

# **E**stimación del daño en paneles de vidrio

*H. Puga, B. A. Olmos, L. Olmos, J. M. Jara*

Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

## **Resumen**

La predicción de la carga de falla de placas de vidrio con diferentes tipos de apoyo sometidas a carga uniforme, ha sido uno de los objetivos principales en los códigos de diseño de estos elementos en los Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea. En México no se cuenta con una normativa para el diseño estructural de placas de vidrio. Las metodologías y códigos de diseño se basan en conceptos y criterios aplicables a la predicción de la carga, asociada a una probabilidad específica, que lleva a la falla a elementos estructurales de vidrio. El objetivo de este trabajo es estimar curvas de fragilidad de cortinas de vidrio sujetas a diferentes escenarios de presión uniforme, representativos de las cargas de viento esperadas en este tipo de estructuras, tomando como base el modelo de predicción del tiempo de vida. La capacidad estructural de los elementos de vidrio se determinó experimentalmente para especímenes de vidrio de sílice nuevo, tal y como se obtuvieron de fábrica, es decir sin ningún tratamiento previo. A pesar de que este tipo de material es frágil y su resistencia presenta mucha variabilidad, se utiliza cada día con mayor frecuencia como elemento estructural. La capacidad y demanda se asocian mediante el modelo de predicción de vida útil. Los resultados nos permiten comprender los mecanismos de falla de los paneles de vidrio para diferentes espesores, así como estimar su probabilidad de falla usando como herramienta las curvas de fragilidad.

## **Abstract**

The failure prediction of simply supported annealed glass plates subjected to uniform loads is one of the main purposes in the design codes of the United States, Canada and the European Community whereas in Mexico there is not a code to design this type of structural elements. The methodologies and codes available in the literature are based on concepts and criteria applicable to the glass failure prediction to evaluate the load associated with a specific probability of failure. The aim of this work is to estimate fragility curves for curtain glass under different uniform loads representative of the wind loads that they can be subjected, using the lifetime prediction model. The capacity of the structural elements was determined experimentally considering as-received annealed soda lime silica glass; although the material is brittle and random, it is used in structural elements. The capacity and demand are associated with the life time prediction model. The results show the glass failure mechanisms of panels with different thickness, and allow to assess their probability of failure by estimating fragility curves.

**Palabras clave:** Resistencia del vidrio, vidrio de sílice, fragilidad del vidrio, caracterización del vidrio

## **1. Introducción**

El vidrio es un material que ha presentado importantes desarrollos tecnológicos tanto en el proceso de manufacturación como en la caracterización de los materiales que lo conforman, permitiendo que se mejoren sus propiedades mecánicas para usarse como un material estructural, lo cual era inimaginable hace algunas décadas. Por ejemplo, encontramos en la literatura que Alastair Pilkington desarrolló el proceso de manufactura del vidrio soplado en 1950. Esta técnica permitió la producción de elementos de vidrio con buenas características para utilizarse en la práctica profesional de la ingeniería. Sin embargo, el trabajo pionero de Griffith (1920) demostró que la superficie del vidrio falló al tener micro-grietas, las cuales son la principal causa de su fragilidad y aleatoriedad en su resistencia. Estos y otros factores se toman en cuenta en los códigos de diseño de Norte América y Europa para estimar el espesor necesario en una cortina de vidrio sometida a una carga uniforme predeterminada. El diseño estructural de este tipo de elementos estructurales se puede realizar usando las normas ASTM E 1300-12a (2012), en Estados Unidos, CAN/CGSB 12.20-M89 (1989), en Canadá y en Europa la

metodologías propuestas en el EN 13474 (1999) y el modelo de predicción de vida útil (Haldiman, 2006). Todas estas metodologías se determinan con base en la probabilidad de falla de los paneles de vidrio.

La norma ASTM E 1300-12a presenta una amplia variedad de gráficas para estimar el espesor de placa de vidrio requerido para un problema específico. Los conceptos fundamentales del desarrollo de esas curvas son el modelo de predicción de falla del vidrio propuesto por Beason en 1998. Vallavhans (1998) toma en cuenta los efectos de la no linealidad geométrica en las placas de vidrio para estimar las deflexiones en cortinas de vidrio. El modelo de predicción de falla del vidrio se desarrolló con base en la determinación de dos parámetros de superficie de falla  $m$  y  $k$ , los cuales caracterizan la condición de superficie y un parámetro dependiente de la velocidad con que crece la grieta. Las ayudas de diseño reportadas en esta norma corresponden a paneles de vidrio caracterizados con condiciones de superficie  $m = 7$  y  $k = 2.86 \times 10^{-53} N^{-7} m^{12}$ , módulo de elasticidad de 71.7 GPa y diferentes espesores del vidrio (Haldiman, 2006). Básicamente, la norma define la carga resistente para diferentes tipos de placas de vidrio con geometría rectangular y soportada continuamente en uno, dos, tres o cuatro de sus lados. La carga resistente está asociada a una probabilidad de falla del 0.8% para una carga con duración de 3 segundos. La carga de diseño puede corresponder a un solo efecto, o a la combinación de los efectos debidos a la acción del viento, nieve, granizo, terremotos y el peso propio, aunque se asume que la carga no es mayor que 15 kPa. Dos factores definen la resistencia de las placas de vidrio: el primero corresponde al tipo de vidrio y la duración de la carga, mientras que el segundo es para la carga no factorizada con duración de 3 segundos.

La norma canadiense, CAN/CGSB 12.20-M89 se fundamenta en una metodología similar a la de la norma ASTM E1300-12a, ambas toman como base el modelo de predicción de falla de vidrio (Beason, 1998), considerando elementos de vidrio sujetos a cargas laterales uniformes, así como una probabilidad de falla del 0.8%. La principal diferencia entre las normas es la duración de la carga asumida para estimar la resistencia de las cortinas de vidrio, 60 segundos en la norma canadiense y 3 segundos de la norma americana.

En 1999 el Comité Europeo para la Estandarización (CEN) publicó la norma EN 13474-1 (1999), donde se estipulan las bases generales para el diseño de elementos de vidrio. La segunda edición, prEN 13474-2 (2000), presenta un método de diseño para cortinas de vidrio. En la tercera edición de la norma, prEN 13474-3 (2009), se estima la resistencia del vidrio con una metodología general o con una

metodología detallada fundamentada en pruebas experimentales. Los parámetros que se utilizan en esta norma dependen de dos parámetros de velocidad de fisuración estimados a partir de pruebas coaxiales de doble anillo bajo una tasa de carga constante; con estos parámetros, se determinan los parámetros que caracterizan las propiedades de la superficie del vidrio usando las expresiones definidas en la norma.

El modelo de predicción de vida útil (Haldiman, 2006) es una metodología probabilística generalizada que se usa para cualquier tipo de elemento estructural de vidrio (vigas, columnas y placas) y condición de carga. La mecánica de la fractura elástica lineal y la teoría de probabilidad son las bases fundamentales del modelo. El estudio profundo de las variables que rigen el comportamiento de la resistencia del vidrio se considera para establecer una aproximación integral del riesgo. En la presente investigación se consideran las variables relacionadas con el fenómeno de corrosión de esfuerzos que causan el crecimiento subcrítico de la falla superficial, las relacionadas con el comportamiento dependiente del tipo de defectos, así como las variables aleatorias que caracterizan a la grieta: profundidad, localización y orientación. Esta metodología es robusta debido a que caracteriza diversas variables como aleatorias mediante modelos probabilistas que son simplificados en los códigos de diseño, permitiendo que se cuente con un modelo más cercano al comportamiento real del elemento de vidrio utilizado en diferentes tipos de elementos estructurales. Sin embargo, es necesario extender los conocimientos de probabilidad y de la mecánica de la fractura del vidrio, así como realizar estudios experimentales para caracterizar la resistencia del vidrio empleado como elemento estructural. A pesar de ser esto lo más deseable y confiable, no es lo más utilizado, ya que incrementa el costo de implementación del método, limitando su generalización para la práctica profesional.

Olmos et al. (2016) realizaron una campaña experimental que permitió caracterizar las propiedades mecánicas de vidrio de sílice nuevo y estimar los parámetros del modelo probabilista.

Debido a la carencia de una normativa para el diseño de elementos de vidrio en México, el objetivo del presente trabajo es estimar la probabilidad de falla de un conjunto de placas de vidrio que comercialmente se utilizan en el país, con base en curvas de fragilidad. Los resultados muestran incrementos en la resistencia de las cortinas de vidrio como función del espesor, mientras que las cargas de diseño son aproximadamente 25% menores cuando se considera la probabilidad de falla

asociada al código europeo que las relacionadas a la probabilidad de falla definida en los códigos americano y canadiense.

## **2. Modelo de predicción de vida útil**

El modelo de predicción de vida útil (MPVU) se fundamenta en conceptos de la mecánica de la fractura elástica lineal, donde se asume una distribución aleatoria de grietas en la superficie del panel de vidrio con una longitud y un número aleatorios. Las hipótesis principales del modelo son: (1) la superficie de vidrio tiene un número de grietas con profundidad aleatoria, (2) la profundidad de las grietas se puede modelar con una densidad de probabilidad de Pareto, (3) el comportamiento de las grietas es estadísticamente independiente entre grietas vecinas y (4) la localización y orientación de las grietas tienen la misma probabilidad de ocurrir en cualquier localización de la superficie de la placa de vidrio, por lo que pueden definirse con una función de densidad de probabilidad uniforme. Además se asume que: (a) es adecuado el modo de falla I definido en la teoría de la mecánica de la fractura elástica lineal, (b) la probabilidad de falla se determina considerando como único estado límite a la resistencia a esfuerzos de tensión, despreciándose los efectos de resistencia a esfuerzos de compresión. Las bases teóricas en que se fundamentan estas hipótesis son:

1. La relación entre la velocidad de la grieta y la intensidad del esfuerzo se define con una formulación equivalente que relaciona el parámetro de velocidad de grieta lineal  $v_0$ , un parámetro adimensional de la velocidad de grieta  $n$ , el factor de intensidad de esfuerzo,  $K_I$ , y la constante del material,  $K_{Ic}$ , parámetro que es bien conocido. La relación entre  $v_0$  y  $K_I$  se simplifica dentro de tres regiones definidas como función de la influencia que tiene el medio ambiente en su comportamiento. La región I define el comportamiento lineal con una pequeña pendiente debido a que el crecimiento subcrítico de la grieta es lento, lo cual es dependiente de las condiciones ambientales. La región II se define con un valor constante, donde  $v$  es independiente de  $K_I$  pero depende de la cantidad de humedad presente en el ambiente. La región III define un comportamiento lineal con una pendiente pronunciada, donde  $v$  depende del medioambiente. Lo anterior se resume en la Figura 1.

En el MPVU se asume la región I debido a que la relación que existe entre el tamaño de los elementos de vidrio en edificios y las fallas esperadas en

la superficie de las placas de vidrio a lo largo de su vida útil, presenta este comportamiento.

$$v = v_0 \left( \frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^n \dots\dots\dots (1)$$

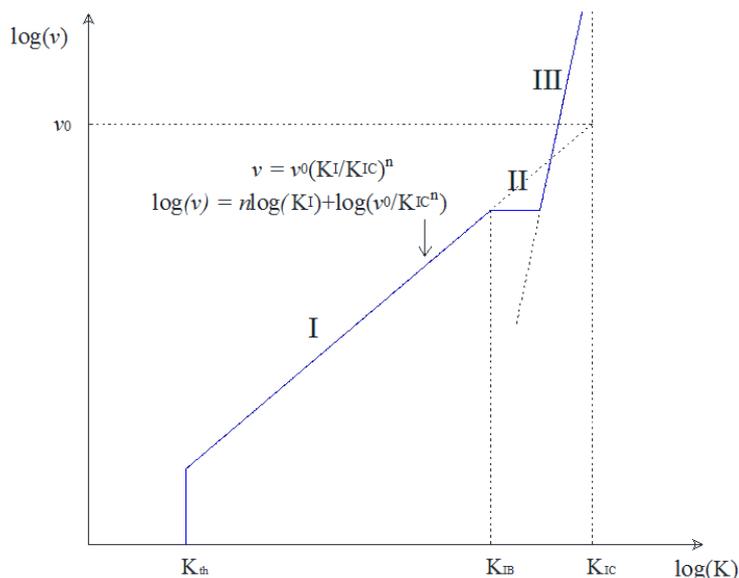


Figura 1. Idealización de la velocidad de propagación de grieta (v) como función de la intensidad de esfuerzo (K).

- La regla básica para determinar la falla de un vidrio dice: “un elemento de vidrio falla, si el factor de intensidad de esfuerzo,  $K_I$ , debido a un esfuerzo de tensión en el inicio de la grieta alcanza el valor crítico  $K_{Ic}$ ” (Haldiman, 2006). Esto se expresa mediante la relación que existe entre el factor de intensidad de esfuerzo  $K_I$ , el esfuerzo nominal a la tensión normal al plano de grietas  $\sigma_n$ , un factor de corrección de geometría de la grieta  $Y$ , y la profundidad de la grieta  $a$ , esto es:

$$K_I = Y \sigma_n \sqrt{\pi a} \geq K_{Ic} \dots\dots\dots (2)$$

Esta definición es la base para estimar en forma implícita el esfuerzo crítico,  $\sigma_c$ , y la profundidad de grieta crítica,  $a_c$ , considerada en el desarrollo de la integral de riesgo.

3. El crecimiento subcrítico de grieta y el tiempo de vida se estiman diferenciando con respecto del tiempo la profundidad de la grieta. Después de realizar una sustitución, integración y manipulación algebraica, se obtiene la integral de riesgo expresada en la ecuación (3) para el tiempo en que se espera la falla, tiempo de vida ( $t_f$ ).

$$\int_0^{t_f} \sigma_n^n(\tau) d\tau = \frac{2}{(n-2)v_0 K_{Ic}^{-n} (Y\sqrt{\pi})^n a_i^{(n-2)/2}} \dots\dots\dots (3)$$

4. Extendiendo los conceptos antes descritos a una superficie con una población aleatoria de grietas, asumiendo un esfuerzo constante y crecimiento de grietas subcrítico y si la probabilidad de falla de una grieta, corresponde a la probabilidad de que su tamaño aleatorio  $a$  sea más grande que la profundidad de grieta crítica  $a_c$ , obtenemos:

$$P_f = \int_{a_c}^{\infty} f_a(a) da = 1 - F_a(a_c) \dots\dots\dots (4)$$

Seleccionando adecuadamente las funciones de densidad de probabilidad que describen el comportamiento de cada una de las variables aleatorias, además de extender los conceptos a un criterio de falla multimodal, para una carga dependiente del tiempo y considerando el crecimiento de grieta subcrítico, el MPVU (Haldiman, 2006) se define con la expresión,

$$P_f(t) = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{A_0} \int_A \frac{2}{\pi} \int_{\varphi=0}^{\frac{\pi}{2}} \left[ \max_{\tau \in [0,t]} \left\{ \left( \frac{\sigma_n(\tau, \vec{r}, \varphi)}{\theta_0} \right)^{n-2} + \frac{\int_0^{\tau} \sigma_n^n(\tilde{\tau}, \vec{r}, \varphi) d\tilde{\tau}}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right\}^{\frac{1}{n-2}} \right]^{m_0} dAd\varphi \right] \dots\dots(5)$$

donde  $P_f$  es la probabilidad de falla,  $A_0$  es un área de superficie unitaria ( $A_0=1 \text{ m}^2$ ),  $A$  es el área de la superficie del elemento de vidrio,  $\sigma_n^n(\tilde{\tau}, \vec{r}, \varphi)$  es la componente normal del esfuerzo en el plano de la superficie normal a la orientación de la grieta  $\varphi$  en el punto  $\vec{r}(x, y)$  en la superficie, y en el tiempo  $\tau$ ,  $t$  es el tiempo de interés,  $K_{Ic}$  la tenacidad a la fractura,  $Y$  es el factor de geometría,  $v_0$  y  $n$  son los parámetros de velocidad,  $\theta_0$  y  $m_0$  son los

parámetros de la condición de la superficie,  $U$  es un coeficiente que contiene parámetros relacionados con la mecánica de la fractura y el crecimiento subcrítico de la grieta, definido por:

$$U = \frac{2K_{Ic}^2}{(n-2) \cdot v_0 \cdot Y^2 \pi} \quad (\text{unidades de esfuerzo}^2 \times \text{tiempo}) \dots\dots\dots (6)$$

Para implementar esta metodología se realizaron pruebas de fatiga dinámica utilizando la técnica coaxial de doble anillo para especímenes de vidrio nuevo de sílice; con ello, se determinaron la carga de falla y la máxima deflexión asociada. Para validar los parámetros del modelo probabilista, los resultados experimentales se correlacionaron con un modelo analítico de las placas ensayadas bajo carga uniforme. Los esfuerzos de tensión en la superficie de las placas se determinaron con base en modelos de elementos finitos para 672 placas de vidrio. El modelo de predicción del tiempo de vida se aplicó a los datos generados para estimar las curvas de fragilidad, de donde se determinó la carga asociada a probabilidades de falla de 0.8 y 0.12%, valores comúnmente utilizados en los códigos de diseño, con el objetivo de analizar el comportamiento estructural de las cortinas de vidrio.

### **2.1. Caracterización de vidrio de sílice**

Las pruebas de fatiga dinámica se realizaron con base en la norma ASTM C 1499-05 (2005), Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, también conocida como prueba coaxial de doble anillo. Los especímenes corresponden a vidrio nuevo de sílice, con sección transversal cuadrada de 200mmx200mm y espesores de 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 y 19 mm. Se probaron diez especímenes para cada una de las geometrías hasta alcanzar la falla en una máquina Instron-5500R, bajo una tasa de carga de 79 kN/min y condición ambiente. Los detalles del trabajo experimental se pueden consultar en (Puga, 2014). Los esfuerzos principales que llevan a los especímenes a la falla se determinaron con base en las pruebas experimentales. Con ello se estimaron los parámetros de superficie del vidrio bajo condiciones ambientales ( $m_0 = 5$ ,  $\theta_0 = 59.78$  MPa). La Figura 2 muestra las curvas esfuerzo-deformación para algunos de los especímenes probados y una fotografía representativa de los modos de falla que presentaron los especímenes de prueba.

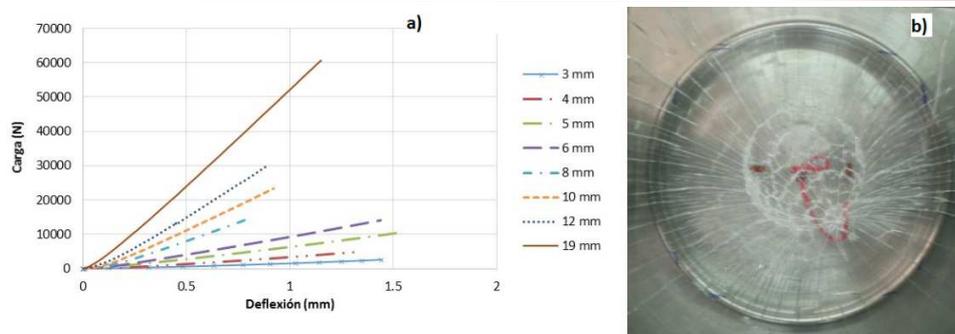


Figura 2. Curva carga-deformación de especímenes de prueba (a), y modo de falla de uno de los especímenes de vidrio con 5 mm de espesor (b).

## 2.2. Modelo numérico

Cuando las deflexiones son mayores que un tercio del espesor de la placa, el modelo numérico de las placas de vidrio debe realizarse considerando la teoría de grandes deflexiones, para tomar en cuenta los efectos de la no linealidad geométrica que se presentan en la sección transversal. Esto es importante debido a que la relación de aspecto conduce a resultados inexactos al aplicar la teoría lineal de placas de Kirchoff, donde se desprecian las deformaciones en el centro de los bordes y los esfuerzos de membrana. El software comercial ANSYS (2012) se utilizó para crear los modelos numéricos mediante la teoría de elementos finitos con el módulo “Static Structural”, donde se consideró el vidrio como un material isotrópico y se incluyeron los efectos de no linealidad geométrica que se pudiesen presentar en las placas de vidrio. Previo al desarrollo de todos los modelos numéricos de las cortinas de vidrio estudiadas, se validaron algunos modelos numéricos con los resultados experimentales. Después de la validación, se construyeron 672 modelos de las cortinas de vidrio simplemente apoyados en sus cuatro bordes, donde se varió el tamaño de las placas y su espesor. Los casos de estudio consideran relaciones ancho a profundidad ( $a/b$ , donde  $a > b$ ) de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0, con espesores de las cortinas de vidrio de 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10, 12, 16, 19, 22 y 25 mm. El intervalo de los casos de estudio fue definido con base en los tamaños máximos de cortinas de vidrio que se ofrecen en la industria de la construcción, 2.5x3.5 m, así como a los espesores que existen comercialmente (NOM-146-SCFI, 2001). Con base en esto, los anchos y espesores de las cortinas de vidrio seleccionados cubren placas con área superficial dentro del intervalo de 0.25 a 8.75 m<sup>2</sup>.

### Estimación del daño en paneles de vidrio

Para optimizar el tiempo de cómputo requerido en los análisis y con base en la simetría de las placas, se modeló un cuarto de su tamaño usando elementos finitos tipo Shell 181 isotrópicos y elásticos. El tamaño de los elementos finitos varía desde 10x10 mm hasta 30x30 mm. Las propiedades de los materiales que caracterizan las placas de vidrio corresponden al módulo de elasticidad de 74000MPa, relación de Poisson de 0.23 y densidad específica de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Las condiciones de apoyo de los nodos localizados en las fronteras de los extremos de las placas se modelaron como fijos con excepción del grado de libertad correspondiente al desplazamiento que se presenta fuera del plano de la placa.

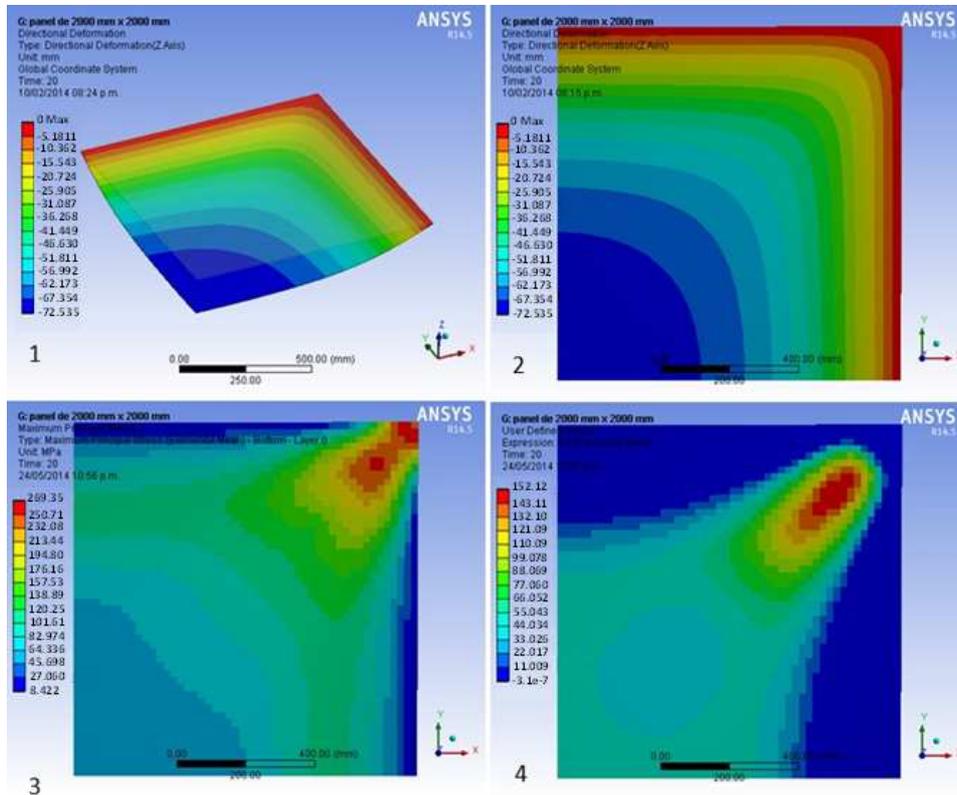


Figura 3. Modelo de elementos finitos para una cortina de vidrio bajo presión uniforme de 0.02 MPa: 1) Configuración deformada de la placa, 2) Deformación máxima en el centro de la placa (72.5 mm), 3) Distribución de esfuerzos principales máximos en la placa, 4) Distribución de esfuerzos principales mínimos en la placa.

Los modelos numéricos se sometieron a una presión uniforme incremental de 0.001 MPa hasta alcanzar 20 estados de carga. Debido a que se desconoce el valor de la carga uniforme que lleva a las cortinas de vidrio a la falla la intensidad máxima considerada en cada uno de los análisis fue 0.02 MPa. La Figura 3 muestra los resultados para uno de los modelos bajo una carga uniforme de 0.02 MPa, los resultados muestran que la deformación máxima vertical se presenta en el centro de la placa, para este caso el valor es de 72.54 mm, y disminuyen hasta llegar a cero en los extremos donde se encuentran apoyados los paneles de vidrio (Figuras 3-1 y 3-2), en la parte inferior (Figuras 3-3 y 3-4) se presenta la distribuciones de esfuerzos principales máximos y mínimos en la placa de vidrio. Los resultados muestran una concentración de esfuerzos en las esquinas de los lados donde se encuentran los apoyos. Los esfuerzos en esta zona varían de 152 a 269 MPa, mientras que hacia el centro de la placa tienden a valores muy pequeños. Como función de la distribución de esfuerzos, la grieta crítica debe generarse en la zona donde se encuentra la conexión de las cortinas de vidrio debido a la gran concentración de esfuerzos que se presenta en esta zona.

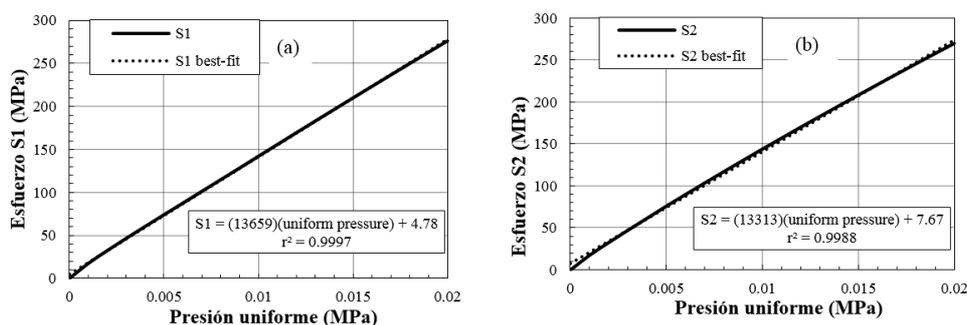


Figura 4. Presión uniforme-esfuerzo principal y ajuste (a) S1 y (b) S2.

Para estimar las curvas de fragilidad de acuerdo con el MPVU, se requiere de un gran número de datos que definan el estado de esfuerzos en toda la superficie de las placas ante diferentes escenarios de carga, lo que implica un número infinito de análisis. Para tener una mayor cobertura de los esfuerzos que se generan en las placas de vidrio ante un mayor número de escenarios de presión uniforme, se hicieron modelos de regresión sobre los escenarios de presión uniforme estudiados. Las funciones obtenidas de los análisis de regresión permiten inferir los esfuerzos generados por cargas uniformes no consideradas en los modelos analíticos y con esto determinar la carga que lleva a la falla los elementos estructurales. La Figura

4 muestra los resultados del análisis de regresión asociado a los esfuerzos principales. Como se observa en la figura, la función que presentó el mejor ajuste corresponde a una línea recta con correlaciones cercanas a la unidad. Las dos constantes que definen esta función dependen de la geometría de cada panel, por lo tanto se definieron relaciones de esfuerzo ante una presión uniforme para cada caso de estudio.

### 3. Curvas de fragilidad

Debido a que en México no se cuenta con un código de diseño de elementos estructurales de vidrio, es deseable contar con ayudas de diseño que estén asociadas a ciertos valores de probabilidad de falla, como los que se presentan en los códigos vigentes de otros países. En el presente trabajo se estiman curvas de fragilidad para determinar la presión uniforme que causará una probabilidad de falla predefinida. Fragilidad se define como la probabilidad de alcanzar o exceder un estado límite de comportamiento (ecuación 5). Esta ecuación se programó en código del software Matlab para generar la base de datos que relaciona la probabilidad de falla de placas de vidrio de diferente tamaño con los esfuerzos y deformaciones que se generan debido a la acción de diferentes escenarios de presión uniforme. En la Tabla 1 se reportan los valores de los parámetros considerados en el MPVU.

**TABLA 1**

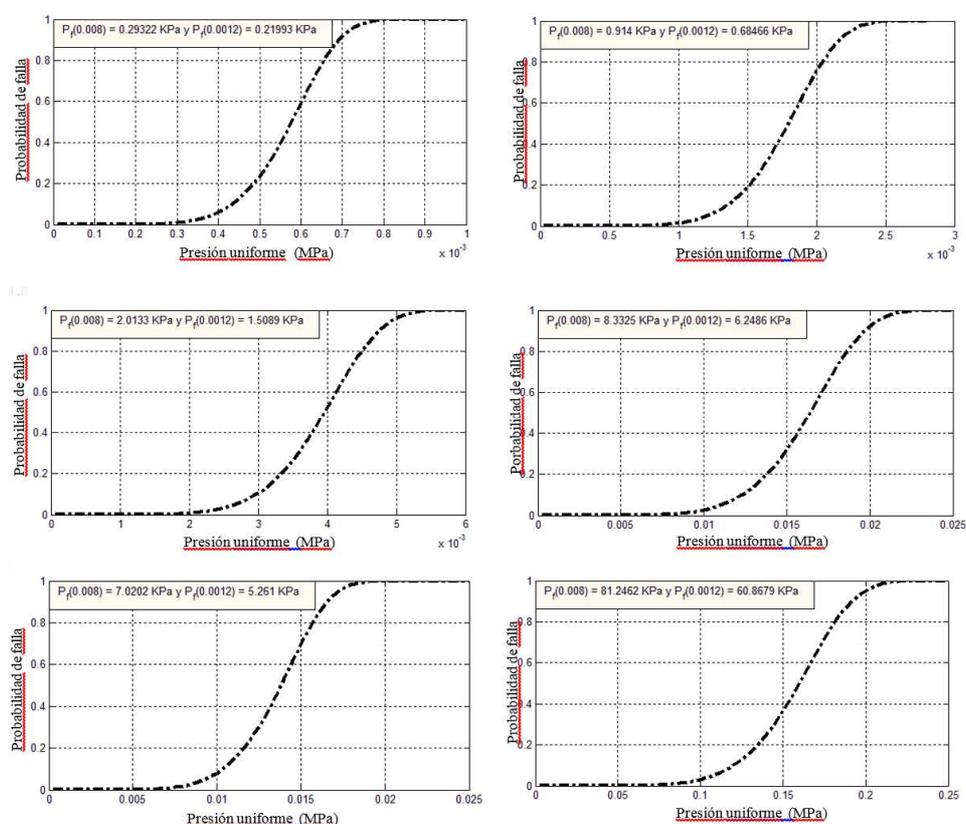
Propiedades mecánicas de las cortinas de vidrio y parámetros considerados para estimar las curvas de fragilidad.

Parámetro(s)	Valor
Factor de intensidad de esfuerzo crítico ( $K_{IC}$ )	23.7172 MPaxmm <sup>0.5</sup>
Factor de corrección de geometría ( $Y$ )	1.12 (adimensional)
Parámetro de velocidad de fisuración ( $v_0, n$ )	$v_0 = 6$ mm/s
$\theta_0$	$n = 16$ (adimensional)
$m_0$	59.88 MPa
Módulo de Young ( $E$ )	74 000 MPa
Duración de la carga uniforme ( $t$ )	3 s
Sub-área ( $A_i$ )	Función del tamaño del elemento finito (mm <sup>2</sup> )
Esfuerzos principales en el plano $S1$ y $S2$	(MPa)

La Figura 5 muestra curvas de fragilidad representativas para cortinas de vidrio de tamaño 2500mmx2500mm y 3500mmx500mm, con espesores de 2.5, 8 y 25 mm. Los resultados corresponden a una presión uniforme en las placas asociada a una determinada probabilidad de falla; se reporta también la presión uniforme para las

*Estimación del daño en paneles de vidrio*

probabilidades de falla consideradas en los códigos de diseño de Norte América (0.008) y Europa (0.0012). Los resultados expresados en la Figura 5 muestran que para una probabilidad de falla definida, la presión uniforme requerida para alcanzar un estado límite se incrementa como función del espesor de la placa. Así mismo, las placas cuadradas exhiben una menor resistencia en comparación a las placas rectangulares. Para corroborar estos resultados, en la Tabla 2 se resumen las probabilidades de falla para todos los espesores de placa considerados en este conjunto de placas de vidrio.



**Figura 5.** Curvas de fragilidad para una presión uniforme en placas con geometría de 2500 mm x 2500 mm (1ª columna), 3500 mm x 500 mm (2ª columna) y espesores de 2.5 (1er renglón), 8 (2do renglón) y 25 mm (3er renglón).

La Figura 6 resume las curvas de fragilidad para todos los espesores (h) considerados para las cortinas de vidrio de tamaño 2000mmx2000mm. Se grafica únicamente la probabilidad de falla en el intervalo de interés para fines de diseño.

Estimación del daño en paneles de vidrio

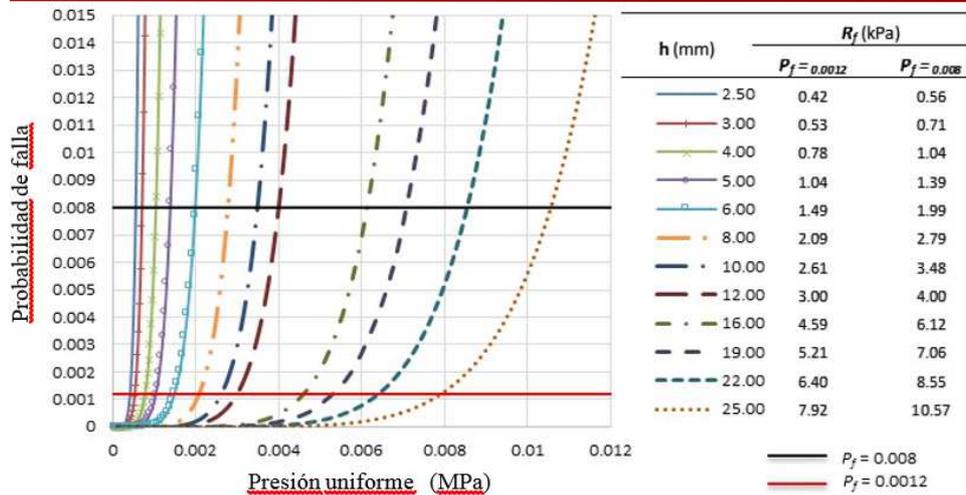


Figura 6. Curvas de fragilidad para una presión uniforme para cortinas de vidrio de tamaño 2000 mm x 2000 mm x h mm.

TABLA 2

Presión uniforme, R<sub>f</sub> (kPa), en las cortinas de vidrio para alcanzar una probabilidad de falla.

Tamaño de cortina	R <sub>f</sub> (kPa) [P <sub>f</sub> (0.008)]	R <sub>f</sub> (kPa) [P <sub>f</sub> (0.0012)]	Tamaño de cortina (mm x mm)	R <sub>f</sub> (kPa) [P <sub>f</sub> (0.008)]	R <sub>f</sub> (kPa) [P <sub>f</sub> (0.0012)]
2500x2500x3	0.375	0.281	3500x500x10	13.016	9.751
3500x500x3	1.207	0.905	2500x2500x12	3.138	2.351
2500x2500x4	0.723	0.541	3500x500x12	18.743	14.038
3500x500x4	2.096	1.569	2500x2500x16	4.888	3.661
2500x2500x5	0.974	0.730	3500x500x16	33.309	24.977
3500x500x5	3.259	2.441	2500x2500x19	5.397	4.074
2500x2500x6	1.398	1.047	3500x500x19	46.984	35.202
3500x500x6	4.693	3.515	2500x2500x22	6.156	4.614
2500x2500x10	2.607	1.953	3500x500x22	62.933	47.143

Los resultados confirman que incrementos en el espesor de las placas de vidrio conducen a incrementos en la capacidad de los elementos. Cuando se implementa el MPVU, se observa que la resistencia de las cortinas de vidrio para la probabilidad de falla definida en el código europeo (0.0012) es en general 25% menor que la del código americano (0.008).

#### **4. Conclusiones**

En este estudio se crearon 672 modelos de elementos finitos de cortinas de vidrio utilizando el programa ANSYS, representativos de placas que se utilizan en la industria de la construcción. Para determinar curvas de fragilidad de la carga de falla, se desarrollaron análisis de regresión para definir funciones que permitieran interpolar y extrapolar los esfuerzos en los elementos finitos tipo shell con diferentes presiones uniformes a las consideradas en los casos de estudio. Se utilizó el modelo de predicción del tiempo de vida que permite contar con una herramienta para estimar cualquier curva de fragilidad como función de los parámetros de superficie de la placa (Puga, 2014). La carga resistente de las cortinas de vidrio muestra incrementos como función del espesor de las placas. Se encontró también que la probabilidad de falla utilizada en la norma europea conduce a cargas de diseño 25% menores que a las que conducen los códigos americano y canadiense. Este resultado será importante para definir la probabilidad de falla adecuada para México, ya que actualmente no existe ninguna norma específica a este tema. Con base en estos resultados, se desarrollaron posteriormente ayudas de diseño que asocian la presión uniforme a una probabilidad de falla para vidrios de sílice utilizados en la industria de la construcción de Michoacán (Olmos et al., 2016).

#### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el apoyo proporcionado para la realización de este proyecto, así como al Instituto Tecnológico de Morelia por facilitar su laboratorio para realizar el trabajo experimental.

## 5. Referencias

- ASTM C 1499-05 2005. Standard test method for monotonic equibiaxial flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature. P. 1-11. En: American Society for Testing Materials.
- ASTM E 1300-12a 2012. Standard practice for determining load resistance of glass in building. P 1-59. En: American Society for Testing Materials, EUA.
- ANSYS 2012. ANSYS v14.5 (Programa de elemento finito). ANSYS, Inc., EUA.
- Beason W. L. and Morgan J. R. 1998. Glass Failure Prediction Model. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 110 (2) 197–212
- CAN/CGSB-12.20-M89 1989. Structural design of glass for buildings. En: Canadian General Standards Board, Canada.
- EN 1374-1 1999. Vidrio para la identificación-diseño de acristalamientos-Parte 1: Base general de cálculo. P. 1-29. En: Comité Europeo de Normalización, EU.
- Griffith A. A. 1920. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions, Series A*. 221: 163–198
- Haldiman M. 2006. Fracture strength of structural glass elements-analytical and numerical modelling, testing and design. PhD Dissertation No. 3671, Swiss Federal Institute of Technology Lusanne.
- NOM-146-scfi-2001 2001. Norma Oficial Mexicana. Productos de Vidrio-Vidrio de Seguridad Usado en la Construcción-Especificaciones y Métodos de Prueba.
- Olmos B. A., Puga H., Jara J. M. y Olmos L., y Jara J. M. 2016. Methodology to develop design aids of simple supported glass panels based on a probabilistic approach and experimntal tests *Engineering Structures*. 125: 92–106.
- prEN 1374-2. Glass in Building – Design of Glass Panes – Part 2: Design for Uniformly Distributed Loads, European Committee for Standardization, febrero de 2000.
- prEN 1374-3. Glass in Building – Determination of the Strength of Glass Panes – Part 3: General Method of Calculation and Determination of Strength of Glass Testing, European Committee for Standardization, octubre de 2009.
- Puga H. 2014. *Modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio*. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- Vallabhan C. V. G. 1984. Glass failure failure prediction model *J Structural Engineering*, ASCE. 110 (2) 197–212