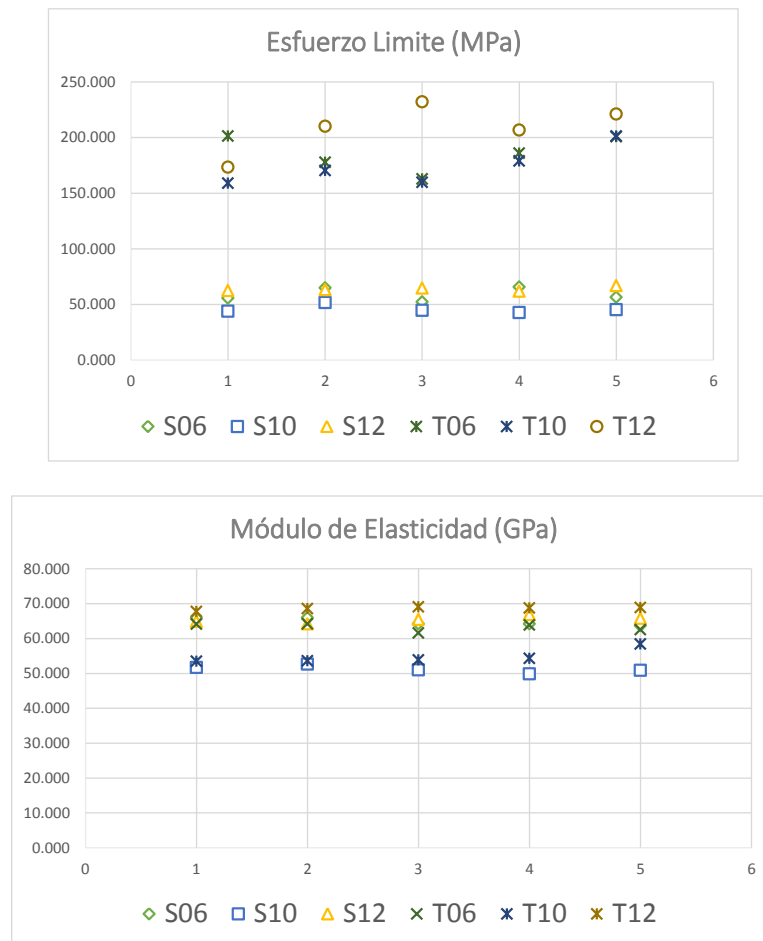


Figura 31. Arriba, Gráfica donde se compara el Esfuerzo Límite promedio para todas las clases de vidrio ensayado. Abajo, Gráfica donde se compara el módulo elástico para el conjunto de pruebas realizado en las dos variedades de vidrio arquitectónico.

Los resultados para las pruebas de flexión en tres puntos realizados en las probetas de mica protectora para celular se muestran en la siguiente tabla. Cabe recordar que este material está diseñado para resistir el impacto de fuerzas de menor escala. Tenemos como resultado una Carga Límite promedio de 16.3 N que es apenas un 4 % de la carga que soporta el vidrio recocido de 6 mm (425 N), y un 1 % de la que soporta el templado de 6 mm (1337 N). Sin embargo, al ser un material muy delgado, de apenas un 6 % del espesor del vidrio recocido y templado más esbelto revisado (6mm) el esfuerzo de las fibras límite de la sección se incrementa, teniendo un promedio de 191 MPa; Siendo casi 3 veces mayor que el del vidrio recocido más espeso revisado (12 mm con 64 MPa) y apenas 10 % por debajo del vidrio templado de mayor espesor (12 mm con 209 MPa).

Del mismo modo podemos observar que el material es más flexible, siendo 4 veces el valor del vidrio recocido y cercano al vidrio templado, estando por encima en un 25 %. Por último, el módulo elástico para el material de la mica en promedio es de 44.6 GPa que corresponde a un 70 % del valor promedio encontrado para las probetas de vidrio arquitectónico.

Tabla 5. Resultados de pruebas de flexión a tres puntos en probetas de mica protectora.

	Carga límite (N)	Esfuerzo límite (Mpa)	Deformación límite (%)	Módulo de Elasticidad (Gpa)	Momento máximo (Nm)
M01 - Probetas de Mica Protectora de Celular					
1	9.611	112.623	0.29%	39.390	0.240
2	16.769	196.516	0.50%	39.357	0.419
3	15.495	181.576	0.40%	45.193	0.387
4	17.946	210.307	0.41%	51.098	0.449
5	21.575	252.828	0.53%	47.911	0.539
Promedio	16.279	190.770	0.43%	44.590	0.407
D.E.	4.363	51.130	0.10%	5.200	0.109

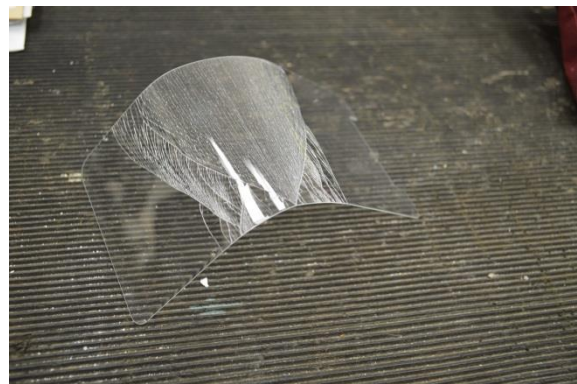


Figura 32. A la derecha proceso de prueba de Flexión a tres puntos de la mica protectora para celular. A la izquierda, pieza de mica después de la falla provocada por el ensayo de flexión a tres puntos.

7.4 PRUEBAS DE DUREZA MEDIANTE MICRO INDENTACIÓN. MÉTODO VICKERS.

En el siguiente estudio micro mecánico se evalúan las capacidades de resistencia a la fractura para tres tipos distintos de material: el vidrio estándar, el templado y la mica, cuyas composiciones químicas y respuestas a esfuerzos mecánicos de flexión se describieron anteriormente.

Se realiza una serie de indentaciones sobre la superficie de probetas con un área de 1 cm^2 , produciendo huellas de deformación plástica, debido a la naturaleza frágil del material no se espera que se produzca una gran cantidad de deformación elástica. Se utiliza un micro durómetro de Future Tech Corp. Modelo FM-810 que permite ajustar la magnitud de la carga para cada indentación.

Para la evaluación de los resultados se realiza una comparativa entre las distintas normas vigentes que utilizan el método de Vickers como base de cálculo. Dichas normas fueron descritas a detalle en el capítulo 6.5 - *Ensayos de resistencia a la fractura en materiales cerámicos por el método de indentación de vickers* y se resumen a continuación de este trabajo de investigación.

ACLM	$K_{ic} = 0.016 (E/H)^{0.5} (P/c^{1.5})$
	$K_{ic} = 0.0226 E^{0.5} P^{0.5} a/c^{1.5}$
ASTM	$K_{ic} = 0.0334 (E/H)^{0.4} (P/c^{1.5})$
	$K_{ic} = 0.044 E^{0.4} P^{0.6} a^{0.8}/c^{1.5}$
JIS	$K_c = 0.018 (E/HV)^{0.5} (P/c^{1.5})$
	$K_{ic} = 0.0264 E^{0.5} P^{0.5} a/c^{1.5}$

De donde definimos:

Dureza.	$H = 0.5 P/a^2$
Dureza Vickers.	$HV = 0.4636 P/a^2$

Y donde:

P = Carga de Indentación. (N)

E = Módulo elástico. (GPa)

a = d/2. 1/2 de la diagonal de la huella del indentedor. (um)

c = Longitud promedio de la grieta. (um)

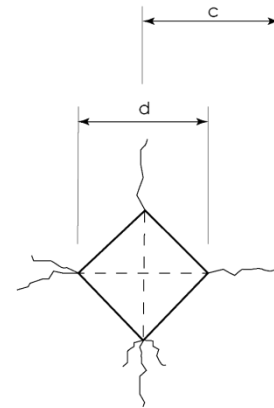


Figura 33. Esquema de una huella dejada por la indentación de una punta piramidal Berkovich.

En las imágenes de la Figura 34 se observan distintas indentaciones realizadas en las muestras estudiadas. El micro durómetro nos permite medir las dimensiones de la huella obtenida para el cálculo de la dureza del material. Posteriormente la dureza y el módulo elástico obtenido en el apartado anterior se utilizan para calcular los valores de resistencia a la fractura según las distintas normas. Observemos que dichas normas en general toman en cuenta las mismas relaciones entre las variables simplemente tienen distintos coeficientes y exponentes derivados de calibraciones y estadísticas de pruebas.

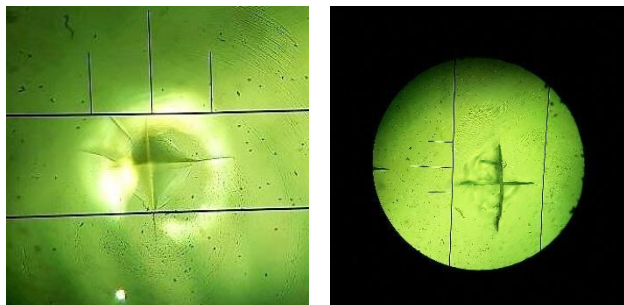


Figura 34. Indentaciones realizadas utilizando un micro durómetro con una punta piramidal. Se observa la huella dejada por el indentador y grietas que crecen radialmente desde el centro.

En la Tabla 6 se concentran las dimensiones de las diagonales resultado de las indentaciones realizadas en las muestras de vidrio arquitectónico. Este valor junto con la fuerza de indentación (en este caso 1 Kgf) son necesarios para calcular la dureza y dureza Vickers del material. Recordemos que ambos conceptos de dureza se describen en el capítulo 6.5 - *Ensayos de resistencia a la fractura en materiales cerámicos por el método de indentación de Vickers* y son necesarios para realizar los cálculos de resistencia a la fractura de las normas a evaluar.

Tabla 6. Dimensiones diagonales en huellas de indentación y cálculo de dureza para vidrio arquitectónico recocido y templado.

	HV (Gpa)	H (Gpa)	Longitud diagonal promedio (d)(um)	Media diagonal promedio (a) (um)	Diagonales (um)		
					1-2 [um]	1'-2' [um]	
Muestra Vidrio Estándar S06 - 01			P = 9.81 N				
1	4.35	4.69	64.70 ±	1.27	32.35	63.80	65.60
2	5.77	6.22	56.15 ±	0.49	28.08	56.50	55.80
3	5.46	5.89	57.70 ±	0.99	28.85	57.00	58.40
4	6.07	6.55	54.75 ±	1.20	27.38	55.60	53.90
5	5.36	5.78	58.25 ±	0.64	29.13	57.80	58.70
Promedio	5.40	5.83					
D.E.	0.65	0.70					
Muestra Vidrio Templado T06 - 01			P = 9.81 N				
1	4.46	4.81	63.85 ±	2.76	31.93	65.80	61.90
2	4.66	5.02	62.50 ±	0.57	31.25	62.10	62.90
3	4.58	4.94	63.00 ±	1.13	31.50	63.80	62.20
4	4.48	4.83	63.75 ±	0.35	31.88	64.00	63.50
6	4.80	5.18	61.55 ±	0.64	30.78	62.00	61.10
Promedio	4.67	5.03					
D.E.	0.22	0.23					

En general los resultados de dureza para el vidrio estándar son más altos que para el vidrio templado. Lo que habla de que el vidrio templado tiene menor dureza en su superficie y que viene de la mano con menor fragilidad, es decir, su superficie puede presentar mayor deformación antes de generar una falla.

En el caso de las indentaciones en el material de mica se requiere utilizar fuerzas más pequeñas para evitar grandes fracturas. La Figura 35 muestra el daño causado por una carga de 1 Kgf sobre el material donde es claro que el daño generado es demasiado y no permite tomar dimensiones de falla claras.



Figura 35. Indentación de 1 Kgf sobre una mica protectora de celular. Se observa el gran daño que causa esta carga sobre el material, lo que no permite obtener dimensiones claras de falla.

En la Tabla 7, se detallan los resultados para una carga de 4.90 N (0.5 Kgf) y de 2.94 N (0.3 Kgf). Al igual que en el caso anterior, las dimensiones de las diagonales de la huella dejada por el indentador se utilizan para evaluar los valores de Dureza y Dureza Vickers para el material.

Tabla 7. Dimensiones diagonales en huellas de indentación y cálculo de dureza para vidrio con aluminosilicatos utilizado como mica protectora de teléfonos celulares.

	HV (Gpa)	H (Gpa)	Longitud diagonal promedio (d)(um)	Media diagonal promedio (a) (um)	Diagonales (um)			
					1-2 [um]	1'-2' [um]		
<hr/>								
Muestra Mica			P =	4.90 N				
<hr/>								
1	0.64	0.69	119.15 ±	15.77	59.58	108.00	130.30	
2	0.44	0.47	144.05 ±	6.43	72.03	139.50	148.60	
3	0.68	0.73	115.65 ±	26.09	57.83	134.10	97.20	
4	0.43	0.46	145.85 ±	11.67	72.93	154.10	137.60	
5	0.57	0.62	125.80 ±	14.14	62.90	115.80	135.80	
Promedio	0.55	0.60						
D.E.	0.12	0.12						
<hr/>								
Muestra Mica			P =	2.94 N				
<hr/>								
1	1.19	1.29	87.30 ±	11.46	43.65	95.40	79.20	
2	1.24	1.34	85.70 ±	0.28	42.85	85.90	85.50	
3	1.28	1.38	84.45 ±	3.89	42.23	81.70	87.20	
4	1.44	1.55	79.50 ±	15.13	39.75	68.80	90.20	
5	1.36	1.46	81.90 ±	8.91	40.95	75.60	88.20	
Promedio	1.30	1.40						
D.E.	0.10	0.11						

Los valores nos permiten concluir que la mica es un material mucho más frágil que el vidrio de uso arquitectónico. Sus valores de dureza, en el rango de una décima parte de las muestras anteriores, hablan de su facilidad para generar fracturas aún sometido a pequeñas cargas. Cabe recalcar que esta variedad de material es diseñada con el fin de soportar cargas muy por debajo de las que un elemento arquitectónico experimentaría.

Para calcular los valores de resistencia a la fractura se registran por medio del micro durómetro la longitud de las cuatro grietas principales que nacen del centro hacia los vértices de la indentación y crecen radialmente hacia el exterior. Para las muestras de vidrio arquitectónico se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 8, donde se enlistan y promedian las longitudes. Observamos que el vidrio templado presenta longitudes de grieta del 50 % de las generadas en vidrio estándar, incluso observamos que en varios casos la indentación no genera grietas en algunas direcciones.

Tabla 8. Dimensiones de fracturas radiales de indentación y cálculo de fractura promedio para vidrio arquitectónico recocido y templado con una carga de 1 Kgf

Longitud de fractura promedio (c) (um)				Fracturas [um]			
				1	2	1'	2'
Muestra Vidrio Estándar S06 - 01				P = 9.81 N			
1	41.43 ±	10.79	34.00	30.70	47.80	53.20	
2	39.25 ±	9.29	41.60	43.00	46.70	25.70	
3	44.93 ±	2.25	42.60	45.70	47.70	43.70	
4	46.85 ±	2.40	50.30	46.40	45.90	44.80	
5	46.13 ±	5.44	40.00	43.30	51.90	49.30	
Promedio	43.72 ±	6.03					
Muestra Vidrio Templado T06 - 01				P = 9.81 N			
1	23.55 ±	1.91	-	24.90	22.20	-	
2	20.45 ±	2.78	17.90	20.00	24.40	19.50	
3	19.80 ±		-	-	19.80	-	
4	19.55 ±	0.35	-	19.80	19.30	-	
6	25.33 ±	4.33	23.90	21.90	30.20	-	
Promedio	21.74 ±	2.34					

Las grietas para las indentaciones sobre la mica se presentan desde el centro de la huella hasta puntos muy cercanos a los vértices de la proyección de la punta piramidal. Es decir, no se extienden más allá de la huella generada por el indentador, por lo tanto, su longitud promedio es similar a la longitud de la diagonal promedio. Cabe destacar que a pesar de la disminución en la carga la longitud de las grietas es similar a las generadas en el vidrio estándar.

Tabla 9. Dimensiones de fracturas radiales de indentación y cálculo de fractura promedio para mica protectora de teléfono celular con una carga de 0.5 Kg y 0.25 Kg respectivamente.

		Longitud de fractura promedio (c) (um)		Fracturas [um]			
				1	2	1'	2'
Muestra Mica		P = 4.90 N					
	1	59.58 ± 6.44		54.00	65.15	54.00	65.15
	2	72.03 ± 2.63		69.75	74.30	69.75	74.30
	3	57.83 ± 10.65		67.05	48.60	67.05	48.60
	4	72.93 ± 4.76		77.05	68.80	77.05	68.80
	5	62.90 ± 5.77		57.90	67.90	57.90	67.90
Promedio		65.05 ± 6.05					
Muestra Mica		P = 2.94 N					
	1	43.65 ± 4.677		47.70	39.60	47.70	39.60
	2	42.85 ± 0.115		42.95	42.75	42.95	42.75
	3	42.23 ± 1.588		40.85	43.60	40.85	43.60
	4	39.75 ± 6.178		34.40	45.10	34.40	45.10
	5	40.95 ± 3.637		37.80	44.10	37.80	44.10
Promedio		41.89 ± 3.24					

Los promedios de dureza, dureza Vickers y longitud de fractura, junto a la fuerza de indentación son las variables utilizadas por las normas a evaluar para obtener un valor de resistencia a la fractura. Estos cálculos se realizan utilizando los resultados de módulo elástico obtenidos en el capítulo anterior (60.5 GPa para vidrio estándar, 62.21 GPa para vidrio templado y 44.6 GPa para la mica) Los resultados para cada indentación y el promedio por muestra se observan en las Tablas 10 y 11.

Como se habló en el capítulo 6.5 - *Ensayos de resistencia a la fractura en materiales cerámicos por el método de indentación de Vickers* las variaciones entre los valores obtenidos por norma son hasta de un 60 % debido a que las fórmulas empleadas utilizan coeficientes y exponentes resultado de la estadística de diversos ensayos y de la calibración del equipo. Aun así, de forma general podemos observar que el vidrio templado posee mayores valores (3 veces más grandes que el vidrio estándar) de resistencia a la fractura, lo que habla de su incremento en tenacidad resultado del proceso de templado. Este proceso permite que el material se deforme más al aplicarle una fuerza puntual, generando fracturas más pequeñas en la superficie.

Tabla 10. Valores de resistencia a la fractura (K_{ifr}) calculados para cada indentación en muestras de vidrio arquitectónico y promedios, evaluados según metodología de tres normas distintas que utilizan el método Vickers.

	ACLM Kifr (MPa)	ASTM F2094 Kifr (MPa)	JIS R1607 Kifr (MPa)
Muestra Vidrio Estándar S06 - 01			
1	2.12	3.42	2.47
2	1.99	3.31	2.33
3	1.67	2.76	1.95
4	1.49	2.49	1.74
5	1.62	2.68	1.89
Promedio	1.78	2.93	2.08
D.E.	0.26	0.41	0.31
Muestra Vidrio Templado S06 - 01			
1	4.94	7.98	5.77
2	5.97	9.69	6.98
3	6.32	10.24	7.38
4	6.52	10.54	7.62
5	4.27	6.95	4.98
Promedio	5.60	9.08	6.55
D.E.	0.96	1.55	1.13

Como resultado del incremento en la tenacidad a la fractura producto del proceso de templado, el vidrio ofrece cualidades que hacen óptimo su uso con fines arquitectónicos. Siendo generalmente un material utilizado en elementos de envolvente que pueden recibir impactos de diversos elementos arrastrados por el viento; mayor resistencia a la penetración va de la mano con mayor resistencia a la rayadura de esta forma la cualidad translúcida del material se conserva en mejor medida.

Los resultados para la mica son muestra de que ésta es un material con menor tenacidad a la fractura por lo que sufre cuarteaduras, rayones y perforaciones con cargas más pequeñas. Los valores para una carga de 2.94 N están un 15 % por debajo de los valores para el vidrio recocido y más de un 30 % por debajo de los del vidrio templado. Hablando de un punto de vista arquitectónico un material con estas características de resistencia a la fractura no resulta óptimo debido a la exposición a la intemperie.

Tabla 11. Valores de resistencia a la fractura (K_{ifr}) calculados para cada indentación en muestras de mica y {promedios, evaluados según metodología de tres normas distintas que utilizan el método Vickers.

	ACLM Kifr (MPa)	ASTM F2094 Kifr (MPa)	JIS R1607 Kifr (MPa)
Muestra Mica Carga de 4.90 N			
1	1.37	1.89	1.60
2	1.25	1.65	1.46
3	1.39	1.93	1.63
4	1.24	1.64	1.45
5	1.33	1.82	1.56
Promedio	1.32	1.78	1.54
D.E.	0.07	0.13	0.08
Muestra Mica Carga de 2.94 N			
1	0.96	1.41	1.12
2	1.62	2.38	1.89
3	1.63	2.40	1.90
4	1.68	2.50	1.96
5	1.65	2.45	1.93
Promedio	1.51	2.23	1.76
D.E.	0.31	0.46	0.36

7.5 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FRACTURA MEDIANTE NANO INDENTACIÓN.

Por medio de nano-indentación se analizan las propiedades de dureza y módulo elástico a escala nano-métrica para los materiales de vidrio arquitectónico estándar (recocido) y templado, así como para la mica. Se determinará si a esta escala existen diferencias en el comportamiento mecánico que hemos observado hasta el momento en los materiales.

Para ello, se utiliza un equipo de nano indentación modelo G200 de Agilent Technologies con punta de geometría Berkovich con un radio de curvatura de 20 nm. El equipo realiza la prueba de indentación y computa los datos conforme a la teoría descrita en el capítulo 6.6 *Determinación De La Dureza Y Módulo Elástico Mediante Nano indentación*. A continuación, se definen las condiciones del estudio para el cálculo de la dureza y módulo elástico.

Tiempo de carga / descarga.	10 seg.
Tiempo de carga sostenida.	2 seg.
Carga máxima.	2 mN

Para el estudio utilizamos una punta Berkovich de diamante, de ahí que se definan los siguientes parámetros.

Ángulo de la mediatriz al borde. (θ)	65.27 °
Ángulo equivalente de punta cónica (ϕ)	70.32 °
Coef. de Poisson del indentador. (ν_i)	0.07
Módulo elástico del indentador. (E_i)	1,141 GPa
Coef. de forma efectiva. (ϵ)	0.75

El material a evaluar consiste en piezas de vidrio arquitectónico en muestras con un área de 1 cm. cuadrado. además de una variedad de mica protectora para teléfonos celulares. De ello se definen los siguientes parámetros.

Coef. de Poisson del material. Vidrio Arquitectónico (ν)	0.22
--	------

Las indentaciones se realizan en matrices de 4 x 4. Con distancia de 3 μm entre sí en ambos ejes. En la Figura 36 se muestra una captura de las indentaciones sobre una muestra de vidrio estándar.

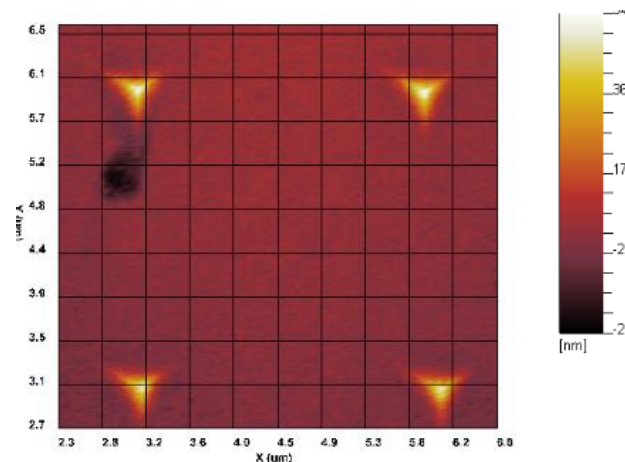


Figura 36. Matriz de indentaciones sobre una de las muestras. Las indentaciones se realizan a una distancia de 3 μm entre sí. La escala indica la profundidad de la huella en μm .

El equipo realiza el ciclo de carga y descarga con los parámetros antes descritos y recoge los resultados de carga, distancia de la penetración y tiempo del proceso. En la Tabla 12, se muestran los datos recabados en una de las indentaciones realizadas en la muestra de vidrio estándar. Se describe el proceso de carga en periodos de 0.50s aproximadamente. Observamos que el proceso va de cero a diez segundos incrementando la carga gradualmente hasta la definida carga máxima de 2.5 mN. Tras alcanzarla se realiza un periodo de carga sostenida de 2s donde se alcanza la penetración máxima en la muestra (134.21 nm) y se produce la descarga.

Tabla 12. Tabla de datos del Nanoindentador obtenidos durante el proceso de carga en la muestra de Vidrio Estándar (S).

Estatus	Penetración en la superficie. (nm)	Carga en la muestra. (mN)	Tiempo (s)
Inicia Ciclo de Carga.	0.00	0.00	0.00
	15.86	0.11	0.52
	27.06	0.23	1.00
	37.06	0.36	1.52
	45.60	0.48	2.00
	53.61	0.61	2.52
	60.37	0.73	3.00
	67.38	0.86	3.52
	73.37	0.98	4.00
	79.64	1.11	4.52
	85.25	1.23	5.00
	91.11	1.36	5.52
	95.50	1.48	6.00
	100.60	1.61	6.52
	105.19	1.73	7.00
	109.75	1.86	7.52
	114.12	1.98	8.00
	118.54	2.11	8.52
	121.96	2.23	9.00
	126.82	2.35	9.52
	130.19	2.46	9.96
Termina Ciclo de Carga.	130.35	2.47	10.00
	132.84	2.50	10.52
Carga Sostenida (2 seg.)	133.10	2.50	11.00
	133.49	2.50	11.52
	134.21	2.50	12.00
	134.10	2.50	12.04

La Tabla 13 muestra los datos recabados en el proceso de descarga de la muestra anterior. En este periodo el nano indentador retrocede, disminuyendo la carga aplicada y registrando la recuperación de la deformación elástica en la muestra, hasta alcanzar una penetración final, sólo de deformación plástica, menor a la máxima distancia de penetración alcanzada.

Tabla 13. Tabla de datos del Nanoindentador obtenidos durante el proceso de descarga en la muestra de Vidrio Estándar (S). Se realiza el cálculo de la pendiente en el periodo aprox. de 20 % tras iniciar la descarga.

Estatus	Penetración en la superficie. (nm)	Carga en la muestra. (mN)	Tiempo (s)		
Inicia Ciclo de Descarga.	132.70	2.42	12.52	...	
	130.56	2.30	13.00	0.04897	
	127.90	2.17	13.52	0.04899	
Aprox. 20 % del proceso de descarga.	125.46	2.05	14.00	0.05109	Pendiente $S = dp/dh$ (mN/nm)
	122.92	1.92	14.52	0.05494	
	120.74	1.80	15.00	0.04500	
	117.85	1.67	15.52	...	
	115.42	1.55	16.00		
	112.16	1.42	16.52		
	109.52	1.30	17.00		
	106.25	1.17	17.52		
	103.22	1.05	18.00		
	100.22	0.92	18.52		
	97.30	0.80	19.00		
	93.18	0.67	19.52		
	89.57	0.55	20.00		
	89.42	0.54	20.04		
	85.68	0.42	20.52		
	81.04	0.30	21.00		
Termina Ciclo de Descarga.	78.67	0.25	21.26		
	75.01	0.15	96.52		
	64.00	0.01	96.80		

Recordemos que la Rigidez de contacto (S) se define como la pendiente de la curva de descarga a un 20 % de distancia del punto de penetración máxima. Dada la tabla de valores obtenidos en el ciclo carga descarga, es posible definir este valor para cada indentación. Este se involucra en la definición de profundidad de contacto definida en el capítulo 6.6 como.

$$h_c = h_{max} - \epsilon \frac{P_{max}}{S}$$

Donde $P_{m\acute{a}x}$ corresponde a la carga definida al inicio de los ensayos en 2 mN. Y el coeficiente de forma efectiva (ϵ) definido anteriormente para la punta del indentador como 0.75. El valor $h_{m\acute{a}x}$ corresponde a la distancia de penetración máxima alcanzada en cada indentación, previa a la recuperación de la deformación elástica. En la Figura 37, se muestra una gráfica del ciclo carga – descarga para la muestra de Vidrio Estándar de los datos mostrados en las tablas anteriores.

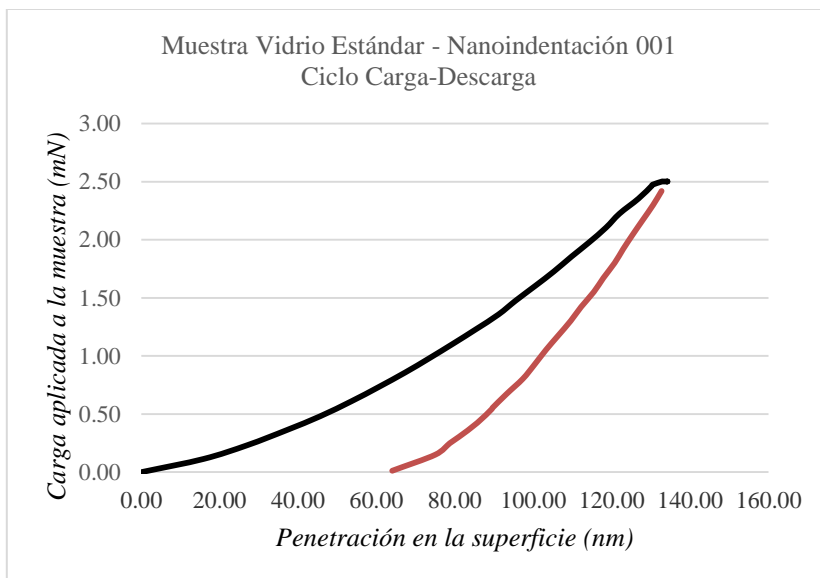


Figura 37. Gráfica Carga – Descarga, para la Nanoindentación 001 realizada en la muestra de Vidrio Estándar (S).

El valor para el área de contacto se obtiene mediante la relación mostrada a continuación que utiliza el valor de altura de contacto y el ángulo desde la mediatriz del indentador hasta su borde (en este caso de la punta Berkovich $\theta = 65.27^\circ$).

$$A(h_c) = 3\sqrt{3} h_c^2 \tan^2 \theta$$

$$A(h_c) = 5.1961 (4.7139) h_c^2$$

$$A(h_c) = 24.49 h_c^2$$

Esta definición de Área de Contacto se acerca al área de contacto ideal definida en el Capítulo 6.6. Partiendo de las definiciones para coeficiente de Poisson del material a evaluar ($\nu = 0.22$) y ángulo cónico equivalente ($\phi = 70.32$) realizadas con anterioridad se encuentra el valor para el coeficiente de corrección β utilizando la siguiente expresión.

$$\beta = \pi \frac{\left(\frac{\pi}{4} + 0.1548 \cot \phi \cot \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)}\right)}{\left(\frac{\pi}{2} - 0.8312 \cot \phi \cot \frac{(1-2\nu)}{4(1-\nu)}\right)^2} \text{ que para los valores dados resulta en } \beta = 1.0851$$

El equipo realiza las pruebas utilizando estos parámetros y proporciona los resultados mostrados en la siguiente tabla donde encontramos valores de módulo elástico, dureza y rigidez de contacto para cada indentación para las muestras de vidrio arquitectónico. Estas definiciones se relacionan con las dadas en el capítulo 6.6 y que se enlistan a continuación.

Módulo elástico reducido.
$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}}$$

Dureza de la muestra.
$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A_c}$$

Relación entre E_r y E .
$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$$

Los datos obtenidos para cada indentación se muestran en la Tabla 14. Estos se promedian para obtener valores por clase de material, por ejemplo, observamos un valor promedio de módulo elástico de 95.39 GPa para el vidrio estándar, mientras que para el vidrio templado se obtiene un valor de 94.09 GPa.

Tabla 14. Resultados para módulo elástico y dureza obtenidos de las nano indentaciones de 2.5 mN realizadas en vidrio arquitectónico estándar (S) y templado (T) por el nano indentador modelo G200 de Agilent Technologies.

	Módulo Elástico	Dureza	Desplazamiento	Carga	Rigidez de contacto
	GPa	GPa	nm	mN	N/m
Muestra de vidrio estandar (S)					
1	96.30	9.28	133.90	2.49	54368.00
2	98.00	9.28	133.50	2.50	55278.00
3	95.40	9.59	133.10	2.49	53016.00
4	94.80	9.31	134.30	2.49	53480.00
5	94.80	9.51	133.60	2.49	52949.00
6	95.50	9.66	132.70	2.49	52880.00
7	94.80	9.80	132.50	2.49	52121.00
8	97.70	9.68	132.00	2.49	53964.00
9	95.30	9.68	132.90	2.50	52760.00
10	93.20	9.30	134.80	2.49	52656.00
11	93.50	9.89	132.60	2.49	51192.00
Promedio	95.39	9.54	133.26	2.49	53151.27
D.E.	1.50	0.22	0.84	0.003	1104.69
Muestra de vidrio templado (T)					
1	93.3	9.15	135.4	2.49	53153
2	93.8	9.18	135	2.488	53334
3	96.5	9.21	134.1	2.489	54646
4	96.3	9.39	133.4	2.489	54056
5	92.6	9.02	136.1	2.489	53164
6	91.9	9.32	135.2	2.49	51912
7	93.3	9.49	134.1	2.488	52205
8	94.4	9.41	134	2.489	52985
9	92	9.11	136.1	2.491	52622
10	92.6	9.17	135.5	2.488	52742
11	93.5	9.31	134.9	2.496	52898
12	93.6	9.36	134.7	2.497	52823
13	94.5	8.98	135.7	2.491	54300
14	98.2	9.37	133.1	2.496	55149
15	95.3	9.28	134.4	2.495	53858
16	93.7	9.57	133.7	2.489	52161
Promedio	94.09	9.27	134.71	2.49	53250.50
D.E.	1.73	0.16	0.93	0.003	923.68

Los valores obtenidos resultan ser similares para ambas variedades del material. El módulo elástico promedio para vidrio templado es un 2.0 % más bajo que para el vidrio recocido. El valor de dureza difiere solo en un 3.0 %. La deformación máxima es muy similar si tomamos en cuenta que estamos hablando de desplazamientos a escala nano-métrica, con sólo 1.45 nm de diferencia en promedios. Con base en estos resultados observamos que a esta escala de estudio los materiales muestran comportamientos similares. El proceso de templado involucra un estado del material donde los esfuerzos residuales en la sección transversal generan cambios en su comportamiento mecánico, sin embargo, estos esfuerzos parecen no ser significativos al estudiar el material a tan baja escala.

También podemos ver la gran diferencia entre los valores obtenidos en las pruebas de flexión y estos, variando el módulo elástico de 60.50 GPa en pruebas macro-métricas en vidrio estándar a 95.39 GPa en pruebas nano-métricas. Debemos considerar que a escalas nanométricas el material presenta un comportamiento elástico donde recupera una parte de la deformación provocada por el indentador, en este caso hablamos del orden de los 53 nm, sin embargo, esta cantidad de deformación elástica no es significativa en la escala macro-métrica, donde el material se comporta de manera frágil llegando a la falla sin recuperar significativas cantidades de deformación.

En el caso de la muestra de mica, obtenemos los resultados mostrados en la Tabla 15. Primeramente, es importante anotar que la carga con la que se realizaron las indentaciones tuvo que ser disminuida considerablemente, de 2 mN utilizado en los casos anteriores a 0.05 mN en este caso, para evitar la excesiva proliferación de fallas.

Tabla 15. Resultados para módulo elástico y dureza obtenidos de las nano indentaciones de 0.05 mN realizadas en la mica protectora para teléfono celular por el nano indentador modelo G200 de Agilent Technologies

	Módulo Elástico	Dureza	Desplazamiento	Carga	Rigidez de contacto
	GPa	GPa	nm	mN	N/m
Muestra de Mica protectora (M)					
1	0.30	0.10	283.70	0.05	251.00
2	0.10	0.05	418.20	0.05	161.00
3	0.10	0.05	436.00	0.05	155.00
4	0.10	0.03	529.50	0.05	130.00
5	0.10	0.03	562.90	0.05	126.00
6	0.10	0.04	492.00	0.05	141.00
7	0.10	0.04	498.80	0.05	134.00
8	0.10	0.03	495.40	0.05	140.00
9	0.10	0.03	523.10	0.05	133.00
Promedio	0.12	0.04	471.07	0.05	152.33
D.E.	0.07	0.02	83.28	0.00	38.73

La metodología utilizada para obtener los resultados es la misma descrita en el caso anterior. Para este material obtenemos un valor de módulo elástico del orden de los 120 MPa. Una dureza de 40 MPa. Observamos una rigidez de contacto mucho menor (300 veces más pequeña) a la obtenida en vidrios arquitectónicos. Es notable que la penetración máxima alcanzada en este material es tres veces mayor. En conclusión, la mica estudiada mediante nano-indentación muestra un comportamiento más frágil al del vidrio arquitectónico. Consideremos que este material es fabricado con el fin de proteger un equipo celular de golpes que producen fuerzas con magnitudes mucho menores a las que pudiese exponerse cualquier elemento arquitectónico.

7.6 CONCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS MECÁNICOS

En la Tabla 16 se resumen los resultados de módulo elástico y dureza obtenidos de las pruebas realizadas mediante flexión a tres puntos, micro dureza Vickers y nano indentación en las dos clases de vidrio arquitectónico (recocido y templado) y en la mica. A forma de referencia se hace la comparación con Borosilicato Fundido y Acero.

Tabla 16. Resultados de las pruebas para los tres materiales estudiados a diferentes escalas mecánicas. Además se incluye los valores del Borosilicato y el Acero como referencia.

	MODULO E (Gpa)	DUREZA (Gpa)
VIDRIO ESTANDAR		
Pruebas en Macro	60.49	5.23
Pruebas en Nano	95.39	9.27
VIDRIO TEMPLADO		
Pruebas en Macro	62.21	4.66
Pruebas en Nano	94.10	9.27
MICA PROTECTORA		
Pruebas en Macro	44.6	1.32
Pruebas en Nano	0.10	0.04
BOROSILICATO FUNDIDO	64	4.5
ACERO	210	84

Los resultados obtenidos en el análisis de piezas de vidrio templado y vidrio estándar nos permiten comparar el comportamiento de ambos ante esfuerzos mecánicos. Es claro el incremento en la ductilidad que aporta el proceso de templado, como señalan los porcentajes de deformación elevándose de un 10 % en vidrio estándar a un 30 % en vidrio templado. Así mismo, su comportamiento de falla difiere considerablemente generando el vidrio estándar piezas grandes y de bordes afilados, mientras que el templado, debido a los esfuerzos residuales, una falla de forma abrupta produciendo piezas pequeñas y redondeadas dotándolo de un facto de seguridad clave en el desarrollo de elementos arquitectónicos cercanos al usuario.

La mica protectora es sin duda un material diseñado con objetivos muy distintos, a pesar de soportar mayor deformación por flexión, del orden del 40%, lo que brindaría ventajas en elementos estructurales debido a que los elementos dúctiles advierten posibles fallas con mayor claridad antes de llegar al estado límite, en todos los casos este límite sucede con cargas muy pequeñas, esto en conjunto con los resultados de las pruebas de indentación lo caracteriza como un material muy frágil, cuyas características de ligereza y ductilidad no compensan su baja resistencia. Pensar en un material de este tipo a escala arquitectónica significaría estudiar la producción de piezas más resistentes que puedan flexionarse a tal grado manteniendo un bajo peso. Además, el estudio del material presentó resultados que muestran un comportamiento aleatorio, como es en el caso de los estudios de nano-indentación, por lo que se requeriría de un refinamiento en su metodología de estudio.

El módulo elástico relaciona los esfuerzos y las deformaciones producidas, y es directamente proporcional a los primeros e inversamente proporcional a los últimos, por tanto, al incrementarse en las pruebas de vidrio templado nos habla de su mayor capacidad para resistir esfuerzos con menores deformaciones comparado al caso del vidrio estándar. Para la mica, estos valores son considerablemente más pequeños por lo que tiene un esfuerzo límite menor y se experimentan mayores deformaciones. Es interesante ver el incremento en el módulo elástico que arrojan las pruebas de nano-indentación, debido a que el comportamiento de la superficie en la que actúa la deformación producida por el indentador es en parte elástico, recuperándose en un porcentaje al retirar la carga. Así mismo, a esta escala el efecto del templado no es relevante debido a que para ello se deben involucrar los esfuerzos residuales presentes en toda la sección del espécimen.

8. DEFINICIÓN DE UN CASO PRÁCTICO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE VIDRIO TEMPLADO.

8.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.

Para concluir los estudios de esta tesis, el siguiente Caso de Estudio utiliza la información resultado de las pruebas mecánicas, como el criterio obtenido tras el estudio del material para revisar un proyecto conformado por elementos de vidrio, partiendo del modelo existente en el Museo Interactivo el Acertijo ubicado en la ciudad de Gómez Palacio, Durango, cuya estructura se conforma por costillas horizontales y verticales de vidrio laminado formado por dos placas de vidrio templado unidas con una capa de adhesivo a base de butiral de polivinilo (PVB). Las piezas se encuentran conectadas mediante un arreglo de herrajes de aluminio mediante conexiones perforadas, atornilladas con pernos de acero. La Figura 38 muestra imágenes del proceso de construcción del cubo de vidrio.



Figura 38. Etapas de construcción del cubo de vidrio ubicado en el Museo el Acertijo de la ciudad de Gómez Palacio, Durango.

El método a utilizar para evaluar el comportamiento del cubo de vidrio es un análisis de Elemento Finito, utilizando el programa COMSOL Multiphysics, en su módulo de mecánica estructural, que nos permite crear un modelo del arreglo de las piezas similar al mostrado en la Figura 39.

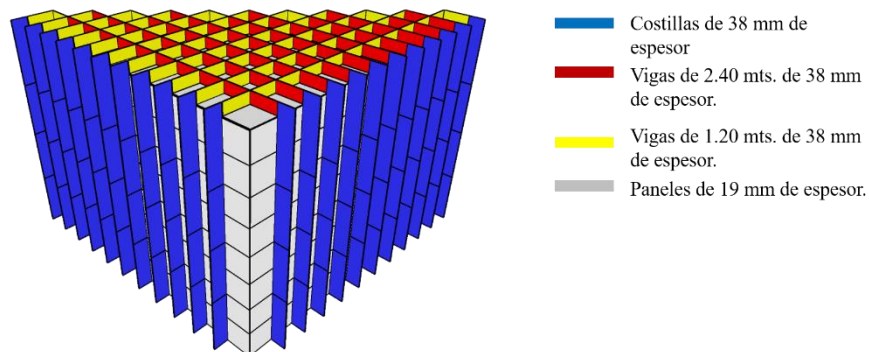


Figura 39. Esquema de distribución de los elementos principales de vidrio templado del arreglo a analizar.

Las caras que forman la envolvente del proyecto se encuentran compuestas por placas cuadradas de vidrio templado de 19 mm de espesor colocadas de forma horizontal sujetas al centro de sus lados por grapas de aluminio a un elemento viga. Se cuenta con tres distintos tipos de placa, según el número de conexiones a viga con las que cuentan.

Los elementos viga están formados por vidrio templado laminado de 38 mm (conformado por dos placas de 19 mm unidas con PVB) estas se separan en dos categorías, en un sentido elementos principales con longitud de 2.40 mts. En el otro sentido, elementos secundarios con una longitud de 1.20 m, que en conjunto forman el entramado rectangular de vigas que sostiene la cubierta y transfiere las cargas a las costillas verticales. Las conexiones por las cuales se unen estos elementos se observan en las Figuras 40, 41 y 42.

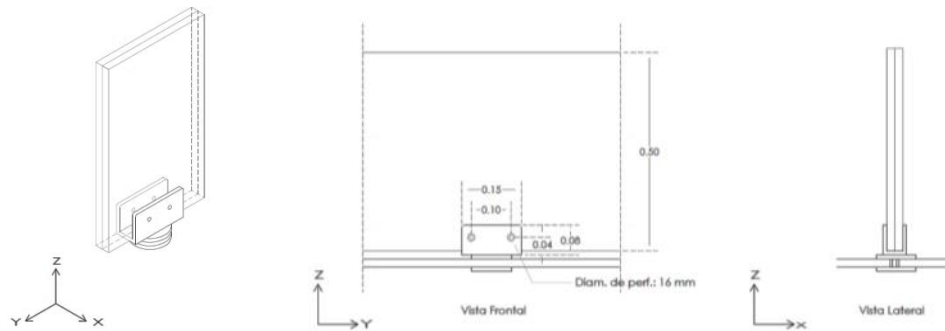


Figura 40. Esquema de conexión viga-placa en la cubierta horizontal del cubo de vidrio.

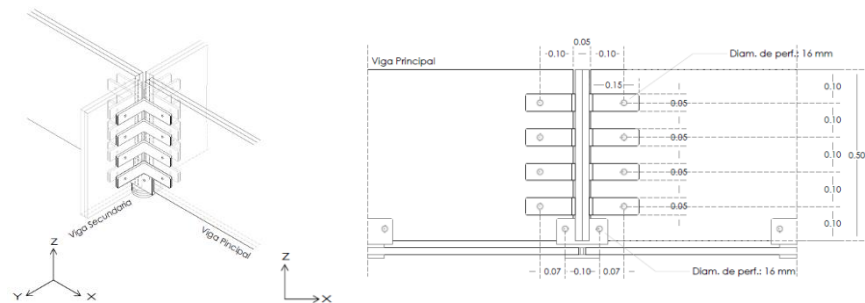


Figura 41. Esquema de conexión de los extremos de dos vigas secundarias con los extremos de dos vigas principales mediante herrajes de aluminio tipo ángulo.

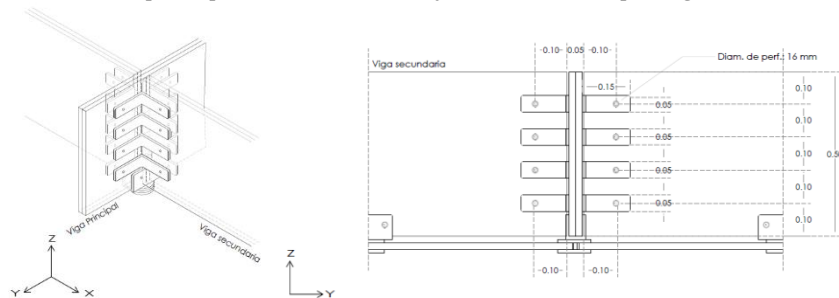


Figura 42. Esquema de conexión de los extremos de dos vigas secundarias al centro de una viga principal mediante herrajes de aluminio tipo ángulo.

Las costillas verticales se forman por cuatro elementos de vidrio laminado templado de 38 mm (conformado por dos placas de 19 mm unidas con PVB) sujetos entre sí mediante arreglos de herrajes rectos. El elemento superior se une al entramado de vigas de la cubierta y el inferior se fija a la superficie que sostiene la estructura mediante ángulos. Además, las costillas dan soporte a las placas de 19 mm de espesor que forman las caras verticales del cubo de vidrio. Estas conexiones se detallan en las Figuras 43, 44 y 45.

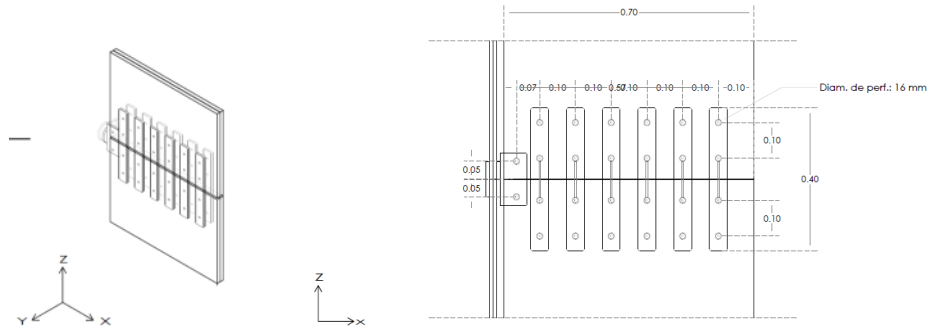


Figura 43. Esquema de la conexión entre piezas verticales del elemento costilla mediante herrajes rectos de aluminio.

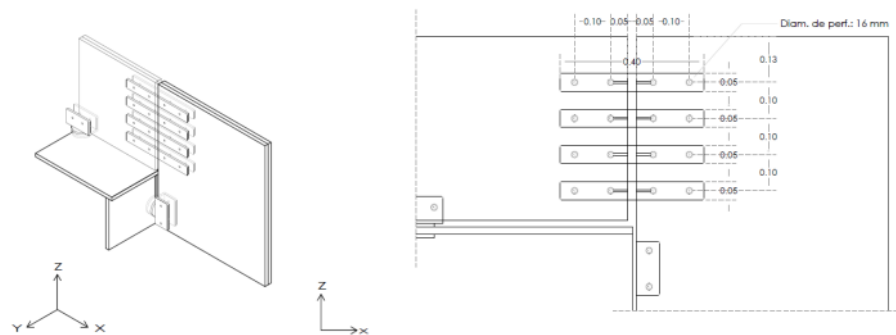


Figura 44. Esquema de la conexión de la pieza superior del elemento costilla con elemento tipo viga mediante herrajes rectos de aluminio.

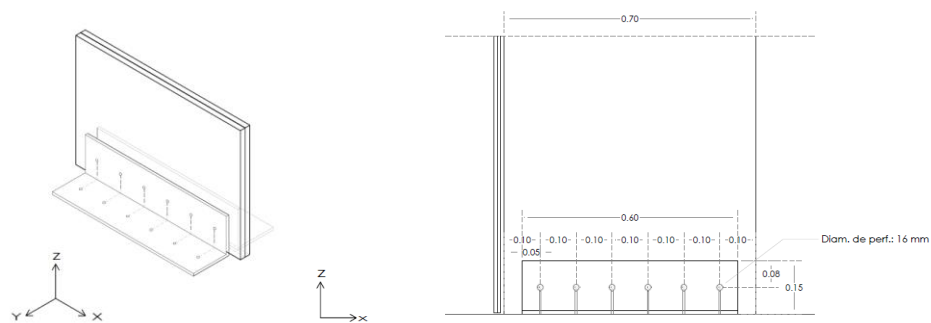


Figura 45. Esquema de conexión para la pieza inferior del elemento costilla al firme de la estructura mediante ángulos de aluminio.

8.2 CREACIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO EN COMSOL

Para realizar un modelo del arreglo anteriormente descrito se parte de identificar variables geométricas que controlen las dimensiones del cubo y la posición de sus elementos. Se busca generar un modelo paramétrico capaz de ser modificado con facilidad para evaluar el comportamiento de cubos de vidrio con la misma estructura arquitectónica, pero con distinta cantidad de elementos. En la Tabla 17 se enlistan y se describen los parámetros seleccionados definidos en el programa COMSOL Multiphysics y que se utilizan para identificar las dimensiones de la geometría a generar y los valores utilizados en los cálculos posteriores.

Tabla 17. Parámetros utilizados para construir el modelo paramétrico en COMSOL Multiphysics.¹

Nombre del parámetro	Descripción	Valor
n	Número de paneles por arista.	(Un número par)
Lp	Longitud del panel (mm)	1200
Lc	Ancho de costillas verticales (mm)	700
Lv	Altura de vigas (mm)	500
g	Espacio entre paneles (mm)	40
e	Espesor del vidrio*	0
La	Longitud de herraje ángulo (mm)	150
Ha	Altura de herraje ángulo (mm)	50
ga	Espacio entre ángulos en vigas (mm)	100
Lb	Longitud de herraje en la base (mm)	250
Lg	Altura de herraje grapa (mm)	150
Hg	Largo de herraje grapa (mm)	80
Lh	Largo de herraje de unión en costilla (mm)	400
Ht	Altura total del cubo	$((Lp+g)*n)-g$
na	Número de herrajes ángulos en vigas	$(Lv/ga)-1$
nh	Número de herrajes de unión en costilla	$(Lc/ga)-2$

La posición de los elementos se ve definida por estos parámetros manteniendo la estructura propuesta. Se muestra en las siguientes imágenes el proceso de modelado de un cubo con un arreglo de 4x4 paneles por cara (es decir, número de paneles $n = 4$). Se parte de la ubicación de los planos que conforman las caras del cubo, posteriormente y conforme a los parámetros descritos, se colocan los elementos costilla y se generan matrices de copias en las caras del cubo. Los herrajes se colocan en posición en cada unión de elementos tipo placa y de igual forma se generan arreglos de copias tomando como base los planos de las caras del cubo. El proceso antes descrito se ilustra en la Figura 46.

¹*El parámetro de Espesor de vidrio puede ser utilizado para colocar los herrajes en la posición real en la que se encuentran al tener entre sí ambas piezas de vidrio. Sin embargo, como el parámetro de espesor se define posteriormente los elementos que conforman herrajes se colocan sin separación en el modelo ($e = 0$).

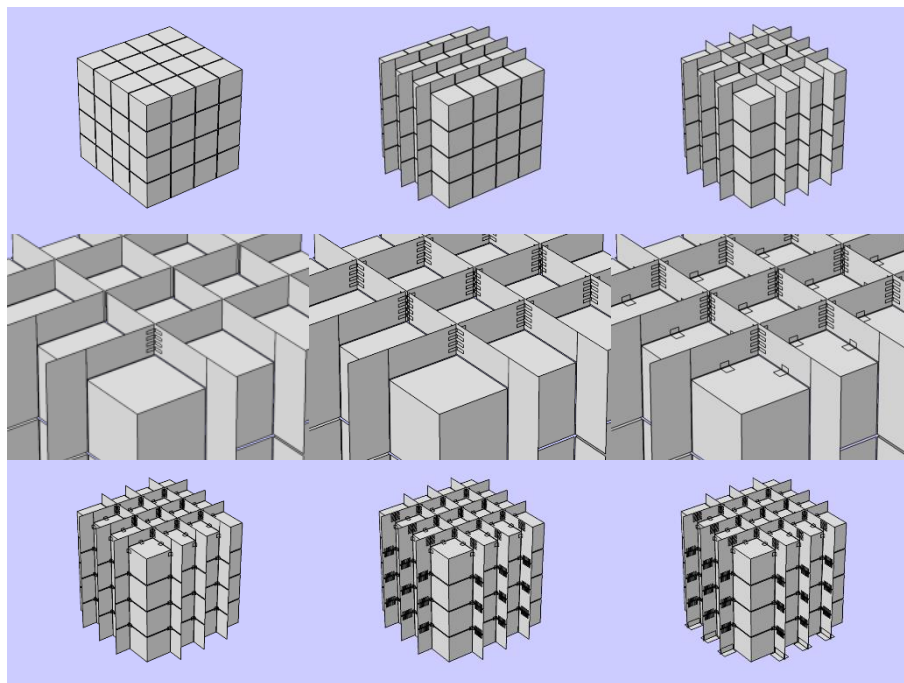


Figura 46. Imágenes que muestran los pasos en el proceso de modelado del cubo utilizando los parámetros antes descritos como generadores.

Al modificar el número de paneles, el número de los elementos tales como costillas y herrajes se ajusta. En la Figura 47 se muestran cubos generados con las dimensiones anteriormente mostradas en los que variamos el parámetro de Número de paneles (n) en 2, 4 y 8.

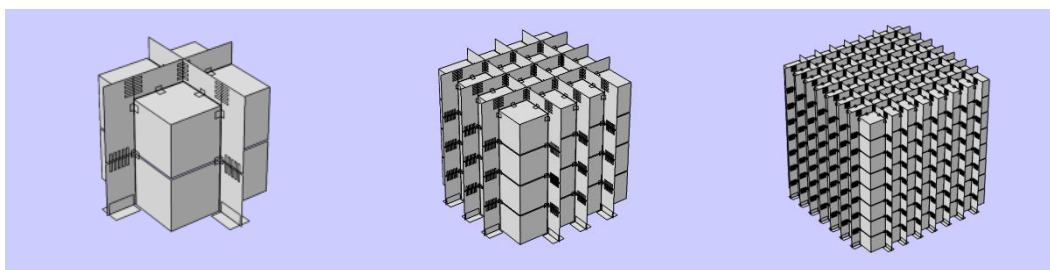


Figura 47. Cubos generados mediante el conjunto de parámetros antes descritos modificando la cantidad de paneles por lado en 2, 4 y 8.

8.3 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES DEL MODELO.

Los materiales para los elementos del cascarón (Shell) anteriormente generados dentro del programa COMSOL, se definen como materiales elásticos lineales.

Para los elementos de vidrio se define un material con características correspondientes al vidrio arquitectónico Saint Gobain, estudiado en capítulos anteriores de esta tesis, templado en la ciudad de Chihuahua, Chih. por Innova Glass S.A. de C.V. y cuyas propiedades mecánicas, resultado de esta investigación son:

<i>Módulo elástico</i>	<i>62.21 GPa</i>
<i>Densidad</i>	<i>2,500 Kg/m³</i>
<i>Coefficiente de Poisson</i>	<i>0.22</i>

Se define un segundo material para los elementos que forman los herrajes en las conexiones con las características mecánicas del aluminio.

<i>Módulo elástico</i>	<i>73.00 GPa</i>
<i>Densidad</i>	<i>2,700 Kg/m³</i>
<i>Coefficiente de Poisson</i>	<i>0.33</i>

Posteriormente se definen espesores (Thickness) que se asignan a cada elemento. En el caso de los elementos de vidrio tenemos un espesor de 19 mm para las placas que forman las caras del cubo tanto superior como laterales, y 38 mm para los elementos viga y costillas verticales. Todos los herrajes de aluminio compartirán un mismo espesor de 50 mm que toma en cuenta el espesor de los pares de herraje que se unen por medio del tornillo de acero.

Los estudios realizados parten de un modelo con $n = 8$ que genera dimensiones similares a las del cubo ubicado en el Museo el Acertijo, de la ciudad de Gómez Palacio Dgo.; Las condiciones de borde para el sistema consideran fijos (Fixed Constraint) los bordes de piezas al extremo del conjunto que no se conectan con otro elemento de vidrio sujetándose a otros elementos estructurales en sitio que limitan sus desplazamientos. Asimismo, los bordes de los herrajes que mantiene la estructura sujeta en su base se definen fijos, dichos bordes se encuentran señalados en la Figura 48.

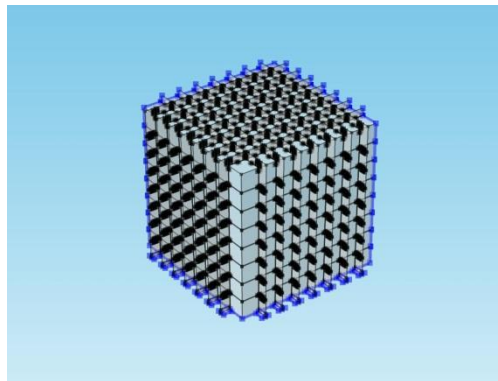


Figura 48. En azul se observan los bordes definidos como fijos (FixedConstraint) dentro de la estructura. Estos bordes están en contacto con otros elementos de la estructura que impiden sus desplazamientos y rotaciones.

8.4 DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN DE LAS CARGAS DE VIENTO.

Para un análisis incorporando la acción del empuje del viento en una de las caras laterales se utilizan los conceptos de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento publicadas en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México en 2017.

A continuación, se muestran los cálculos de los factores considerados por la norma para obtener la presión promedio del viento sobre la cara a barlovento del cubo. La velocidad de diseño, V_D es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos sobre la estructura o sobre un componente de la misma. La velocidad de diseño, en Km/h, se obtendrá de acuerdo con la ecuación.

$$V_D = F_T F_\alpha V_R \quad (8.4.1)$$

Dónde:

- F_T Es un factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante, es un factor adimensional.
- F_α El factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición locales, del tamaño de la construcción y de la variación de la velocidad con la altura, también es un factor adimensional.
- V_R La velocidad regional que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en Km/h.

Para este estudio tomaremos un $V_R = 136$ Km/h y factores $F_T = 1$ y $F_\alpha = 1.137$ (Norma Técnica Complementaria de Diseño por Viento, 2017). Dando como resultado una Velocidad de Diseño igual a 154.57 Km/h.

La presión del viento sobre la estructura viene definida, según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento, por la siguiente relación, donde C_p es un coeficiente adimensional que depende de la geometría de la estructura, y V_D es la velocidad de diseño, obtenida anteriormente.

$$P_z = 0.47 C_p V_D^2 \quad (8.4.2)$$

La presión que se obtiene con un C_p de 0.8 (pared perpendicular a barlovento) y V_D de 154.57 Km/h es igual a 8.98 kPa (917.44 Kg/m²). Esta, es la presión utilizada en el modelo en dirección de x para el estudio estático de la acción del viento, conservando las condiciones de frontera descritas anteriormente.

9. ESTUDIOS MECÁNICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.

9.1 CASO DE ESTUDIO 01: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO CON 6 mm DE ESPESOR.

9.1.1 ESTUDIO ESTÁTICO.

Fueron evaluados los esfuerzos producidos en el sistema de forma estática para las combinaciones de carga basadas en el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) según los estándares ASCE 7-16 Cargas de Diseño mínimas y criterios relacionados para Edificios y otras Estructuras descritas a continuación:

Caso A $1.4D$ (9.1.1)

Caso B $1.2D + 1.6L_r + 0.5W$ (9.1.2)

Caso C $0.9D + 1.0W$ (9.1.3)

Dónde:

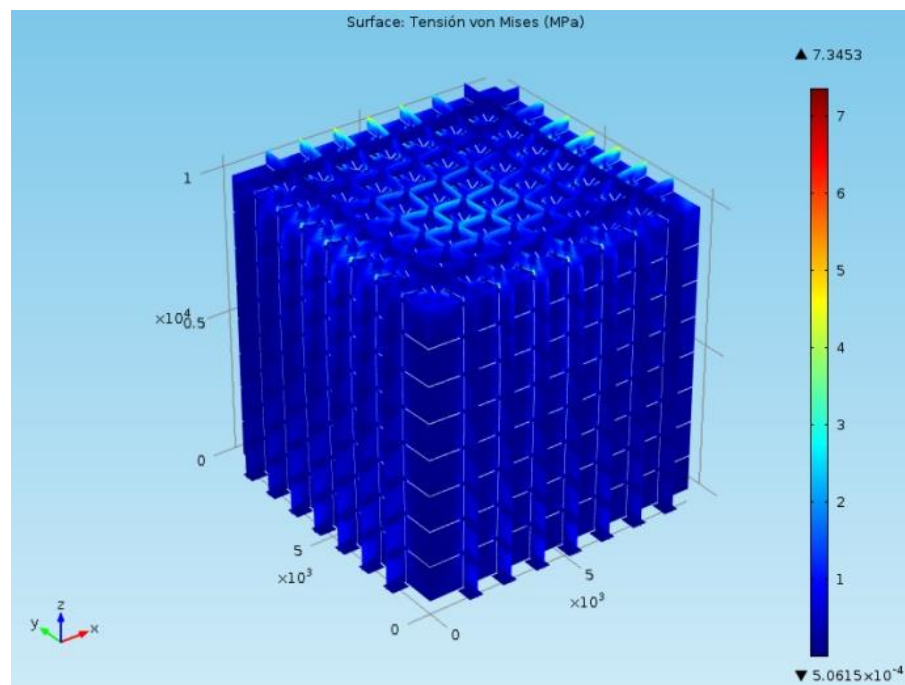
D = Carga Muerta.

L_r = Carga Viva de la cubierta.

W = Carga de Viento.

El primer estudio corresponde al *Caso A* para la condición de peso propio del sistema por un factor de 1.4. Se obtiene como resultado esfuerzos de Von Mises máximos de 7.34 MPa. Tomando como referencia los estudios mecánicos realizados tenemos un Esfuerzo Límite para el vidrio templado de 6 mm de 185.75 MPa, por lo que el sistema por sí mismo resiste su peso propio. El estudio también nos permite observar cómo la carga distribuida en el plano horizontal superior del sistema se concentra en los elementos costilla que trabajan redirigiendo las cargas.

Los esfuerzos mayores se presentan sobre los extremos superiores de la unión entre costillas horizontales y verticales como se observa en la Figura 49. Estos elementos que típicamente distribuyen las cargas muertas y de viento sufren esfuerzos en el sentido de su eje mayor, lo que resulta en la concentración de dichos esfuerzos en sus bordes. (NAVARRO, 2011).



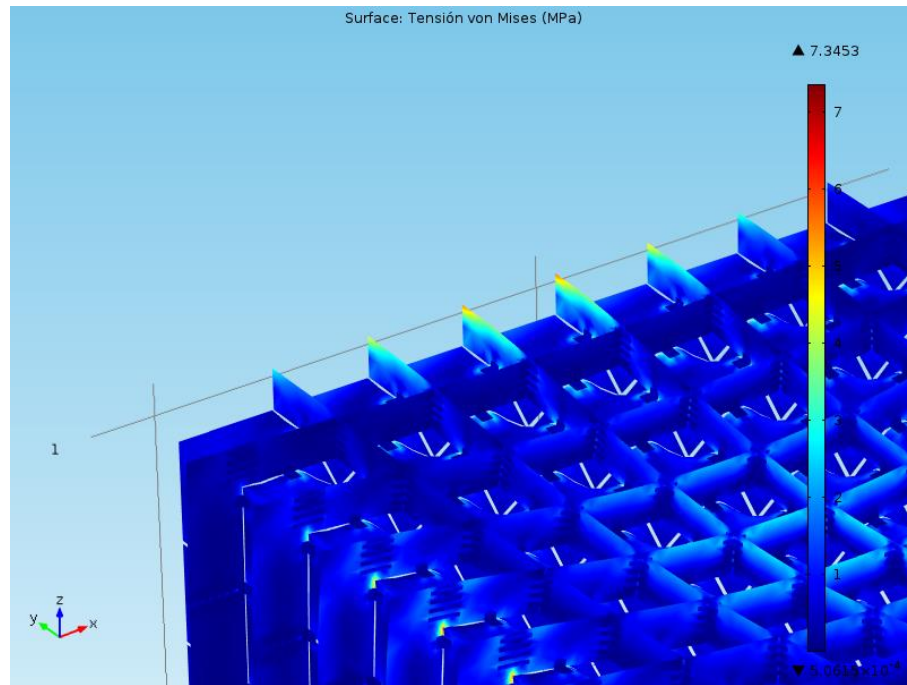


Figura 49. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera el peso propio de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

En cuanto a los valores de desplazamiento totales en las superficies obtenemos un máximo de 1.16 mm al centro de la cara superior del cubo como muestra la Figura 50, que para la placa central con 1.20 m de longitud corresponde a un 0.0096 % de deflexión. La Tabla 18 muestra los valores permitidos de deflexión límite para acristalamientos del Código Nacional Alemán como referencia (NAVARRO, 2011) Donde observamos que la deflexión presentada en este caso es permisible.

Tabla 18. Límites permitidos de deflexión para acristalamiento continuo del Código Nacional Alemán. (NAVARRO, 2011) (p. 25)

TIPO DE APOYO	DEFLEXIÓN LÍMITE	DEFINICIONES
VIDRIO SIMPLE	$d \leq L/100$	<i>L: longitud de la dirección de carga principal.</i>
VIDRIO LAMINADO Cuatro lados	$d \leq L/100$, y $d \leq t$	<i>t: Espesor del Vidrio.*</i>
Dos o tres lados	$d \leq L/100$, y $d \leq t$, y $d \leq 8 \text{ mm}$	<i>L: longitud del borde libre.</i> <i>t: Espesor del Vidrio.*</i>

* El espesor nominal del vidrio laminado de seguridad es :
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

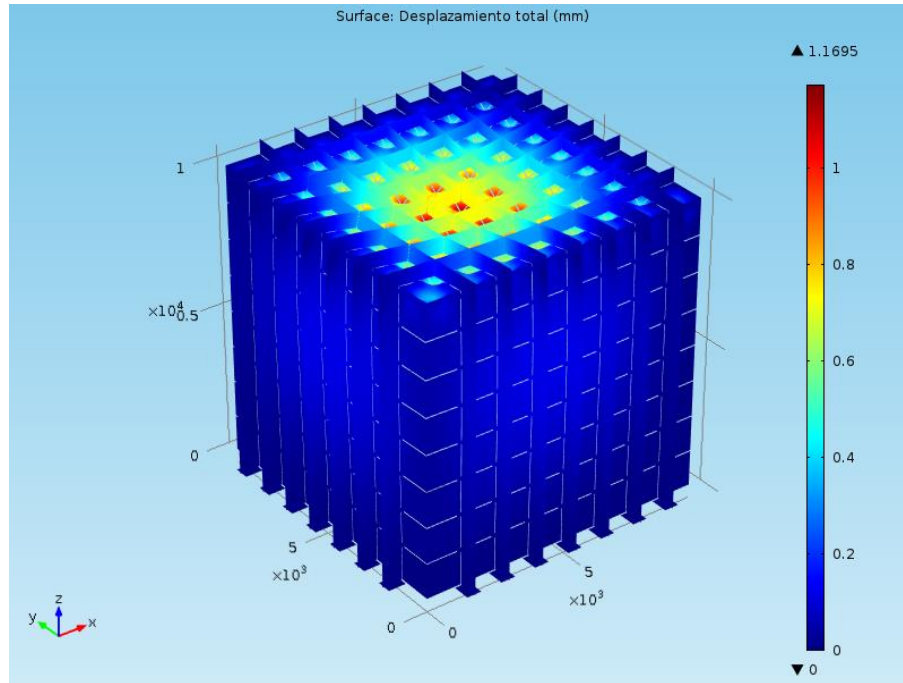
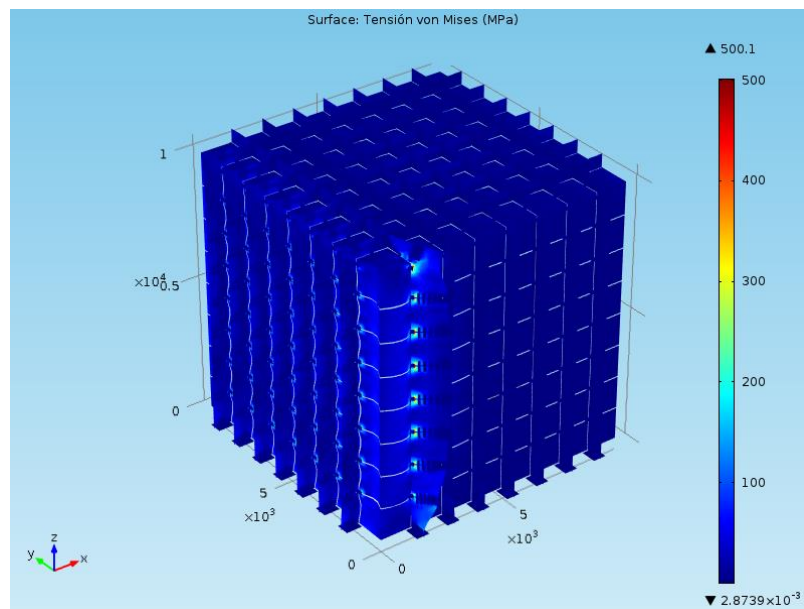


Figura 50. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera el peso propio de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

El segundo estudio corresponde al *Caso B* y considera la combinación de carga muerta y carga viva descrita en la *Ecuación 9.1.2*. La carga viva se representa como una fuerza normal en z de -9600.00 N/m^2 que actúa sobre la cara superior del cubo. La carga de viento se representa como una fuerza normal en x de 8980.00 N/m^2 . Los esfuerzos mayores resultantes para este caso son de 500 MPa distribuidos como se observa en la Figura 51, este esfuerzo está por encima del límite para el vidrio templado de 6 mm (185.75 MPa) por lo que la superficie cercana a estas uniones presentarán concentraciones de esfuerzos tales que inducirían una falla.



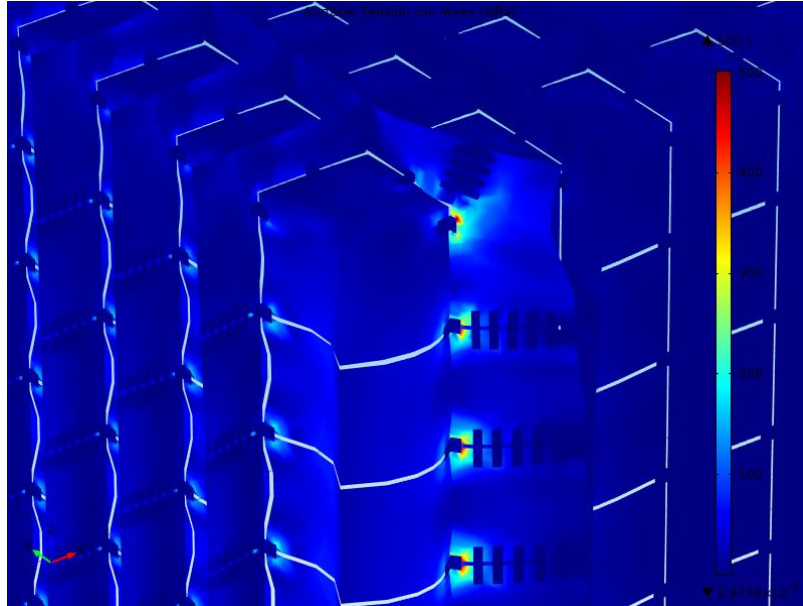
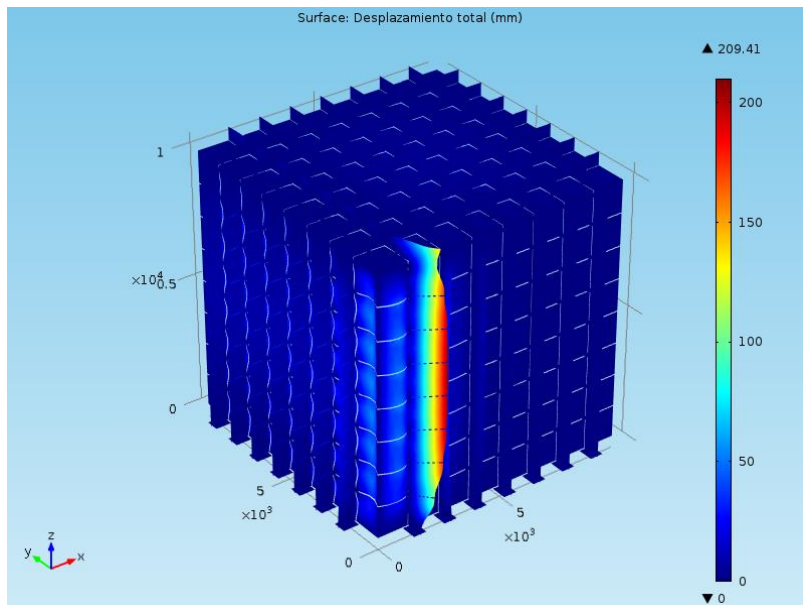


Figura 51. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y carga de viento de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

De igual forma los desplazamientos máximos para este caso son de 209.41 mm ocurriendo en el extremo de las costillas verticales que corresponden a un 70.0% de deformación. Así mismo, el centro de las placas expuestas a barlovento alcanzan deflexiones de 39.26 mm correspondientes con un 3.2 % de deformación. Dicha distribución de desplazamientos se puede observar en la Figura 52.



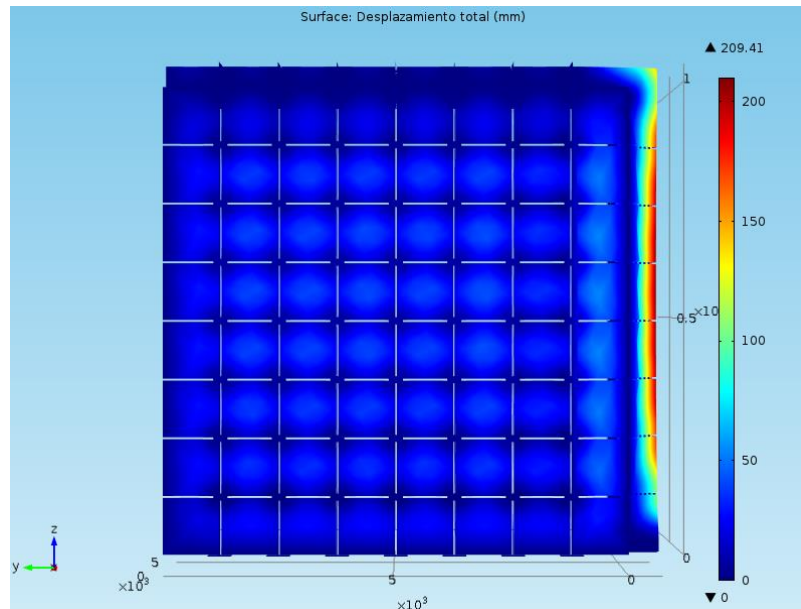


Figura 52. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y carga de viento de un Sistema con vidrio templado de 6 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

El espesor del vidrio para este sistema no cumple con las primeras dos condiciones de carga por lo que se procede a estudiar un espesor mayor en los elementos para cubrirlas y proceder a la última combinación.

9.2 CASO DE ESTUDIO 02: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO CON 12 mm DE ESPESOR.

9.2.1 ESTUDIO ESTÁTICO.

De igual forma, fueron evaluados los esfuerzos producidos en un sistema de 12 mm de espesor de forma estática para las combinaciones de carga basadas en el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) según los estándares ASCE 7-16 Cargas de Diseño mínimas y criterios relacionados para Edificios y otras Estructuras descritas en las Ecuaciones 9.1.1, 9.1.2 y 9.1.3

El primer estudio (Caso A en la Ecuación 9.1.1) para la condición de peso propio del sistema por un factor de 1.4 se muestra en la Figura 53, da como resultado esfuerzos de Von Mises máximos de 10.64 MPa. Tomando como referencia los estudios mecánicos realizados tenemos un Esfuerzo Límite para el vidrio templado de 12 mm de 208.75 MPa, por lo que el sistema resiste. El estudio también nos permite observar cómo, al igual que en el caso de la estructura con vidrio de 6 mm de espesor, la carga distribuida en el plano horizontal superior del sistema se concentra en los elementos costilla que trabajan redirigiendo las cargas.

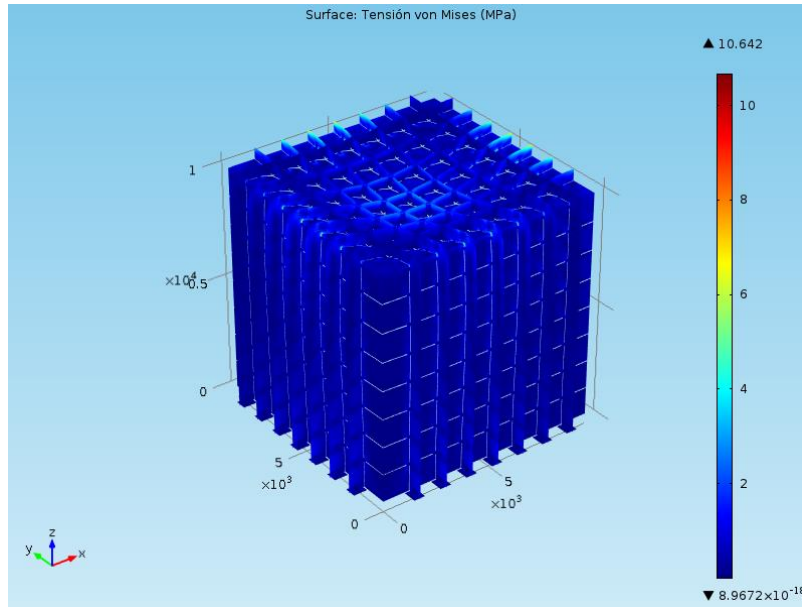


Figura 53. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

En cuanto a los valores de desplazamiento totales en las superficies obtenemos un máximo de 0.99 mm al centro de la cara superior del cubo como muestra la Figura 54, que para la placa central con 1.20 m de longitud corresponde a un 0.0083 % de deflexión. Según la Tabla 18 se acepta un máximo de 12 mm por lo que la deformación es permisible. También, se puede observar en la Figura 30 una mayor distribución de los desplazamientos desde la cara superior del cubo hacia los elementos costilla horizontales.

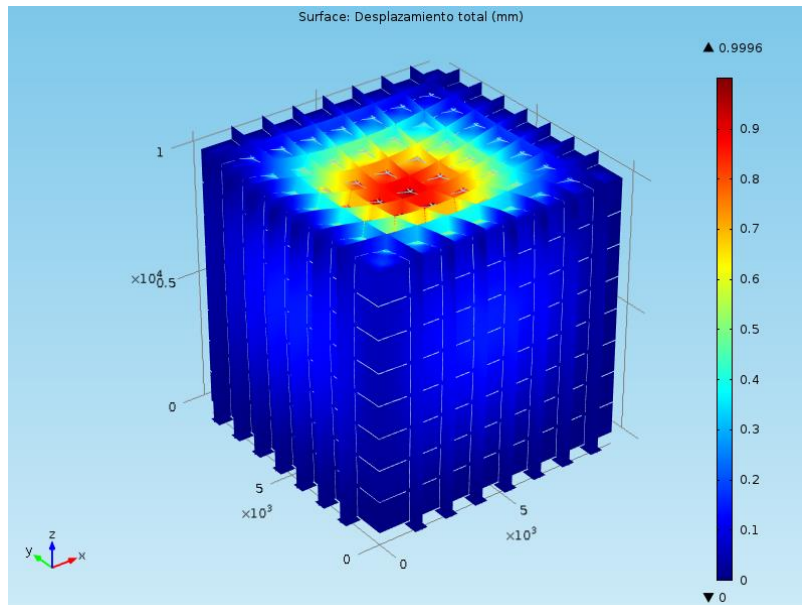


Figura 54. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

El siguiente estudio estático (Caso B de la *Ecuación 9.1.2*) toma en consideración las acciones de una carga viva de cubierta (L_r) y del viento (W).

Para este caso de estudio estático los esfuerzos mayores se presentan en las uniones de la costilla vertical perpendicular a la dirección del viento que en este caso es una fuerza en dirección de x , como se observa en la Figura 55, y son del orden de los 134.53 MPa, por debajo de los 208.75 MPa de esfuerzo límite observado en las pruebas mecánicas efectuadas.

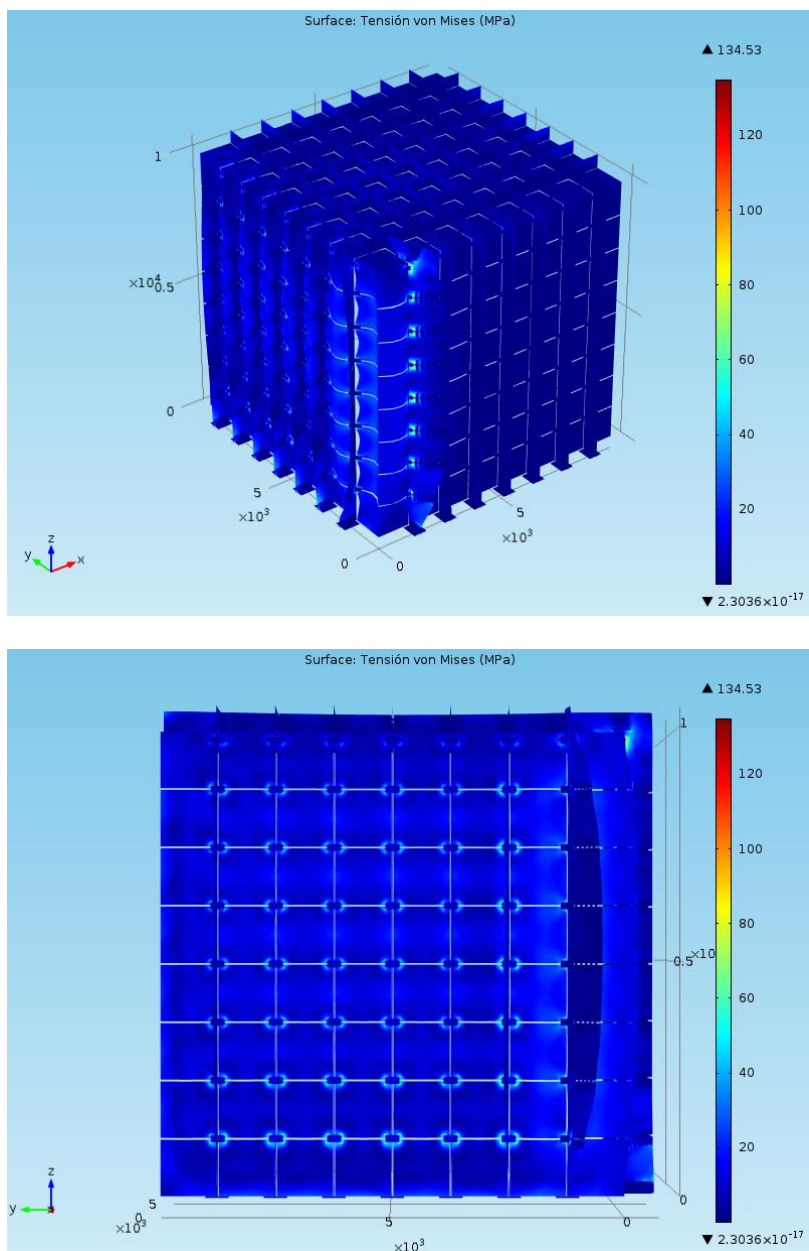


Figura 55. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

Sin embargo los desplazamientos máximos para este caso de estudio, mostrados en la Figura 56, son de 27.88 mm ocurriendo en el extremo de las costillas verticales que corresponden a un 9.2% de deformación según la Tabla 18 sólo un desplazamiento de 7 mm sería aceptable en este caso, por lo que el sistema no resulta aceptable para esta condición de carga. Se procede a estudiar un espesor mayor en los elementos para cubrirlos y proceder a la última combinación.

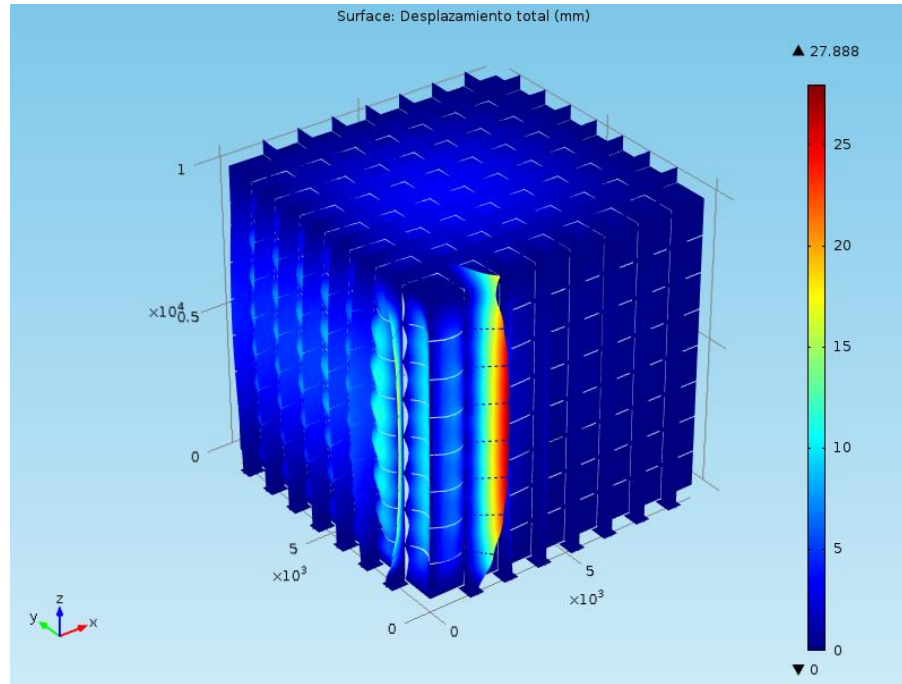


Figura 56. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado de 12 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

9.3 CASO DE ESTUDIO 03: ELEMENTOS DE VIDRIO TEMPLADO LAMINADO CON VIDRIO DE 19 mm DE ESPESOR.

9.3.1 ESTUDIO ESTÁTICO.

Continuando con el análisis, fueron evaluados los esfuerzos producidos en el sistema de forma estática para las combinaciones de carga basadas en el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) según los estándares ASCE 7-16 Cargas de Diseño mínimas y criterios relacionados para Edificios y otras Estructuras de acuerdo a las Ecuaciones 9.1.1, 9.1.2 y 9.1.3.

En esta ocasión el sistema está constituido por placas de vidrio templado de 1.20 x 1.20 mts de 19 mm de espesor y costillas de vidrio laminado compuesto por dos piezas de 19 mm de vidrio templado unidas por PVB. Tomando como referencia los estudios mecánicos realizados podemos realizar una extrapolación lineal para determinar un valor de esfuerzo máximo para el vidrio de 19 mm.

$$\sigma_{19} = \sigma_6 + \frac{19 - 6}{12 - 6}(\sigma_{12} - \sigma_6)$$

$$\sigma_{19} = 185.75 + \frac{13}{6} (208.75 - 185.75)$$

$$\sigma_{19} = 185.75 + \frac{299}{6}$$

$$\sigma_{19} = 235.58 \text{ MPa}$$

El primer estudio para la condición de peso propio del sistema por un factor de 1.4, da como resultado esfuerzos de von Mises máximos de 8.00 MPa distribuidos como se observan en la Figura 57. Por sí mismo, el sistema es estable ya que el esfuerzo es por mucho menor al límite del material.

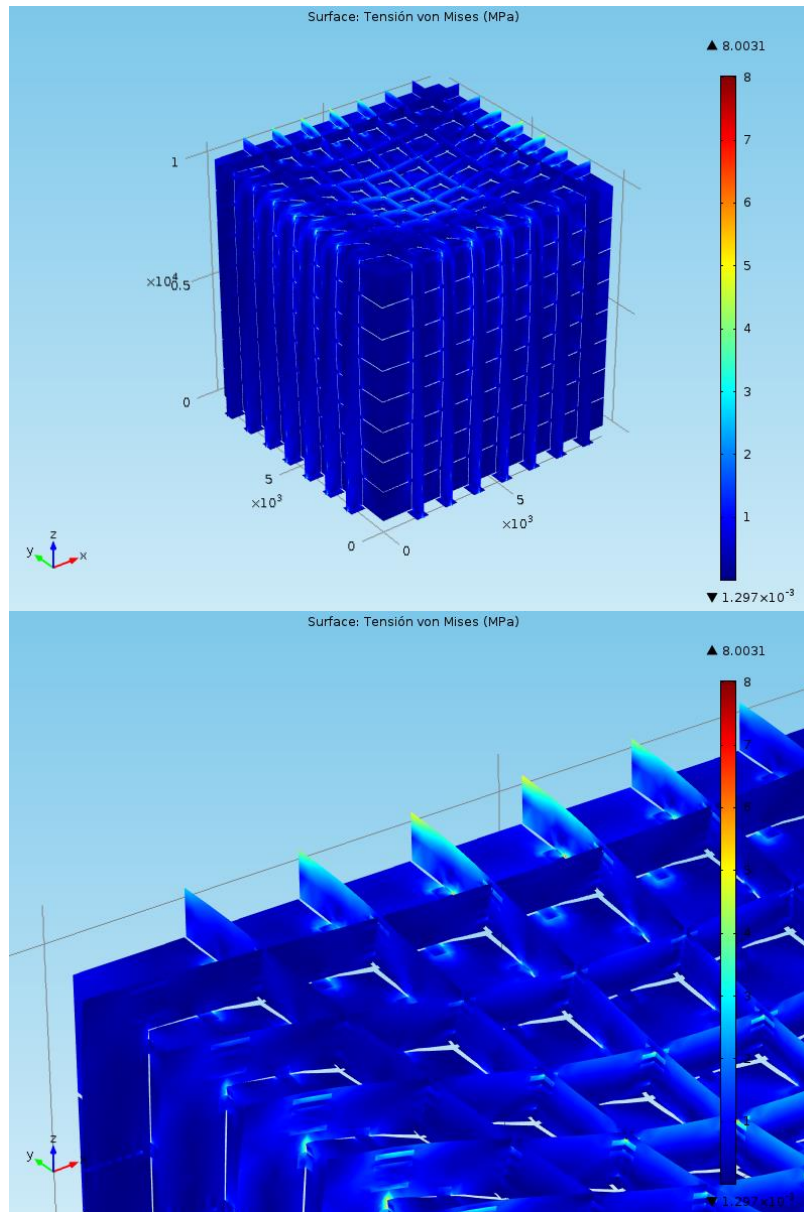


Figura 57. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una carga muerta de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

De igual forma, en la Figura 58 se muestra la distribución de los desplazamientos totales para este caso. Se registra un máximo desplazamiento de 0.85 mm en la cara superior del cubo significando un 0.007 % de deformación en las placas centrales lo que lo hace permisible.

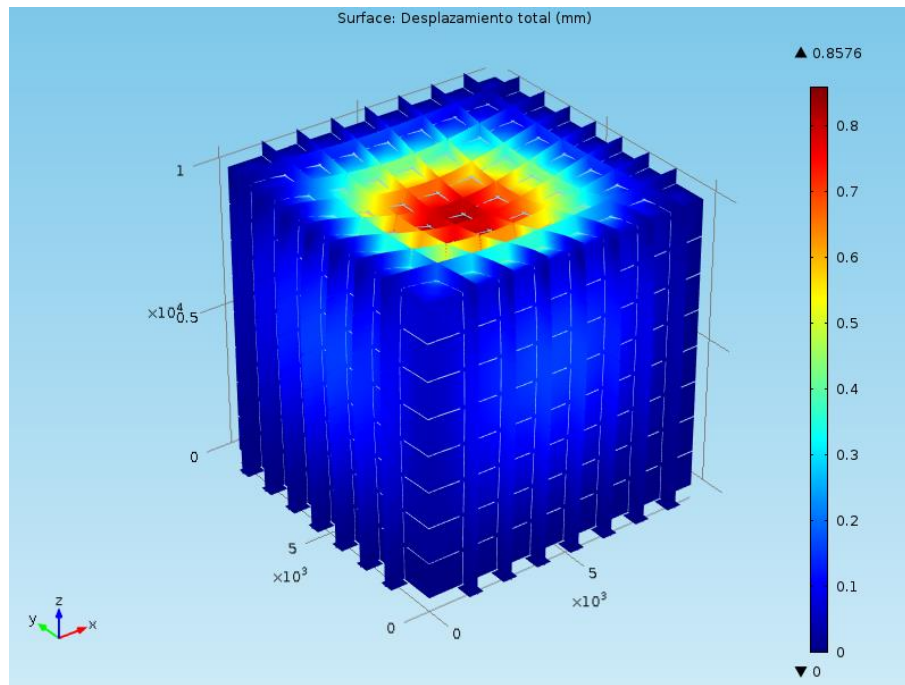


Figura 58. Desplazamientos totales en mm presentes en un estudio estático que considera una carga muerta de un Sistema con vidrio templado y vidrio laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

El siguiente estudio estático (Caso B de la Ecuación 9.1.2) toma en consideración las acciones de una carga viva de cubierta (L_r) y del viento (W) conforme a los siguientes valores de cargas:

L_r = Una Carga Viva de cubierta de 0.96 kN/m^2

W = Una Carga de Viento de 917.44 Kg/m^2 producida por una velocidad del viento de 154.57 Km/h .

Para este caso de estudio estático los esfuerzos mayores se presentan en las uniones de la costilla vertical perpendicular a la dirección del viento que en este caso es una fuerza en dirección de x , como se observa en la Figura 59, y son del orden de los 42.13 MPa , por debajo de los 235.58 MPa de esfuerzo límite obtenido de la extrapolación de datos.

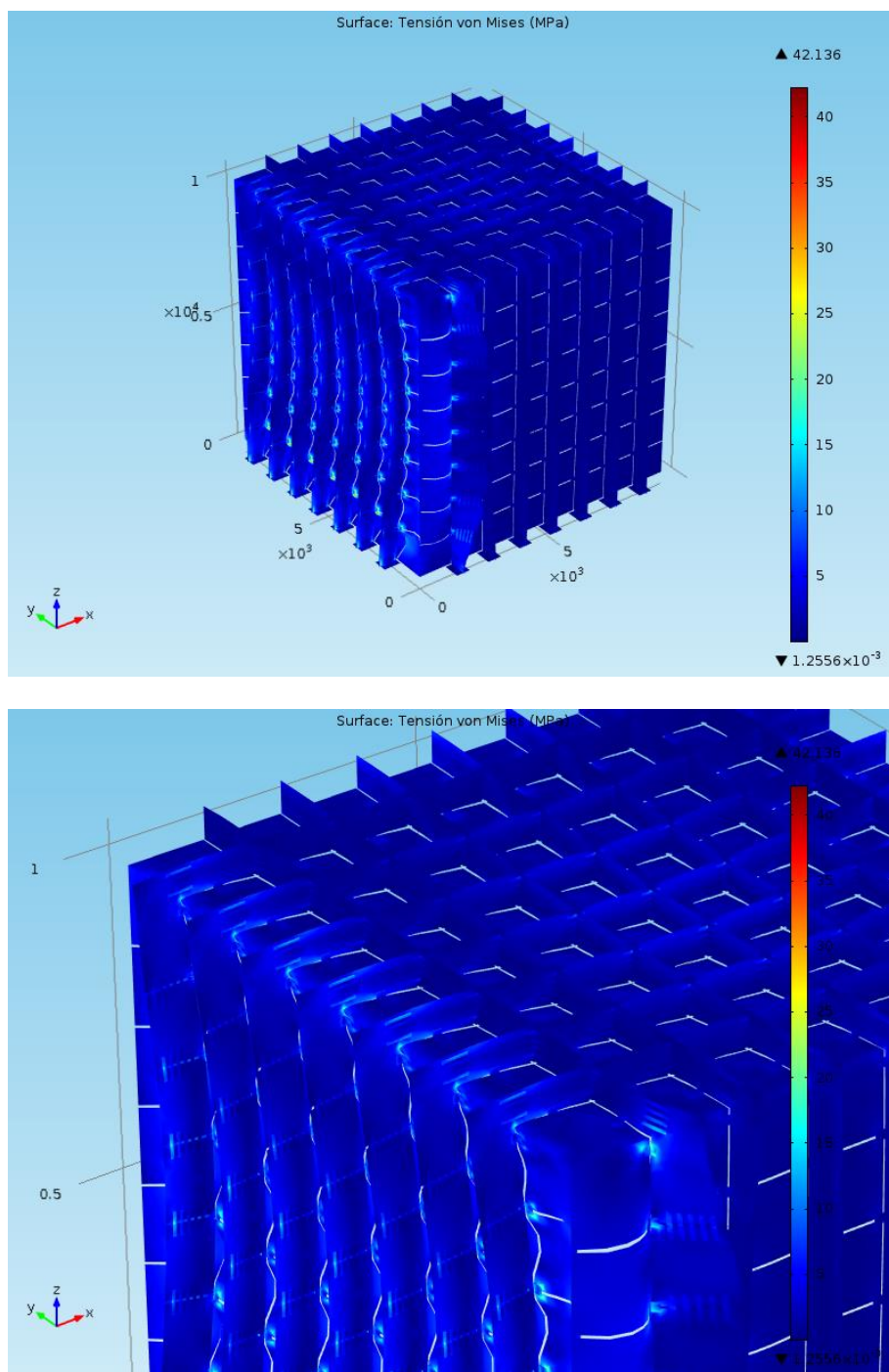


Figura 59. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

También, los desplazamientos máximos para este caso, mostrados en la Figura 60, son de 4.30 mm y según datos de la Tabla 18 respecto a vidrios laminados apoyados en dos o tres de sus lados, un desplazamiento de 7 mm sería el máximo aceptable por lo que el sistema resulta aceptable para esta condición de carga. Se procede a la última combinación de cargas propuesta con esta misma estructura.

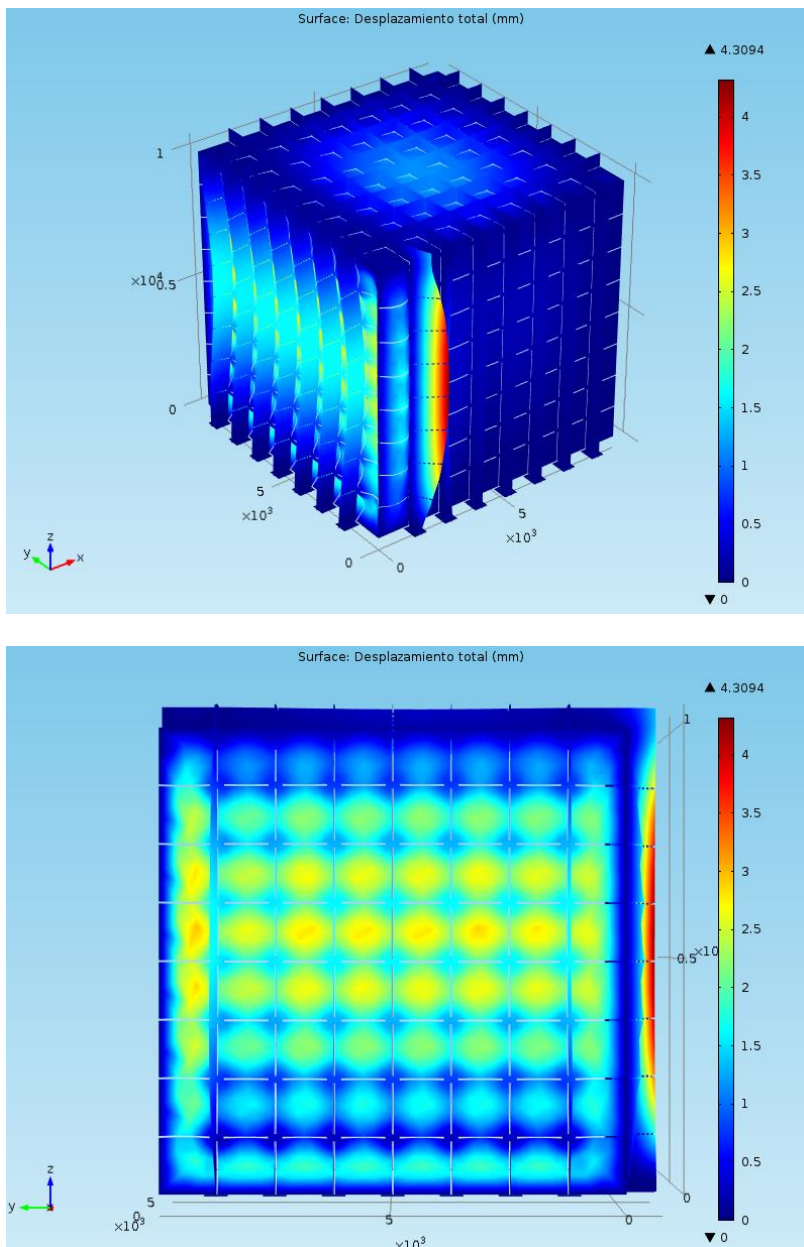


Figura 60. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta, carga viva y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

El último estudio estático (Caso C de la *Ecuación 9.1.3*) toma en consideración las acciones de la carga muerta (D) y del viento (W), donde W = Una Carga de Viento de 917.44 Kg/m^2 producida por una velocidad del viento de 154.57 Km/h . En este caso el esfuerzo máximo que se registra es de 90.61 MPa , inferior al esfuerzo límite de 235.59 MPa definido para el espesor de 19 mm . Como se observa en la Figura 61 los mayores esfuerzos se concentran en los herrajes inferiores de la cara a barlovento.

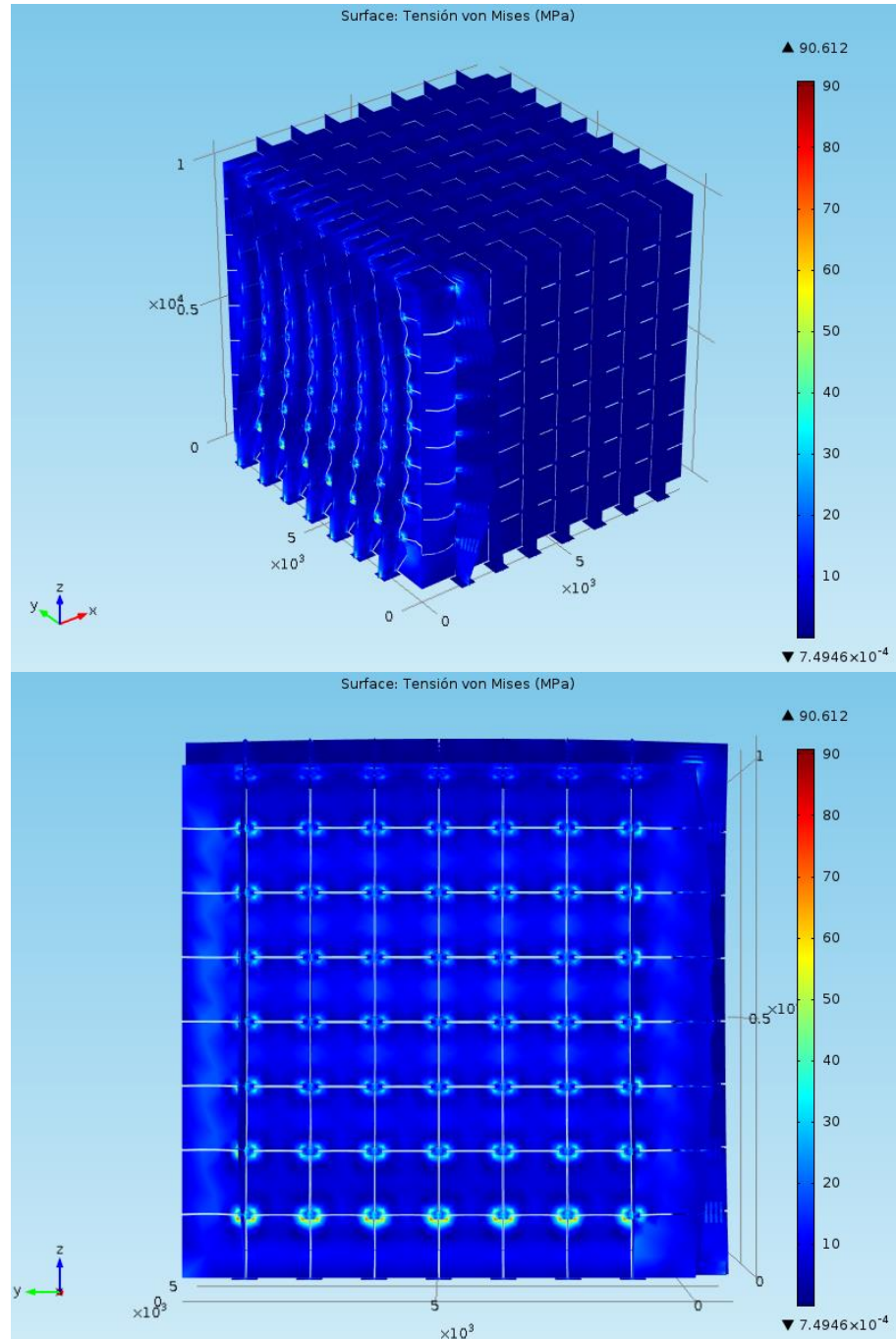


Figura 61. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

Los desplazamientos al centro de esta cara son del orden de los 5.83 mm para las piezas centrales de 1.20 mts por lado, lo que los hace permisibles, siendo el máximo permitido 7 mm según datos de la Tabla 18. Sin embargo en los elementos costilla verticales se registra un desplazamiento de 8.74 mm, mayor en un 24 % al permitido, por lo cual la estructura requiere rigidizar estos elementos. La distribución para los desplazamientos de este caso de estudio se observan en la Figura 62.

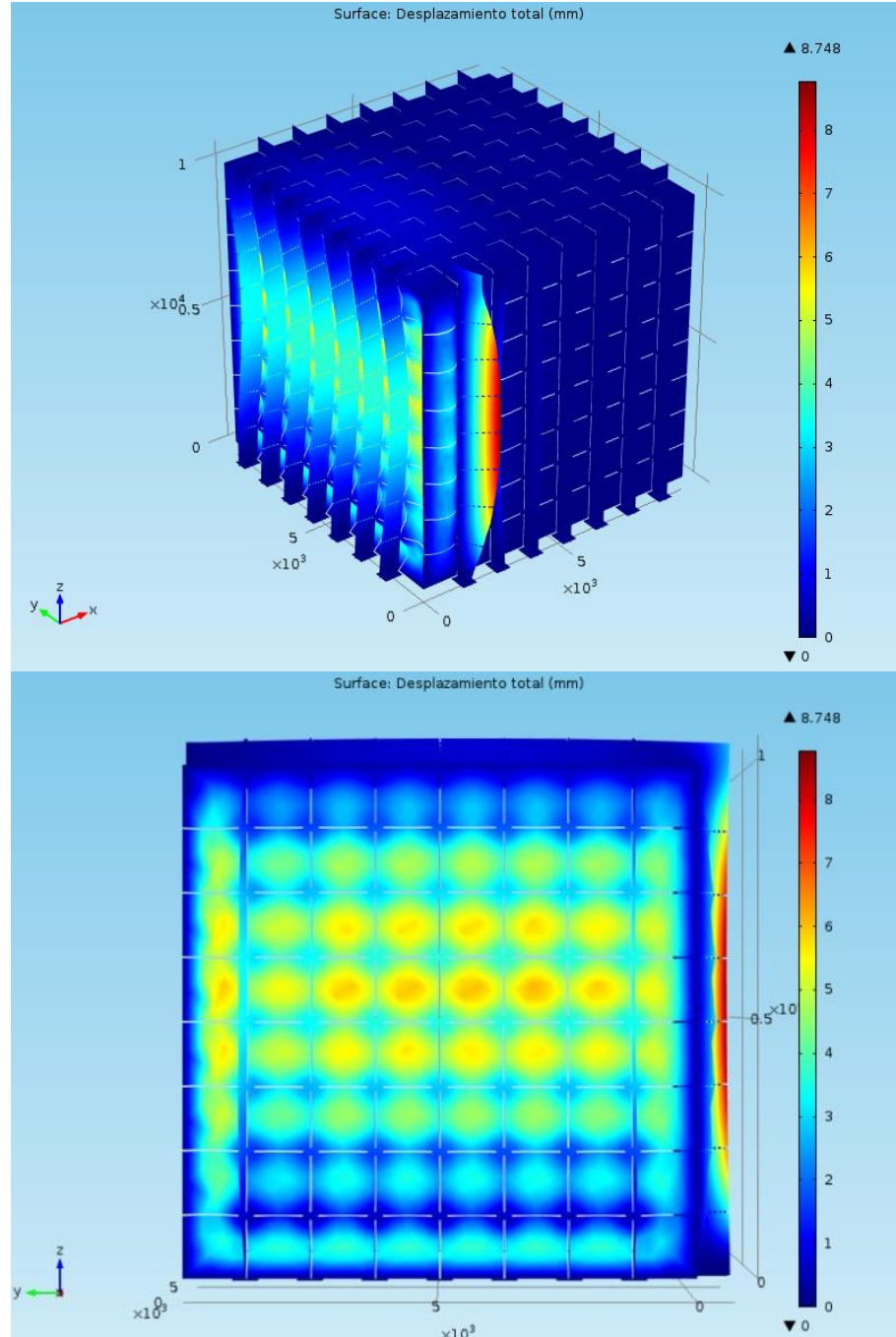


Figura 62. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor. (Generado en COMSOL Multiphysics).

Con este fin se propone agregar una costilla horizontal en las caras verticales del cubo a la mitad de la altura del sistema para proveer estabilidad a las costillas verticales. Dicho elemento y su distribución se observa en la Figura 63.

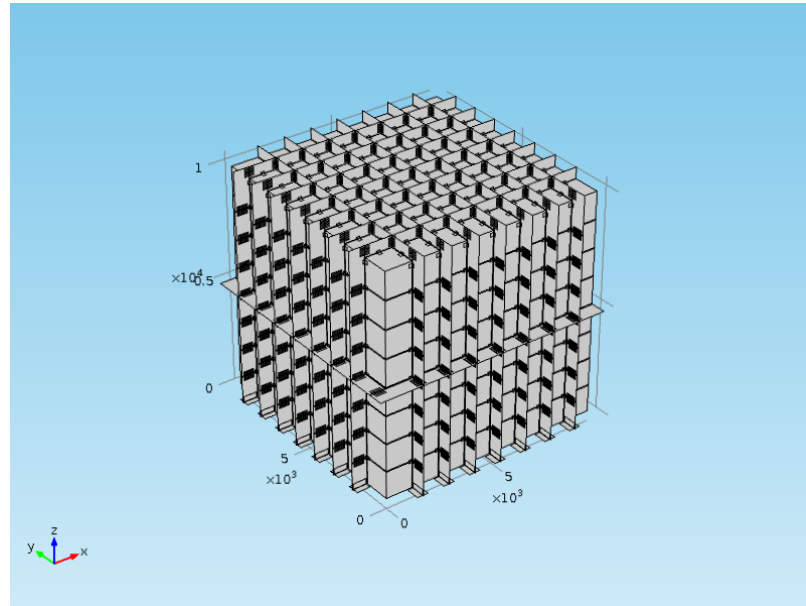


Figura 63. Sistema con costilla horizontal en sus caras verticales. Se agrega este elemento con el fin de rigidizar las costillas verticales y disminuir sus deformaciones.

Posteriormente se vuelve a analizar el Caso C de combinaciones de carga de la *Ecuación 9.1.3*. En el nuevo sistema rigidizado el esfuerzo máximo que se registra es de 84.25 MPa, disminuyendo en un 8% del registrado sin elemento rigidizante, inferior al esfuerzo límite de 235.59 MPa definido para el espesor de 19 mm. Como se observa en la Figura 64 los mayores esfuerzos se concentran en los herrajes inferiores de la cara a barlovento.

Los desplazamientos totales máximos, mostrados en la Figura 65, son del orden de los 5.91 mm para las piezas centrales de 1.20 m por lado, lo que los hace permisibles, siendo el máximo permitido 7 mm según datos de la Tabla 18. Se registra el mismo valor máximo para los elementos costilla verticales corrigiéndose el problema presente en el sistema sin rigidizar. Se concluye que el elemento horizontal beneficia la estabilidad de la estructura por lo que se procede a realizar un análisis dinámico de la estructura modificada.

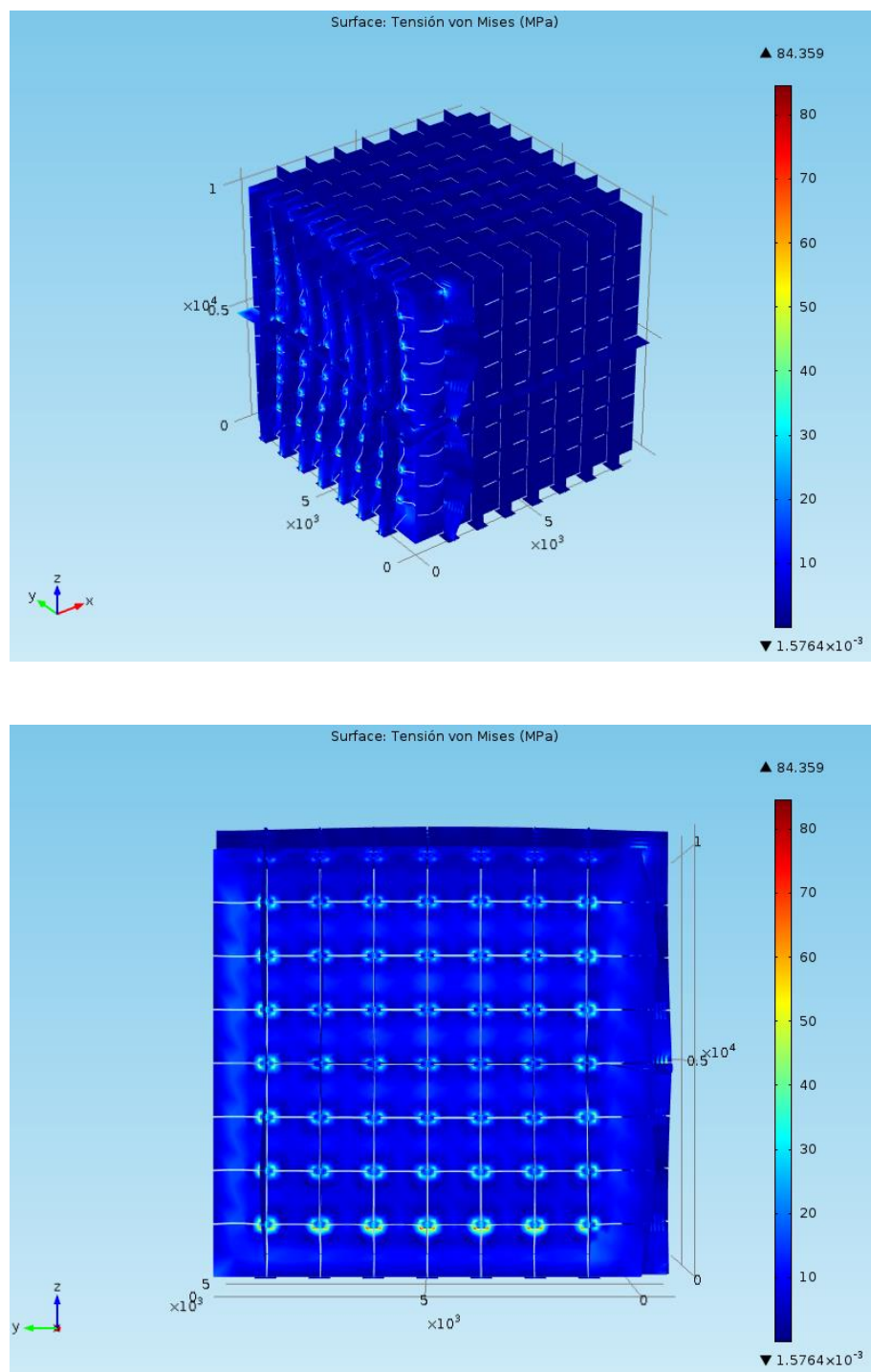


Figura 64. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado. (Generado en COMSOL Multiphysics).

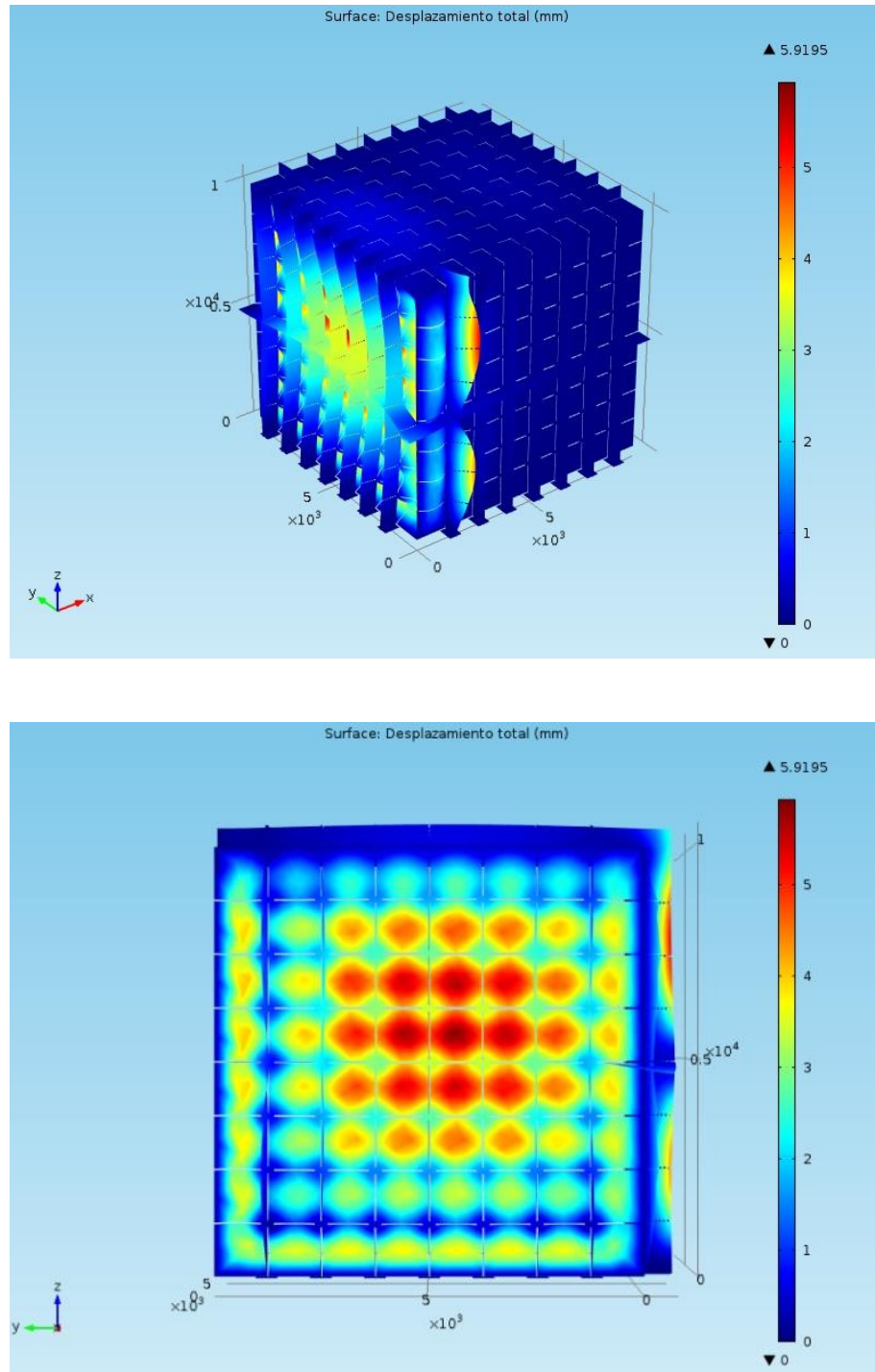


Figura 65. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado. (Generado en COMSOL Multiphysics).

9.3.2 ESTUDIO DINÁMICO.

Como parte del estudio de las respuestas dinámicas de la estructura se realiza un análisis modal con el fin de determinar sus frecuencias y los modos naturales de vibración. Se presentan los dos primeros modos de vibración para la estructura rigidizada utilizada para soportar las condiciones de carga propuestas en el estudio estático en las Figuras 66 y 67; el primero asociado a la frecuencia propia de 14.03 Hz y el segundo asociado a la frecuencia de 20.04 Hz. Se puede observar la manera en la que en el primer modo de vibración se flexionan los elementos que forman la esquina de la costilla horizontal utilizada para rigidizar el sistema de forma independiente sin percibirse perturbaciones en el resto de los elementos.

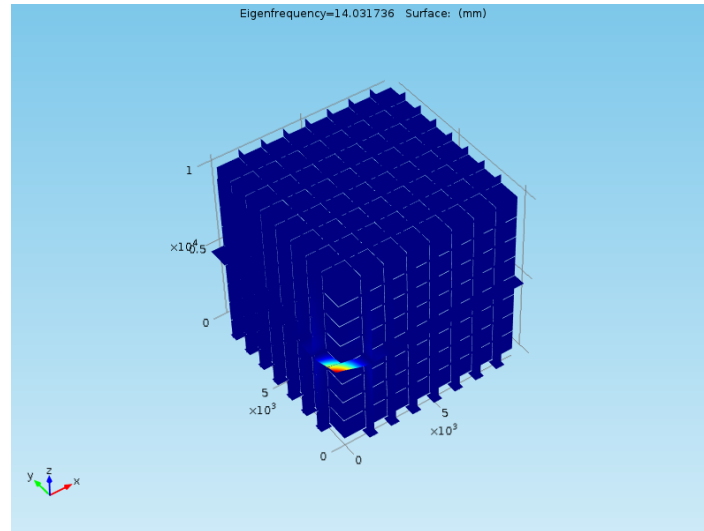


Figura 66. Primer modo de vibración del sistema rigidizado K01 asociado a la frecuencia propia de 14.03 Hz, (Generado en COMSOL Multiphysics).

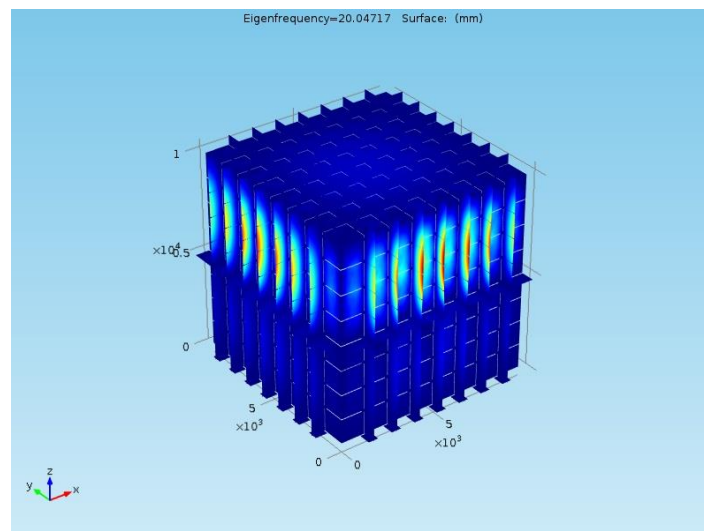


Figura 67. Segundo modo de vibración del sistema rigidizado K01 asociado a la frecuencia de 20.04 Hz, (Generado en COMSOL Multiphysics).

Este comportamiento aislado de respuesta ante la frecuencia descrita puede verse como una falta de rigidez de esta zona. Es por esto que se propone revisar el diseño eliminando dichos elementos ya que su contribución a la rigidez de las costillas verticales se considera de poca importancia.

Resultado de este rediseño se muestran las respuestas a la última combinación de cargas estáticas (Caso C de la Ecuación 9.1.3) al sistema, eliminando los elementos mencionados (llamaremos a este segundo sistema rigidizado K02). La modificaciones en el diseño muestran poco impacto sobre los valores obtenidos en el modelo anterior siendo de un 7% en el esfuerzo máximo quedando en el orden de los 90.31 MPa (Ver Figura 68) y de un 1% en los desplazamientos presentando un valor máximo de 6 mm (Ver Figura 69). Por lo que tras la modificación el sistema ante cargas estáticas sigue resistiendo.

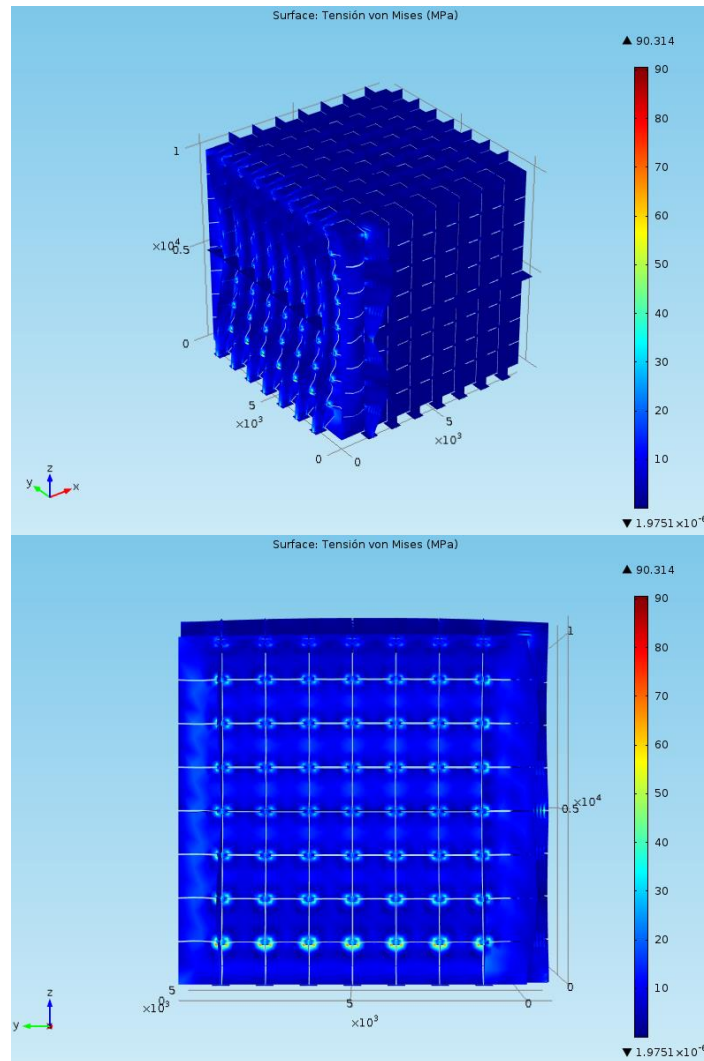


Figura 68. Esfuerzos de Von Mises en MPa para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado (K02) (Generado en COMSOL Multiphysics).

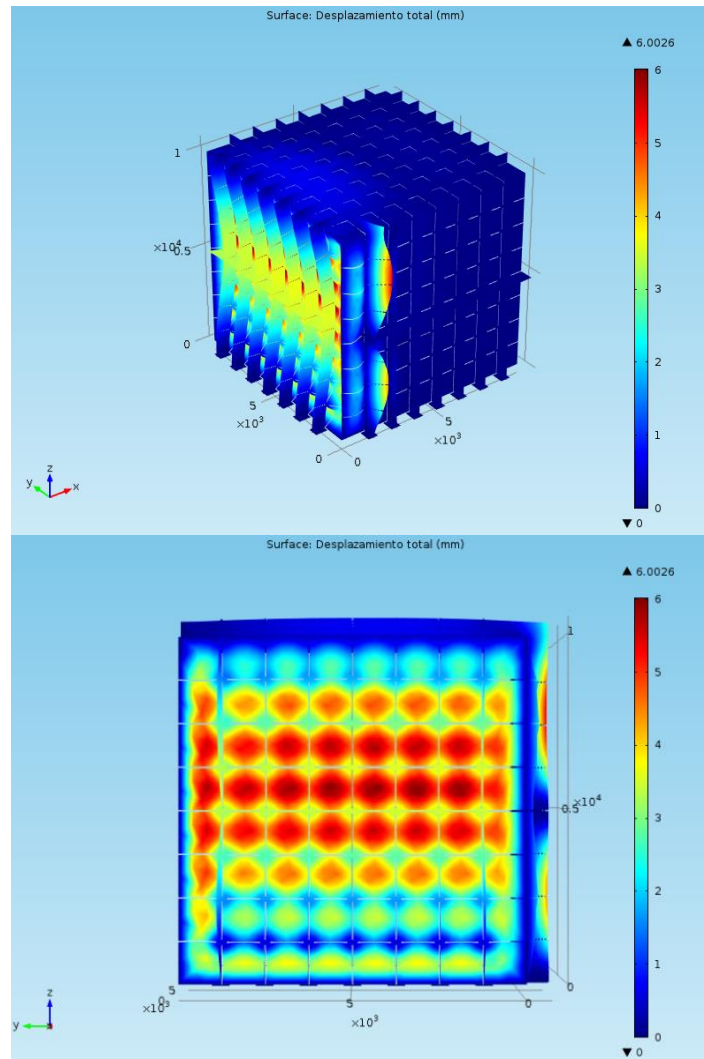


Figura 69. Desplazamientos totales en mm para un estudio estático que considera una combinación de carga muerta y viento de un Sistema con vidrio templado sencillo y laminado de 19 mm de espesor rigidizado (K02) (Generado en COMSOL Multiphysics).

Al evaluar para esta estructura K02 los modos de vibración se obtienen los resultados mostrados en la Figura 70. Los primeros modos de vibración del sistema bajo el nuevo diseño muestran que los elementos se mueven de forma más conjunta. En el primer modo de vibración (19.37 Hz) las caras del cubo junto con las costillas trabajan de forma similar a una membrana que vibra en su eje normal presentando desplazamiento máximos al centro del claro. En el segundo modo fundamental (20.01 Hz) los elementos costilla verticales oscilan en forma uniforme casi independiente de los paneles que forman las caras del cubo, siendo mayores los desplazamientos en la sección superior de los elementos.

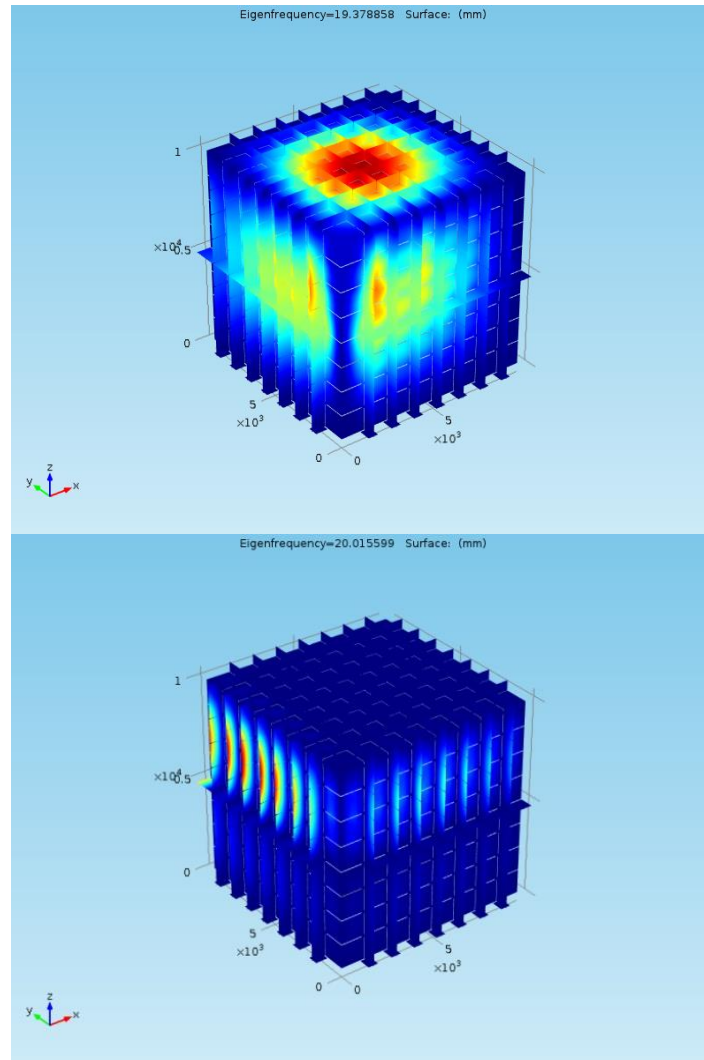


Figura 70. Primeros dos modos de vibración del sistema rigidizado K02, (Generado en COMSOL Multiphysics).

Las frecuencias naturales son cercanas a los 20 Hz, es decir que la estructura reproduce sus modos fundamentales de vibración con periodos de oscilación cercanos a los 0.05s, muy cortos para ser producidos por la acción del viento o la actividad sísmica. Además, debemos considerar que el caso de estudio se encuentra en una zona que no es considerada de riesgo ante la actividad sísmica, una búsqueda en la base de datos del Servicio Sismológico Nacional para los últimos cinco años en el área de la Laguna no arroja sismos registrados. (Universidad Autónoma de México).

9.4 CONCLUSIONES A LA REVISIÓN DEL CASO PRÁCTICO.

La última parte de este trabajo de investigación permite apreciar la forma en la que el análisis por el Método del Elemento Finito mediante el programa COMSOL Multiphysics permite evaluar desde la etapa de diseño la respuesta de un sistema estructural, incorporando los resultados obtenidos de los estudios mecánicos realizados en la primera parte.

La interpretación de los resultados de esfuerzos y deformaciones presentes en el sistema permite hacer eficiente su diseño, evaluando su estabilidad y seguridad estructural. En este caso se han conseguido utilizar elementos de vidrio templado simple y laminado dentro de una estructura modular en la que cumplen la función de elementos estructurales principales, es decir, que existen posibilidades para el vidrio dentro de la ingeniería estructural y la arquitectura, en conjunto con su desarrollo en la ingeniería de materiales.

Así pues, las configuración final está formada por caras de 8 x 8 paneles de vidrio templado con espesor de 19 mm de 1.2 x 1.2 m por lado, dando una longitud total por lado del cubo de 9.88 m. Rigidizando la cara superior se utilizan costillas horizontales en ambos sentidos conformadas por dos placas de vidrio templado de 19 mm de espesor unidas con PVB de 0.70 m de altura. Las caras laterales se rigidizan mediante costillas verticales conformadas por dos placas de 19 mm de vidrio templado unidas con PVB con 0.70 m de ancho. Y para dar estabilidad al conjunto se agrega una costilla horizontal a la mitad de la altura total, formada por dos placas de vidrio templado de 19 mm unidas por PVB de 0.70 cm de ancho. De esta forma obtenemos un diseño que es consistente en sus elementos lo que facilita su fabricación y ensamblaje.

Si bien cabe mencionar que este análisis no excluye la necesidad de ser complementado con estudios tales como el detallado de los sistemas de cimentación o de las uniones de acero tanto dentro de la estructura como aquellas que sirvan para sujetarla a elementos periféricos, sin embargo dichos estudios quedan fuera del alcance de esta tesis enfocada al vidrio y sus características mecánicas.

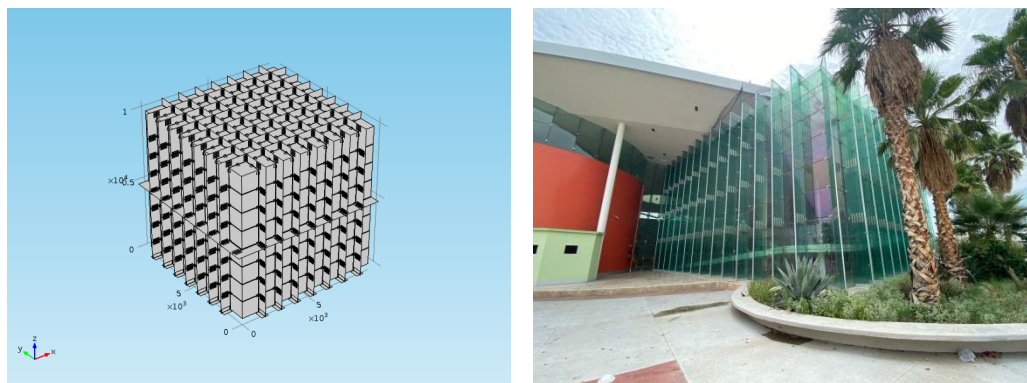


Figura 71. Comparación entre el modelo final y el modelo existente en el Museo el Acertijo en la ciudad de Gómez Palacio Dgo.

9.5 VISITA AL MUSEO INTERACTIVO EL ACERTIJO EN GÓMEZ PALACIO, DURANGO.

Tras una visita al Museo Interactivo el Acertijo, en la ciudad de Gómez Palacio, Durango, se pudieron corroborar algunas de las consideraciones que se plantearon para el análisis del proyecto propuesto como Caso de estudio para esta tesis, debido a que sólo se conocía un desarrollo previo del diseño y primeras etapas de construcción del área del cubo de vidrio.

La estructura presente en el Museo se conforma con los mismos elementos estudiados, sin embargo la cara superior difiere significativamente siendo una sección de una cara cuadrada lo que disminuye el área y con ello el peso al que se somete los elementos costilla.



Figura 72. Logotipo e Interior del Museo Interactivo el Acertijo, vista hacia el área del cubo de vidrio.

Estos elementos costilla in situ poseen una estructura secundaria de perfiles de aluminio, mostrado en la Figura 73, que se presume sólo cumplen un función de protección contra el impacto de los cantos de las piezas de vidrio templado, siendo estos propensos a astillarse.



Figura 73. Herrajes de anclaje al firme de las costillas verticales, se aprecia la estructura secundaria de protección para los cantos del vidrio.

Cabe mencionar, siendo un aspecto meramente arquitectónico, que la falta de mantenimiento de la estructura afecta considerablemente los beneficios estéticos que el espacio podría obtener del uso del vidrio como elemento estructural, principalmente en la cara superior del cubo, donde es clara la acumulación de suciedad, como se observa en las fotografías de la Figura 75.



Figura 74. Vistas de las costillas verticales donde se observan los herrajes de unión entre placas y la sujeción a las caras del cubo.

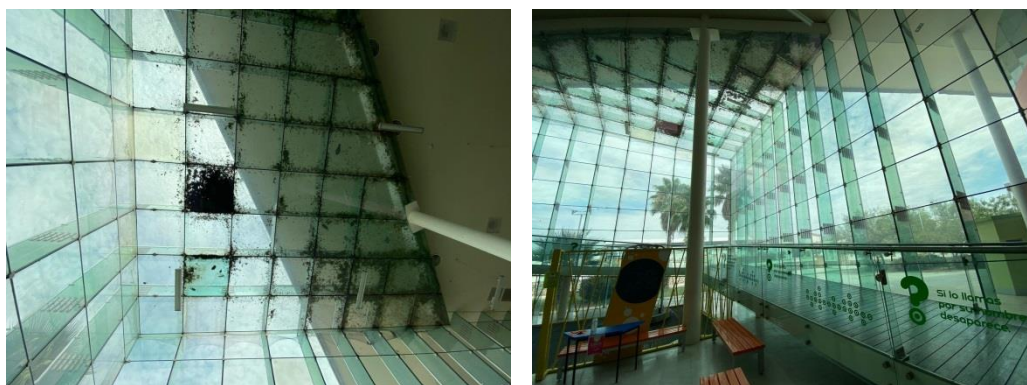


Figura 75. Muestras del mal mantenimiento del espacio, reflejadas en la acumulación de suciedad en la cara superior del cubo.

Por último, cabe destacar que visitar el objeto que dio inicio a este trabajo y que despertó la curiosidad de explorar más allá su naturaleza y los conceptos técnicos que lo hacen posible fue una excelente manera de concluir este estudio y de interpretar los resultados en el comportamiento que el análisis realizado lanza como resultados.

10. CONCLUSIONES GENERALES.

- Una estructura con vidrio templado como material estructural principal es posible, utilizando las metodologías de análisis existentes para determinar su respuesta ante acciones comunes presentes en edificaciones.
- La comprensión de la respuesta mecánica de un material aporta datos significativos para su aplicación en la innovación estructural y a su vez en la innovación arquitectónica.
- Si bien los estudios micro- y nano- métricos distan de la realidad en la que se presentan acciones sobre los edificios, sus resultados amplían la forma en la que se conoce un material y permiten plantearse nuevas metas en el diseño y mejora de los mismos.
- Las posibilidades que otorga el Método de Elementos Finitos para comprender la forma en la que se comportan los elementos estructurales, destacando la capacidad de presentar resultados de forma gráfica, es primordial en el planteamiento de nuevos retos en el diseño arquitectónico.
- Hoy en día, el pensamiento de que las disciplinas técnicas como la ingeniería y las artes, como la arquitectura, divergen en su desarrollo no puede ser más equivocado. El enfoque multidisciplinario en el desarrollo de una nueva arquitectura, de la mano con la comprensión clara de conceptos presentes en su estructura y los materiales que la conforman permitirá alcanzar nuevos territorios.
- Considero que la aportación principal de este trabajo de tesis consiste en documentar un estudio de diseño estructural que parte de un material pocas veces estudiado, la recolección de resultados experimentales y su interpretación, traducida en la comprensión del comportamiento mecánico y estructural del material para después ponerlo a prueba, mediante iteraciones, con el fin de llegar a un diseño eficiente fundado en los estudios realizados. Es un ejemplo concreto del ejercicio de la ingeniería estructural y sus oportunidades.

REFERENCIAS

- ASKELAND, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales* (3a ed.). Estados Unidos de América: Thomson Editores S.A. de C.V.
- BELTRÁN, F. (1999). *Teoría general del método de Elementos Finitos*. . Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales del ETS de Ingenieros Industriales de Madrid. .
- C.K., E. (s.f.). *Procesos de fabricación de vidrio plano (Flat Glass Manufacturing Processes) (Update)*. Estados Unidos de América: PPG Industries.
- CÁRDENAS, A. (1991). *vidrio templado, teoría y solución de un problema industrial*. Moterrey, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, Fac. de Ing. Mecánica y Electrica.
- CHO J., e. a. (2009). *Matrices de composites cerámicos con nanotubos de carbón (Ceramic Matrix Composites containing Carbon nanotubes.)*. Londres: Imperial College London.
- DEL LINZ, P. e. (2016). *Una solución Analítica para el comportamiento pre-falla del Vidrio Laminado bajo fuerzas de Impacto. (An analytical solution for pre-crack behavior of laminated glass under blast loading)*. Londres: Imperial College London.
- FEDERACIÓN, D. O. (2001). *NOM-146-SCFI-2001 Productos de vidrio-vidrio de seguridad usado en la construcción, especificaciones y métodos de prueba*. . Ciudad de México.
- GLASS ONLINE. (2011). Recuperado el 07 de Agosto de 2017, de glassonline.com/infoserv/history.html
- GONZALEZ, P. (2009). *Análisis del desgaste y la resistencia a la fatiga estática del vidrio recubierto con una película delgada de óxido de niobio*. Ciudad de México: Universidad Autónoma de México, Dpto. de Ingeniería Mecánica.
- HAGGERTY, J. S. (1966). *Medición de la expansión térmica, capacidad térmica y distensión estructural en la fase de transición vítrea. (Thermal expansion, Heat capacity and Structural relaxation measurements un the glass transition region)*. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Metallurgy.
- HOPPER, P. e. (2012). *Sobre la Resistencia al Impacto en Vidrio Láminado (On the blast resistances of laminated glass)*. Londres: Imperial College London.
- INTERNATIONAL, A. (2003). *D790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforcedand Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. Estados Unidos de América.
- NAVARRO, B. I. (2011). *El efecto del refuerzo sobre la capacidad de carga del vidrio estructural (The effect of reinforcement on loadbearingcapacity of structural glass)*.Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering.
- OLIVER, W. P. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation. Advances in understanding and refinements to methodology. 19 (1).
- PEARSON, C. (s.f.). *Manual del vidrio plano*. Argentina: TOD.
- PÉREZ, P. (s.f.). *Difracción de rayos X: Introducción*. Universidad Politécnica de Cartagena, Dpto. de Ing. en Minería, Geología y Cartografía. .
- QUINN, G. (2006). *Fracture Toughness of Ceramics by the Vickers indentation crack length method. A critical review*. Gaithersburg MD: National Institute of Standards and Technology.
- SANDIN, R. (2015). *Frectología industrial del vidrio templado. Caracterización y diagnóstico del estado tensional producido durante un tratamiento térmico de templado industrial*. Universidad de la Rioja, Fac de Ing. Mecánica.
- SANZ-ABLANEDO E., e. a. (2010). Modelización y contraste experimental del comportamiento mecánico. *Materiales de Construcción.*, 60 (300), 131-141.
- Universidad Autónoma de México, I. (s.f.). *Servicio Sismológico Nacional*. Recuperado el 16 de Marzo de 2021, de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- XIAODONG, L. B. (2001). *A review on nanoindentation continous stiffness measurement technique and its application*.Elsevier.



CURRICULUM VITAE

Adrián Ortega García (14 de octubre de 1989, Chihuahua, Chih., México).

Egresado del Instituto Tecnológico de Chihuahua II en 2012 con el título de Arquitecto en el plan académico de Arquitectura Regional Sustentable ARQ -204-287.

Ingresa a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua en el periodo Agosto - Diciembre de 2012, dentro del programa de la Maestría en Ingeniería en Estructuras, teniendo clases hasta el periodo Agosto – Diciembre de 2015.

Este trabajo de Tesis se realiza con apoyo del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) teniendo como asesor dentro de la Institución al Dr. Abel Hernández, realizándose pruebas en un periodo de Agosto de 2015 a Diciembre de 2017.

Su experiencia profesional se ha desarrollado en diversas áreas de la construcción principalmente en el desarrollo y supervisión de proyectos y en el diseño arquitectónico.

Entre otros trabajos, destaca su participación en la empresa E+B arquitectura de Agosto de 2014 a Enero de 2016, en el campo de la elaboración de proyectos ejecutivos y el refinamiento de los procesos de conceptualización y diseño arquitectónico.

Posterior a este empleo, de Junio 2016 a Enero 2017, ocupa uno dentro de la empresa de manufactura Inova Glass, dedicada a la producción de vidrio templado para uso arquitectónico, como asesor en el diseño y modulación de piezas, dando apoyo en las áreas de venta y producción.

Por último, a partir de Diciembre de 2017 se encuentra laborando dentro del Departamento de Auditoría Interna de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de Chihuahua (SCOP), como resultado de un proceso de profesionalización de la Secretaría de la Función Pública. A partir de Enero de 2019 el departamento se convierte en el Órgano Interno de Control de SCOP en el cual a la fecha de publicación de este documento ocupa un puesto como Titular de Auditoría e Investigación.

Cabe mencionar su experiencia como docente de la materia de Taller de Diseño Arquitectónico en la Universidad de Durango campus Chihuahua desde Agosto de 2019 a la fecha de publicación de este documento.

Domicilio Permanente: Calle 6ª No. 4801 Col. Sta. Rosa
Chihuahua, Chih., Méx. C.P. 31050

Correo electrónico: arq.adnOG@Gmail.com

Esta tesis fue mecanografiada por Adrián Ortega García.
Con revisiones y comentarios del Mtro. Rubén Alonso Chacón Carrera.