



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELO DE PREDICCIÓN DE FALLA DE
CORTINAS DE VIDRIO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

PRESENTA

INGENIERO CIVIL HERIBERTO PUGA JUÁREZ

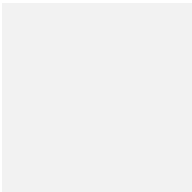
ASESOR DE TESIS

**DOCTORA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS
BERTHA ALEJANDRA OLMOS NAVARRETE**

Resumen

Por cientos de años el vidrio ha existido, y a lo largo de su historia su proceso de fabricación ha ido evolucionando. En especial, el vidrio que se utiliza en la industria de la construcción ha alcanzado un mayor grado de perfección hasta nuestros días, con el proceso de vidrio flotado. A pesar de los avances con que contamos, el vidrio sigue siendo un material frágil cuya resistencia de falla es aleatoria, aspectos muy importantes a considerar en el diseño de elementos estructurales de vidrio. Por lo tanto, es necesario adoptar una metodología probabilista para predecir la resistencia de elementos de vidrio dentro de ciertos márgenes de seguridad, los cuales se asocian a probabilidades de alcanzar estados límite de daño previamente establecidos. Códigos de diseño y métodos para definir la carga que puede resistir el vidrio se documentan en Norte América y en Europa, los cuales reconocen el carácter aleatorio de la resistencia de falla del vidrio. La resistencia a la fractura de un elemento estructural de vidrio está condicionada a micro grietas en su superficie y al tamaño crítico de alguna de ellas, la cual representa el inicio del punto de ruptura. La mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL) presenta los fundamentos teóricos para el comportamiento de las fisuras que se presentan en el vidrio. Todos estos aspectos se conjuntan en un modelo sueco generalizado y conocido con el nombre de Modelo de Predicción de Vida Útil (MPVÚ), modelo desarrollado recientemente por Haldimann M. (2006). El MPVÚ es la base fundamental para la derivación del Modelo de Predicción de Falla de Cortinas de Vidrio (MPFCV). El MPFCV se presenta a través de curvas de diseño para paneles de vidrio con cuatro bordes simplemente apoyados, sometidos a carga lateral uniforme. Estas gráficas son ayudas específicas de diseño donde se relaciona la carga lateral uniforme contra la de flexión máxima en el centro del claro de los paneles con la predicción de resistencia correspondiente a una probabilidad de falla objetivo de 0.8%, los resultados corresponden a vidrio nuevo del tipo recocido. Para estimar el modelo de predicción de falla y con estos resultados construir los gráficos de diseño, se desarrolló un total de 672 modelos analíticos de paneles de vidrio recocido nuevo con diferente relación de aspecto y grosor, así como de 79 pruebas de laboratorio de fatiga dinámica en configuración de prueba coaxial de doble anillo (CDA), también en vidrio recocido nuevo para evaluar correctamente los parámetros que definen el MPFCV. Finalmente en este trabajo se incluye un aspecto fundamental en el diseño referente a la predicción de falla como función del módulo de elasticidad del vidrio. Es importante resaltar que en México no se cuenta actualmente con un código que regule los criterios de diseño estructural de cortinas de vidrio, a pesar de la demanda comercial que en nuestros días se presenta en los proyectos arquitectónicos de edificios y otros tipos de estructuras donde se incluyen este tipo de elementos a lo largo de toda la República Mexicana. Por esta razón, el MPFCV es un método de diseño que está dirigido a diseñadores de sistemas de acristalamiento, quienes en las últimas décadas han buscado de una metodología confiable para el desarrollo confiable de sus trabajos profesionales.

Palabras clave: modelo de predicción de falla, fragilidad, elementos estructurales de vidrio, grieta en vidrio, cortinas de vidrio, pruebas de fatiga dinámica.



Abstract

For hundreds of years the glass has been manufactured in different ways and forms, a long history the mechanisms for their creation have evolved. In particular the glass implemented for the building industry has reached a better state of perfection through the floating glass process. In spite of the advances given by the glass technology, it is still a brittle material whose collapse resistance is random, there are several important factors that must be taken into account for glass structural elements. Based on this, we can say that is necessary to assume a probabilistic methodology for predicting the strength of structural glass elements among safety boundaries, this boundaries have to be associated to a predetermined probability values associated to limit states previously defined. In North America and Europe there are design codes and methodologies proposed to estimate the load that can be resisted by a glass element where is recognized the random character for the glass failure load. The fracture strength for a glass structural element is conditioned to the presence of micro cracks on the glass surface, and also to the presence of its critical size state, cracks' number and size are unknown, that corresponds to the rupture point. The linear elastic fracture mechanics (LEFM) provides the theoretical basis to study the cracks behavior followed by glass elements. All these aspects were interconnected in a generalized Swedish's model that is known as a Lifetime Prediction Model (LPM), the methodology was developed during the last decade by Haldimann M. (2006). The LPM gives the bases for the development of the Failure Prediction Model for Curtains Glass (FPMCG), this methodology is presented through design graphs for glass panels simple supported on their four edges and subjected to a lateral uniform load. The graphs are design aids relating the lateral uniform load, the maximum deflection at the center of the panel and the strength predicted for a 0.8% probability of failure, the results reported in here correspond to new annealed glass. To be able to construct design aids there was estimated the LPM for a total of 672 analytical models of the glass panels where it was varied their aspect ratio and thickness, as well as there were conducted in the laboratory 79 experiments of dynamic fatigue through the coaxial double ring (CDR) test configuration on a new annealed glass, the test results provide the necessary data to estimate the parameters in what are based the MPFCV. Finally in this work is included a fundamental aspect related with the failure prediction as a function of the glass' elastic modulus. It is important to remark that in Mexico there is no design code for the regulation of the courting glass structural design, in spite of that in nowadays along the Mexico, the executive projects for buildings and other types of structures include glass elements such as the ones studied in this work. For this reason, the MPFCV is a design methodology proposed for glass systems designers who during the last decades have been searching for guides to develop their work in a reliable way.

Keywords: failure prediction model, fragility, glass structural elements, glass crack, courting glass walls, dynamic fatigue tests.

Agradecimientos

Primero, me gustaría agradecer a la Dra. Bertha Alejandra Olmos Navarrete, destacada investigadora graduada en la Universidad de Texas A&M (EE.UU.), profesora de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y directora de esta tesis; por darme la oportunidad de trabajar en un ambiente profesional, por su inmenso apoyo y por sus valiosas e innumerables intervenciones realizadas sobre este trabajo.

El esfuerzo de otras personas está presente en esta tesis. Me gustaría ofrecer mi agradecimiento a los miembros de la mesa de sinodales, quienes dieron lectura y sugerencias sobre mi trabajo en el momento de su revisión: al Prof. Dr. José M. Jara, al Prof. Dr. Manuel Jara, al Prof. Dr. Francisco Hurtado, al Prof. Dr. Luis R. Olmos y al Prof. Dr. José C. Rubio. También, de igual forma ofrezco mi agradecimiento a los miembros que integran al CONACYT, por darme sustento durante mi maestría.

La participación de más personas fue fundamental para el logro de este trabajo. Me gustaría también sinceramente agradecer a la Dra. Monique Head (Universidad de Morgan State, EE.UU.), por su generosidad, al obsequiarme excelentes libros para consulta y por su apoyo durante mi estancia de investigación que desarrollé bajo su dirección en su universidad. Me gustaría también ofrecer agradecimientos para Gabriela Valencia y Everardo G. Rodríguez, por unirse a la labor de recopilación de documentos de interés para esta tesis, dentro de la Universidad de Stanford. Mi muy especial agradecimiento va para el Dr. Matthias Haldimann, investigador graduado en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL, Suiza), por sus aportaciones dentro de este documento. Mi agradecimiento también va para el Ing. Roberto C. Olmos, por asistirme en el uso de Visual Studio.

Los experimentos llevados a cabo fueron parte esencial de esta tesis. Me gustaría agradecer al Dr. Pedro Garnica, director del Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Instituto Tecnológico de Morelia, quien me permitió el fácil acceso a las instalaciones de su laboratorio para llevar a cabo las pruebas coaxiales de doble anillo sobre vidrio recocido nuevo. Gracias también, al Dr. Luis R. Olmos, por su asistencia en el diseño de cada ensayo. Me gustaría agradecer también, al Dr. Carlos Chávez y al Dr. Nelio Pastor, por su excelente disposición para proporcionar el equipo de adquisición de datos, cada vez que se necesitó.

Muchas gracias también, a los estudiantes de licenciatura de la FIC de la UMSNH, por su gran colaboración en esta tesis: Ana C. Izquierdo, Juan M. Hernández, Gerardo S. Cifuentes y Luis A. Morales. También, me gustaría agradecer a cada uno de mis compañeros de la Maestría en Ingeniería en el Área de las Estructuras, quienes siempre presentaron disponibilidad y cordial atención ante mis cuestionamientos relacionados con esta tesis, pero en especial a: Laura P. Sandoval, Leslie E. Alejo, Omar Montes, Juan P. Prieto e Iván Manzo. Me gustaría agradecer también de forma especial a quien colaboró con aspectos de esta tesis: a la Ing. Wendy P. De la Cruz.

Me gustaría expresar mi más profunda gratitud para mi familia, quien me ha apoyado y me ha impulsado todo momento en mi carrera. Mis padres y mis hermanos reciban mi más sincero agradecimiento, por darme todo su apoyo y cuidado.

Contenido

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Contenido	IV
Lista de Símbolos	VII
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XX
1 El Vidrio como Material de la Construcción	1
1.1 Origen e historia del vidrio.....	1
1.2 Definición del vidrio como material.....	4
1.2.1 Origen de la fase cristalina amorfa del vidrio.....	4
1.3 Composición química del vidrio.....	7
1.4 Propiedades mecánicas del vidrio.....	8
1.5 Propiedades térmicas del vidrio.....	9
1.6 Propiedades ópticas del vidrio.....	9
1.7 Tipos de vidrio y su comportamiento.....	10
1.7.1 Vidrio recocido.....	10
1.7.2 Vidrio templado.....	10
1.7.3 Vidrio laminado.....	13
1.8 La fragilidad del vidrio.....	14
1.9 Patrón de falla del vidrio.....	15
1.9.1 Patrón de falla en placas de vidrio.....	15
1.9.2 Patrón de falla en vigas de vidrio.....	17
1.9.3 Otros tipos de patrones de falla en el vidrio.....	18
2 Descripción de Conexiones en Cortinas de Vidrio	19
2.1 Elementos estructurales de vidrio	19
2.2 Conexiones.....	20
2.2.1 Conexiones mecánicas.....	22
2.2.2 Conexiones de fuerza.....	24
2.2.3 Conexión adhesiva.....	25
2.2.3.1 Fijaciones especiales con adhesivo.....	27
2.3 El uso del vidrio en revestido de edificios.....	29

2.3.1 Acristalamientos verticales.....	29
2.3.1.1 Cortinas de vidrio de baja altura.....	31
2.3.1.2 Cortinas de vidrio de mediana altura y suspendidas.....	31
2.3.1.3 Cortinas de vidrio de mediana altura con cables y tensores.....	32
2.3.1.4 Cortinas de vidrio de gran altura conformadas con montantes y travesaños.....	32
2.3.2 Acristalamientos horizontales e inclinados.....	33
2.3.2.1 Tránsito sobre acristalamientos horizontales.....	34
3 Pruebas y Métodos de Diseño en Vidrio	37
3.1 Pruebas de laboratorio para el vidrio	37
3.1.1 Pruebas de fatiga estática.....	37
3.1.2 Pruebas de fatiga dinámica.....	38
3.2 Métodos norte americanos y europeos de diseño estructural para vidrio	40
3.2.1 Modelo de predicción de falla de vidrio (MPFV).....	40
3.2.2 Norma ASTM E1300-12a para la determinación de la resistente del vidrio en edificios.....	42
3.2.3 Norma nacional de Canadá CAN/CGSB 12.20-M89.....	48
3.2.4 Método simplista por esfuerzos permisibles.....	51
3.2.5 Método de diseño de carga equivalente de daño y resistencia.....	52
3.2.6 Norma europea prEN 13474.....	55
3.2.7 Método de diseño de Shen.....	62
3.2.8 Método de diseño de Siebert.....	63
3.2.9 Método de diseño de Matthias Haldimann.....	65
4 Modelo de Predicción de Vida Útil	69
4.1 Fisuras o defectos de una superficie de vidrio	69
4.2 Mecánica de la fractura	70
4.2.1 Crecimiento subcrítico de grieta.....	73
4.2.2 Relación entre velocidad de grieta e intensidad de esfuerzo.....	73
4.2.3 Agentes participantes en la relación k_I vs. v	74
4.3 Desarrollo del modelo de predicción de vida útil	76
4.4 Esfuerzo estático equivalente y esfuerzo resistente	78
4.5 Extensión del modelo de una fisura sobre el vidrio a un modelo probabilístico simplificado	80
5 Análisis de Parámetros del Modelo	86
5.1 Introducción	86
5.1.1 Factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC}).....	86
5.1.2 Umbral del crecimiento de grieta (K_{th}).....	87
5.1.3 Factor de geometría de la fisura (Y).....	87
5.1.4 Parámetros de velocidad de grieta (v_0 , n).....	89
5.1.5 Parámetros de condición de superficie (θ_0 , m_0).....	91
5.1.6 Profundidad inicial de una fisura de superficie (a_i).....	91

5.1.7 Resistencia residual en el vidrio (σ_r).....	92
6 Pruebas Experimentales	94
6.1 Introducción.....	94
6.2 Prueba CDA en condiciones ambientales.....	94
6.2.1 Condición inerte.....	94
6.2.2 Condición no inerte.....	95
6.3 Descripción del material de prueba.....	95
6.4 Pruebas experimentales con vidrio recocido nuevo.....	99
6.4.1 Descripción de los resultados obtenidos.....	100
6.4.1.1 Pruebas de bondad X^2 para funciones de distribución Weibull, Gamma y Lognormal.....	105
6.4.2 Determinación del módulo de elasticidad.....	110
6.5 Modelo analítico de las pruebas CDA.....	112
6.6 Determinación de m_0 , θ_0 y m_r	119
7 Modelo de Predicción de Falla de Cortinas de Vidrio	132
7.1 Introducción.....	132
7.2 Modelo analítico de placas simplemente apoyadas en sus cuatro bordes.....	132
7.2.1 Detalles de los modelos analíticos.....	134
7.3 Resultados.....	140
7.3.1 Curvas de fragilidad de carga uniforme contra probabilidad de falla de una placa de vidrio recocido nuevo.....	140
7.3.2 Gráficos de diseño para el cálculo de la resistencia de falla y de deflexión en el centro del claro de paneles de vidrio recocido nuevo.....	154
7.3.3 MPFCV como función de E.....	167
7.3.4 MPFCV como función de la duración de la carga.....	175
8 Conclusiones	176
Referencias	179
A Información y Datos de Pruebas de Laboratorio	182
B Muestras Fotográficas de Pruebas de Laboratorio	186
C Resultados del MPFCV	191
D Información en CD	203

Lista de Símbolos

Símbolos latinos

- $\bar{A}$, área equivalente para condiciones ambientales o inertes → página 67
- $\tilde{a}_c(\tau)$, profundidad de falla de una fisura para el instante de tiempo τ → página 67
- a y b , dimensiones para placas rectangulares → página 41
- A , área de la superficie de una placa de vidrio → página 40
- a , profundidad o un medio de la longitud de una fisura → página 70
- A_0 , área de una muestra de vidrio con superficie unitaria → página 53
- a_0 , tamaño característico de fisura → página 120
- a_c , longitud de grieta o de la fisura crítica → página 70
- a_i , profundidad de grieta inicial, página 65
- A_{red} , área total superficial para vidrio recocido → página 52
- A_{Test} , área de prueba → página 52
- B , función de riesgo → página 39
- C , factor de corrección de tensión biaxial → página 40
- c , función de distribución de esfuerzos → página 67
- c_1, c_2, c_3 y c_4 , coeficientes de diseño que multiplican a R_{ref} → página 49
- D , diámetro de una muestra de forma circular → página 96
- D, L, Q , y T , acciones de diseño para el cálculo de E_d → página 48
- D_L , diámetro del anillo de carga para una prueba CDA → página 95
- D_S , diámetro del anillo de apoyo en una prueba CDA → página 95
- E , módulo de elasticidad → página 7
- E_d , combinación de acciones de diseño en la norma CAN/CGSB 12.20-M89 → página 48
- e_k , frecuencias teórica en k intervalos (o valores) → página 105
- E_p , energía potencial → página 5
- f , factor parcial de m_0 → página 129
- F , carga máxima de rotura de una muestra de vidrio → página 96
- f_0 , resistencia ambiental → página 66
- $f_{0,inerte}$, resistencia inerte → página 66

f_A , factor de área superficiales en tensión → página 63
 $f_{b,k}$ - $f_{g,k}$, resistencia a la rotura adicional de un vidrio templado o semi-templado → página 57
 $f_{b,k}$, resistencia característica a flexión de vidrio superficialmente presforzado → página 57
 F_d , valor de diseño de la combinación de acciones → página 60
 F_D , $\alpha(t)$ y k_{mod} , coeficientes o factores de duración de carga → en las páginas 44, 52 y 56
 $f_{g,d}$, es el esfuerzo admisible de diseño para la norma prEN 13474-3 → página 55
 $f_{g,k}$ y σ_k , valores característicos de la resistencia a flexión → en las páginas 56 y 61
 f_P , factor de la probabilidad de falla seleccionada → página 63
 f_{IS} , factor de duración y de combinación de carga, en condiciones ambientales → página 63
 f_σ , factor de distribución de esfuerzos → página 63
 g , factor parcial de θ_{inerte} → página 129
 G , valor de las acciones permanentes → página 60
 G_a y $P_{f,t}$, probabilidades de falla objetivo de un elemento de vidrio → en las páginas 64 y 66
 g_f , factor global para vidrio recocido → página 129
 h , espesor efectivo del vidrio → página 41 y espesor nominal del vidrio → página 113
 i, j y k , variables enteras → página 44
 k , parámetro para la distribución de probabilidad Gamma → página 107
 k_1, z_2, z_3, z_4 y λ , factores que se relacionan con el cálculo de $\sigma_{máx,d}$ → página 59
 k_A , coeficiente para el efecto del tamaño de área → página 59
 K_I , factor de intensidad de esfuerzo en una fisura para su modo de falla I → página 70
 K_{IC} , factor de intensidad de esfuerzo crítico → página 65
 k_{sp} , factor para el perfil de la superficie del vidrio → página 56
 k_v , factor de fortalecimiento → página 57
 l_1 y l_2 , dimensiones de los lados de muestras rectangulares → página 96
 L_d , carga uniforme de diseño → página 172
 m y k , parámetros de la condición o de defectos de la superficie del vidrio → página 41
 m , coeficiente para calcular R_A → página 50
 M_0 , número promedio de fisuras encontradas a través de un área unitaria → página 120
 m_0 , parámetro de la condición ambiental de las fisuras en la superficie del vidrio → página 67
 $\bar{m}$, parámetro del MPVÚ simplificado, VFAS → página 66
 m_r , relación modular para vidrio → página 120
 n , parámetro de velocidad de grieta del vidrio → página 44
 $n_{b, inerte}$, relación entre esfuerzo máximo y mínimo → página 120

n_k , frecuencias observada en k intervalos (o valores) → página 105
 p^* , carga adimensional → página 59
 $P_{f(0.008)}$, probabilidad de falla en 0.8% → página 169
 P_f , probabilidad de falla → página 40
 $\hat{q}$, carga lateral normalizada → página 41
 q , carga lateral uniforme → página 40
 q_3 , carga de diseño para una duración de 3 segundos → página 44
 q_i , magnitud de carga de duración d_i → página 44
 $Q_{k,1}$, valor característico de la acción variable (principalmente viento y nieve) → página 60
 $Q_{k,i}$, valor característico de la acción variable acompañada (viento o nieve) → página 60
 r , distancia interatómica → página 5
 R , factor de riesgo → página 41
 r_0 , distancia interatómica de equilibrio → página 4
 r_0, r_1 y r_2 , polinomios de ajuste de tercer grado → página 171
 R_A , factor de área → página 49
 R_d resistencia de diseño del panel en la norma CAN/CGSB 12.20-M89 → página 48
 R_f , carga de falla en el tiempo t_f → página 50
 R_{ref} , resistencia de referencia factorizada del vidrio para calcular R_d → página 49
 T , tiempo final comenzado en $t = 0$ → página 65
 t , variable para el tiempo → página 50
 t_0 , periodo de tiempo → página 65
 t_d y t_D , duraciones de carga → página 40
 T_m , temperatura para el punto de fusión → página 7
 t_R , duración de la prueba → página 62
 U , coeficiente en el MPVÚ → página 66
 v_0 , parámetro de velocidad de grieta lineal → página 65
 w , deflexión en el centro de claro de la placa de vidrio → página 171
 χ^2 , prueba de bondad del tipo ji-cuadrada → página 105
 Y , esfuerzo de fluencia → página 7
 Y , factor de corrección o factor de geometría de la fisura → página 65

Símbolos griegos

ΔT , coeficiente para la resistencia al choque térmico → página 7

μ y σ^2 , media y la varianza → página 107
 μ , coeficiente de Poisson en el vidrio → páginas 8
 $\alpha(A_{red})$, coeficiente del tamaño de la superficie en tensión → página 52
 $\alpha(S_v)$, coeficiente de combinaciones de carga y condiciones ambientales → página 52
 α , nivel de significancia → página 106
 α , τ y ρ , absorción, transmisión y reflexión, en el vidrio respectivamente → página 10
 α_D , α_L , α_Q y α_T , factores parciales para acciones de diseño → página 48
 α_T , coeficiente de expansión térmica lineal → página 9
 $\alpha_\sigma(p, \sigma_v)$, coeficiente de distribución del esfuerzo en un elemento de vidrio → página 52
 $\alpha_\sigma(q)$, coeficiente de vidrio recocido → página 53
 β , parámetro de forma de la función de distribución Weibull → página 53
 γ , factor de importancia u ocupación → página 49
 γ , energía de la superficie fracturada → páginas 70
 $\gamma_{M,A}$, factor parcial del material para vidrio recocido → página 56
 $\gamma_{M,E}$, coeficiente parcial para la resistencia inherente → página 52
 $\gamma_{M,V}$, coeficiente parcial para el esfuerzo residual → página 52
 $\gamma_{M,v}$, factor parcial de resistencia por presfuerzo de la superficie → página 57
 γ_R , factor parcial de resistencia → página 61
 ϵ_f , deformación unitaria de falla → página 110
 η_F , factor de distribución de esfuerzos y de área de la superficie → página 61
 θ , parámetro de escala de la distribución de Weibull → página 63
 θ_0 , parámetro de la condición ambiental de las fisuras en la superficie del vidrio → página 66
 θ_{inerte} y β_{inerte} , parámetros de condición inerte de la función de densidad de probabilidad Weibull → página 99
 λ y ξ , parámetros para la distribución de probabilidad Lognormal → página 107
 $\bar{\sigma}$, esfuerzo de referencia ambiental → página 66
 $\tilde{\sigma}_{equivalente, \max}$, esfuerzo máximo equivalente → página 40
 $\hat{\sigma}_{\max}$, esfuerzo normalizado máximo → página 41
 σ_{1,t_0} , esfuerzo principal mayor en un tiempo de referencia t_0 → página 82
 $\sigma_{B, Atest, k}$, valor característico de la resistencia a la fractura inherente de flexión → página 52
 σ_c , esfuerzo normal crítico en el vidrio → página 72
 σ_D , resistencia equivalente → página 62
 σ_E y σ_r , esfuerzos residuales en vidrio templado o semi-templado → páginas 63 y 92
 σ_E , esfuerzo máximo principal en el plano de un elemento de vidrio → página 52.

σ_{ef} , esfuerzo efectivo → página 55
 σ_f , esfuerzo de falla en el vidrio → página 70
 $\sigma_{g,t0}$, resistencia equivalente generalizada t_0 → página 80
 $\sigma_{ges,d,max}$, esfuerzo principal máximo de diseño → página 63
 $\sigma_{máx}$, σ_1 y S_1 , esfuerzos principales máximos en el plano ($S_1 > S_2$) → página 16
 $\sigma_{máx,acceptable}$ y $\sigma_{permisible}$, esfuerzos de tensión máximos permisibles → páginas 45 y 52
 $\sigma_{max,d}$, valor del esfuerzo principal máximo de diseño en el elemento → página 52
 $\sigma_{mín}$, σ_2 y S_2 , esfuerzos principales mínimos en el plano ($S_2 < S_1$) → página 16
 σ_n , esfuerzo de tensión nominal normal al plano de grieta → página 67
 σ_R , resistencia a la flexión → página 62
 $\sigma_{R,t0}$, resistencia equivalente t_0 → página 65
 $\sigma_{R,t0}$, resistencia equivalente t_0 → página 78
 σ_{t0} , esfuerzo estático equivalente t_0 → página 65
 σ_{to} , esfuerzo estático equivalente t_0 → página 78
 $\sigma_{V,k}$, valor del percentil 5 del esfuerzo residual → página 52
 τ , instante en el tiempo → página 67
 Y_G , factor parcial para acciones permanentes → página 60
 Y_Q , factor parcial para acciones variables → página 60
 ψ , factor de combinación → página 49
 $\psi_{0,i}$, factor de combinación para la acción variable acompañada → página 60
 ψ_1 , factor para el valor frecuente de una acción variable → página 60
 $\psi_{2,i}$, factor para el cuasipermanente valor de una acción variable → página 60

Abreviaciones

ANG, vidrio recocido (Annealed glass) → página 10
 CDA, prueba coaxial de doble anillo → página 38
 F3P, prueba de flexión de tres puntos → página 37
 F4P, prueba de flexión en cuatro puntos → página 37
 FTG, vidrio templado (Fully tempered glass) → página 10
 GTF, factor de tipo de vidrio (Glass Type Factor) → página 43
 HSG, vidrio semi-templado (heat strengthened glass) → página 12
 LR, carga resistente en paneles (Load Resistance) → página 42
 MPFV, modelo de predicción de falla de vidrio → página 40

MPFCV, modelo de predicción de falla de cortinas de virio → página 130

MS, silicona modificada → página 26

NFL, factor de carga no factorizada (Non-Factored Load) → página 43

PVB, butiral de polivinilo → página 13

V, N o M, son los patrones de falla descritos en pruebas sobre vigas de vidrio → página 16

Lista de Figuras

Figura 1.1 Proceso de hoja de vidrio soplado desarrollado durante la Edad Media.....	1
Figura 1.2 Pintura del “The Crystal Palace” en el año de 1851, Londres Inglaterra.....	2
Figura 1.3 Ilustración de otra perspectiva de la boquilla de material cerámico usada para inyectado de aire a presión, creada por Fourcault.....	2
Figura 1.4 Muestra las temperaturas alcanzadas durante proceso de fabricación del vidrio flotado (Haldimann, M., 2006).....	3
Figura 1.5 Gráfica, Energía Vs. Distancia interatómica (Bourhis, E. L., 2008).....	5
Figura 1.6. Comparación de la estructura molecular del vidrio con la de un sólido cristalino...	6
Figura 1.7. Graficas de esfuerzo vs deformación del vidrio, acero y la madera. El vidrio solo se comporta elásticamente, en cambio el acero y la madera si presentan un rango de comportamiento inelástico (Wurm, J., 2007).....	9
Figura 1.8 Resultado final, después de un tratamiento de templado en un vidrio normal.....	11
Figura 1.9 Comparación de un vidrio templado contra vidrio recocido, ante flexión (Haldimann, M., 2006).....	12
Figura 1.10 Resultado final, después de un vidrio reforzado al calor.....	12
Figura 1.11 Comparación de fracturas: Vidrio normal (izquierda), vidrio reforzado con calor (en medio) y vidrio templado (a la derecha) (Haldimann, M., 2006).....	13
Figura 1.12 Desempeño antes y después de la fractura de un vidrio laminado con distintos tipo de vidrio (Imagen modificada de Haldimann, M., 2006).....	14
Figura 1.13 Patrón típico de fractura de una placa rectangular de vidrio: $\sigma_{m\acute{a}x} > \sigma_{m\acute{i}n}$ (Beason, W. L., 1980).....	16
Figura 1.14 Patrón típico de fractura de una placa cuadrada de vidrio: $\sigma_{m\acute{a}x} \approx \sigma_{m\acute{i}n}$ (Beason, W. L., 1980).....	16
Figura 1.15 Vigas a pequeña escala, a) patrón recto más bajo en resistencia y e) el patrón M con mayor resistencia (Tomada de Lindqvist, M., 2013).....	17
Figura 1.16 Vista de los patrones de fractura de la figura 1.15 (Lindqvist, M., 2013).....	17
Figura 1.17 Patrones de falla en pruebas concéntricas de doble anillo (Zammit, K. y Overend, M., 2009).....	18
Figura 2.1 Descripción de elementos estructurales de vidrio usados en la construcción para distintas condiciones de carga.....	19
Figura 2.2 Elementos estructurales de vidrio y sus conexiones (Wurm, J., 2007).....	20
Figura 2.3 Distribución de esfuerzos y condiciones de apoyo en paneles.....	21
Figura 2.4 Descripción de conexiones de engranaje.....	22
Figura 2.5 Conexiones mecánicas (Wurm, J., 2007).....	23
Figura 2.6 Conexiones de fuerza o de contacto (Wurm, J., 2007).....	24
Figura 2.7 Conexiones adhesivas.....	25

Figura 2.8 Muestra óptica de la distribución de la tensión sobre conexiones adhesivas (Wurm, J., 2007).....	26
Figura 2.9 Características de los adhesivos.....	27
Figura 2.10 Fijaciones especiales con adhesivos.....	28
Figura 2.11 Sistemas de acristalamiento verticales.....	30
Figura 2.12 Cortinas de vidrio simples (Ignacio, P., 2000).....	31
Figura 2.13 Cortinas de vidrio con tensores y cables.....	32
Figura 2.14 Cortinas de vidrio construidas con montantes y travesaños, frecuentemente empleadas en edificios de mediana a gran altura.....	33
Figura 2.15 Acristalamientos de vidrios horizontales y verticales (Wurm, J., 2007).....	34
Figura 2.16 Sistemas de acristalamiento horizontal (Wurm, J., 2007).....	35
Figura 2.17 Detallado de una conexión para un acristalamiento horizontal contra carga viva (libre tránsito de personas).....	36
Figura 3.1 Efecto de la Carga Estática (Gráfica modificada de Beason, W. L., 1980).....	37
Figura 3.2 Ilustración la resistencia analítica de una grieta bajo esfuerzo constante, con diferentes profundidades de fisura y en el tiempo. Para $v_0 = 6$ mm/s (izquierda) y para $v_0 = 0.01$ mm/s (derecha) (Haldimann, M., 2006).....	38
Figura 3.3 Prueba de flexión de cuatro puntos (izquierda), prueba de flexión de placa en marco (medio) y prueba coaxial de doble anillo (derecha).....	39
Figura 3.4 Prueba CDA (arriba) y distribución de esfuerzo de tensión donde $\sigma_1 = \sigma_2$ (abajo), tomadas de Zammit y Overend, 2009.....	39
Figura 3.5 Gráfico para obtener NFL para vidrio monolítico de 6 mm de Espesor.....	48
Figura 4.1 Observaciones microscópicas de distintas superficies del vidrio.....	69
Figura 4.2 a) Modos de falla I, b) Modo de falla II, c) Modo de falla III y d) Factor de intensidad de esfuerzo KI para el modo I de aplicación de carga.....	71
Figura 4.3 Resistencia para una elemento de vidrio con una fisura en función de la profundidad de grieta y con $Y = 1.12$ y $K_{CI} = 0.75$ MPa-m ^{0.5}	72
Figura 4.4 Idealización de velocidad de propagación de grieta contra intensidad de esfuerzos... ..	73
Figura 4.5 Pruebas sobre vidrio de silicato sódico para definir la región I, ambos ejes se encuentran en escala logarítmica (Imagen modificada de Porter, M., 2001).....	74
Figura 4.6 Resistencia de una fisura en función de la profundidad de grieta inicial a_i y el tiempo de carga. Además, $Y = 1.12$, $K_{CI} = 0.75$ MPa-m ^{0.5} , $n = 16$ y $v_0 = 6$ mm/seg.....	77
Figura 4.7 Resistencia de una fisura en función de la profundidad de grieta inicial, ecuaciones 4.15 y 4.16. Para $Y = 1.12$, $K_{CI} = 0.75$ MPa-m ^{0.5} , $n = 16$ y $v_0 = 6$ mm/seg.....	78
Figura 4.8 Resistencia equivalente para $t_0 = 1, 3$ y 60 seg.....	80
Figura 4.9 Representación gráfica de las ecuaciones que definen $f_{0,inerte}$ (arriba) y f_0 (abajo) para un conjunto de probabilidades de falla objetivo (P_{ft}).....	84
Figura 4.10 Resistencia de referencia ambiental f_0 contra θ_0 y m_0 : para una $P_{ft} = 0.008$ (arriba) y $P_{ft} = 0.0012$	85
Figura 4.11 Resistencia inerte de referencia $f_{0,inerte}$ contra θ_0 y m_0 : para una $P_{ft} = 0.008$ (arriba) y $P_{ft} = 0.0012$	85

Figura 5.1 Influencia del factor de geometría en la resistencia de una fisura (Con $K_{IC} = 0.75$ MPa- $m^{0.5}$).....	89
Figura 5.2 Crecimiento de grieta en la región I de velocidad de grieta contra K_I	90
Figura 5.3 Ilustra la profundidad de grieta a y la longitud de grieta $2c$ en el origen de la fractura (M. Lindqvist, 2013).....	92
Figura 6.1 Vista de anillos de reacción (izquierda) y de carga (derecha).....	95
Figura 6.2 Mecanismo de agrietamiento de muestras de vidrio.....	97
Figura 6.3 Esquema de equipo construido en acero para la prueba coaxial de doble anillo (Escala: 1: 3 y acotación: mm).....	98
Figura 6.4 Vista de la máquina universal Instron-5500R.....	99
Figura 6.5 Localización de las galgas extensiométricas sobre la superficie de una muestra de 19 mm de espesor (galgas colocadas perpendicularmente entre sí).....	100
Figura 6.6 Carga vs. deflexión de varias muestras de vidrio recocido nuevo de 6 mm de espesor.....	100
Figura 6.7 Carga contra deflexión de muestras de vidrio para diferentes espesores.....	101
Figura 6.8 Comportamiento de falla frágil para una muestra de 5 mm de espesor.....	101
Figura 6.9 Conjunto de muestras de vidrio invalidadas.....	102
Figura 6.10 Conjunto de datos de esfuerzos de falla ajustados a la densidad de probabilidad acumulada de Weibull para la determinación de la probabilidad de falla inerte.....	105
Figura 6.11 Modelos probabilísticos ajustados a las muestras de vidrio recocido de 3 mm. FDP: Weibull, Gamma y Lognormal, e histograma de frecuencias (arriba). FDA: Weibull, Gamma y Lognormal (abajo).....	106
Figura 6.12 Modelos probabilísticos ajustados al conjunto de datos de la Tabla 6.3. FDP: Weibull, Gamma y Lognormal, e histograma.....	108
Figura 6.13. Modelos ajustados a las muestras de vidrio recocido nuevo. FDA: Weibull y Gamma. Adjuntamente están también los valores de resistencia característica de cada función.....	110
Figura 6.14 Curva exponencial ajustada a la variación del módulo de elasticidad que tiene como función de la tasa de esfuerzo en cada conjunto de muestras.....	111
Figura 6.15 Mallado utilizado en el modelo 3D con 17251 elementos cuadriláteros tipo Shell...	112
Figura 6.16 Muestra los resultados de esfuerzos y deflexión de la muestra de vidrio recocido de 200 x 200 x 5.74 mm.....	113
Figura 6.17 Curva Carga-deformación para especímenes de 3 mm de espesor.....	114
Figura 6.18 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 3 mm de espesor.....	114
Figura 6.19 Curva Carga-deformación para especímenes de 4 mm de espesor.....	114
Figura 6.20 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 4 mm de espesor.....	115
Figura 6.21 Curva Carga-deformación para especímenes de 5 mm de espesor.....	115
Figura 6.22 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 5 mm de espesor.....	115
Figura 6.23 Curva Carga-deformación para especímenes de 6 mm de espesor.....	116
Figura 6.24 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 6 mm de espesor.....	116
Figura 6.25 Curva Carga-deformación para especímenes de 8 mm de espesor.....	116

Figura 6.26 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 8 mm de espesor.....	117
Figura 6.27 Curva Carga-deformación para especímenes de 10 mm de espesor.....	117
Figura 6.28 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 10 mm de espesor.....	117
Figura 6.29 Curva Carga-deformación para especímenes de 12 mm de espesor.....	118
Figura 6.30 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 12 mm de espesor.....	118
Figura 6.31 Curva Carga-deformación para especímenes de 19 mm de espesor.....	118
Figura 6.32 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 19 mm de espesor.....	119
Figura 6.33 Gráfica parabólica de K_{IC} vs. E , ecuación 5.1, con $Y = 1.12$ y $\gamma = 0.003 \text{ J-mm}^{-2}$	123
Figura 6.34 Gráfica de θ_0 vs. E_2 para los diferentes grupos de espesores de las muestras de vidrio, en conjunto de una curva promedio proveniente de las mismas.....	124
Figura 6.35 Gráfica que demuestra la influencia de m_0 dentro de la ecuación 6.11. Los parámetro que fueron utilizados en esta figura son con $A_0 = 1 \text{ m}^2$, $A = 0.00204 \text{ m}^2$ y $\sqrt{m_r} = 1$	125
Figura 6.36 Ilustra las líneas de θ_0 contra espesor nominal para diferentes módulos de elasticidad (ec. 6.11) y el caso de un valor promedio de θ_0	126
Figura 6.37 Gráfico para encontrar directamente el valor de $\sqrt{m_r}$ ante los posibles valores de E	127
Figura 6.38 Recorrido de $\theta_0 = 59.88 \text{ MPa}$ para estimar el valor de 48.38 MPa	129
Figura 7.1 Gráfica de carga vs. deflexión, Ilustra la aproximación de las curvas de la teoría de placas y de la teoría de grandes deformaciones ante los datos experimentales de una placa de vidrio templado de $1.676 \text{ m} \times 1.676 \text{ m}$ y espesor de 5.66 mm	133
Figura 7.2 Condiciones de apoyo para sistemas de acristalamiento. (Imagen tomada del programa SJ Mepla).....	135
Figura 7.3 Malla representativa del modelo de un cuarto de placa.....	136
Figura 7.4 Condición de carga vs. intensidad de carga uniforme utilizada en el modelo de placa de vidrio recocido de 6 mm de espesor.....	136
Figura 7.5 Deflexión vs. carga uniforme resultados obtenidos de Ansys Workbench 14.5 para la placa de vidrio recocido de 2 m por 2 m y 6 mm de espesor.....	137
Figura 7.6 Gráficos de presión uniforme contra esfuerzos principales, S_1 (arriba) y S_2 (abajo), con ajuste lineal sobre ellos, indicada también están sus ecuaciones respectivas.....	138
Figura 7.7 Muestra los resultados de esfuerzos y deflexión de la placa en estudio (espesor, 6 mm).....	139
Figura 7.8 Distribución de esfuerzos principales máximo (izquierda) y mínimo (derecha) en cada elemento de subárea, A_i	140
Figura 7.9 Interfaz gráfica para el usuario del programa de MPFCV, generador de curvas de fragilidad de carga uniforme contra la probabilidad de falla.....	141
Figura 7.10 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de $2500 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ (arriba) y $3500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ (abajo).	142

Figura 7.11 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 3 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 3 mm (abajo)...	143
Figura 7.12 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 4 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 4 mm (abajo)...	144
Figura 7.13 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 5 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 5 mm (abajo)...	145
Figura 7.14 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 6 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 6 mm (abajo)....	146
Figura 7.15 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 8 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 8 mm (abajo)...	147
Figura 7.16 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 10 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 10 mm (abajo).	148
Figura 7.17 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 12 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 12 mm (abajo).	149
Figura 7.18 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 16 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 16 mm (abajo).	150
Figura 7.19 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 19 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 19 mm (abajo).	151
Figura 7.20 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 22 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 22 mm (abajo).	152
Figura 7.21 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 25 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 25 mm (abajo).	153
Figura 7.22 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 2.5$ mm: Gráfico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	155
Figura 7.23 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 3$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	156
Figura 7.24 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 4$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	157
Figura 7.25 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 5$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	158
Figura 7.26 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 6$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	159
Figura 7.27 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 8$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	130
Figura 7.28 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 10$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	161

Figura 7.29 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 12$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	162
Figura 7.30 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 16$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	163
Figura 7.31 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 19$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	164
Figura 7.32 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 22$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	165
Figura 7.33 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 25$ mm: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).....	166
Figura 7.34 Superficie 3D de los esfuerzos principales máximos (S_1) en el plano de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm, como función de su espesor (h) y de su módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa.....	167
Figura 7.35 Superficie 3D de los esfuerzos principales mínimos (S_2) en el plano de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm, como función de su espesor (h) y de su módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa.....	168
Figura 7.36 Variación del esfuerzo principal máximo en el plano como función de E y de la intensidad de carga lateral uniforme, con el panel de estudio.....	169
Figura 7.37 Variación del esfuerzo principal máximo en el plano como función de E y de la intensidad de carga lateral uniforme, con el panel de estudio.....	170
Figura 7.38 Superficie en 3D para deflexiones máximas en el centro (w) de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm, como función de su espesor (h) y del módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa.....	173
Figura 7.39 Grafica de w Vs. E para diferentes espesores de placa de vidrio recocido.....	174
Figura B.1 Patrón de grietas de falla de la muestra 8 de vidrio recocido de 3 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.44 mm, carga de falla = 2617.03 N y esfuerzo de falla = 182.74 MPa.....	186
Figura B.2 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 4 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.00 mm, carga de falla = 3576.76 N y esfuerzo de falla = 133.94 MPa.....	187
Figura B.3 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 5 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.03 mm, carga de falla = 6416.69 N y esfuerzo de falla = 150.73 MPa.....	187
Figura B.4 Patrón de grietas de falla de la muestra 2 de vidrio recocido de 6 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.80 mm, carga de falla = 7072.81 N y esfuerzo de falla = 121.58 MPa.....	188

Figura B.5 Patrón de grietas de falla de la muestra 4 de vidrio recocido nuevo de 8 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.78 mm, carga de falla = 14121.82 N y esfuerzo de falla = 135.10 MPa.....	188
Figura B.6 Patrón de grietas de falla de la muestra 3 de vidrio recocido de 10 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.68 mm, carga de falla = 16640.44 N y esfuerzo de falla = 103.65 MPa.....	189
Figura B.7 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 12 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.65 mm, carga de falla = 21386.02 N y esfuerzo de falla = 86.64 MPa.....	189
Figura B.8 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 19 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.01 mm, carga de falla = 46615.11 N y esfuerzo de falla = 80.03 MPa.....	190

Lista de Tablas

Tabla 1.1 El vidrio dentro de los diferentes estados físicos de la materia, con relación con el orden molecular y la distancia interatómica de equilibrio (r_0). El gas perfecto significa que las interacciones entre las moléculas pueden ser nulas. El cristal perfecto es un concepto usado para describir la estructura cristalina con una celda de unidad repetida. De hecho, todos los cristales verdaderos tienen defectos (Bourhis, E. L., 2008).....	5
Tabla 1.2 Energías para Cuatro Tipos de Enlaces Atómicos (Bourhis, E. L., 2008).....	6
Tabla 1.3 Categoría de materiales con sus respectivas ventajas y desventajas, el vidrio se encuentra dentro de los cerámicos (Tabla modificada de Bourhis, E. L., 2008).....	7
Tabla 1.4 Composición química del vidrio silicato y del vidrio sílice de boro; valores indicados en % de masa (Haldimann, M. 2006).....	8
Tabla 1.5 Propiedades generales de vidrio recocido, vidrio templado y vidrio laminado (Garg, N. K., 2007).....	14
Tabla 3.1 Factores de tipos de vidrio (GTF) para un único vidrio monolítico o vidrio laminado (norma ASTM E 1300-12a).....	43
Tabla 3.2 Factores de tipos de vidrio (GTF) para doble acristalamiento en vidrio aislante (IG), carga de corta duración (norma ASTM E 1300-12a).....	43
Tabla 3.3 Factores de tipos de vidrio (GTF) para doble acristalamiento en vidrio aislante (IG), carga de larga duración (norma ASTM E 1300-12a).....	43
Tabla 3.4 Espesor de vidrios nominal y mínimo (norma ASTM E 1300-12a).....	44
Tabla 3.5 Factores de duración de carga (norma ASTM E 1300-12a).....	44
Tabla 3.6 Esfuerzo aceptable de borde (norma ASTM E 1300-12a).....	46
Tabla 3.7 Factor de combinación, ψ (considera el efecto de peligro en caso de colapso del edificio) para el efecto más desfavorable (norma CAN/CGSB 12.20-M89).....	49
Tabla 3.8 Coeficiente de duración de carga C_3 (norma CAN/CGSB 12.20-M89).....	49
Tabla 3.9 Esfuerzos permisibles (Mpa) para vidrios bajo carga lateral e impacto de acuerdo a las normas Alemanas.....	52
Tabla 3.10 Factor para el perfil de la superficie del vidrio k_{sp} (norma prEN 13474-3).....	57
Tabla 3.11 Factor de duración de carga k_{mod} (norma prEN 13474-3).....	57
Tabla 3.12 Valores sugeridos para el factor parcial de material (norma prEN 13474-3).....	57
Tabla 3.13 Valores de resistencia característica y factores de fortalecimiento de vidrio presforzado $f_{b,k}$ (norma prEN 13474-3).....	58

Tabla 3.14 Factor de fortalecimiento k_v (norma prEN 13474-3).....	59
Tabla 3.15 Factores parciales de carga (norma prEN 13474-3).....	61
Tabla 3.16 Factores Ψ (norma prEN 13474-3).....	61
Tabla 3.17 Factor η_F (Haldimann, M., 2006).....	63
Tabla 3.18 Factor η_D (Haldimann, M., 2006).....	63
Tabla 4.1 Factor de intensidad de esfuerzo K_{IC} para vidrios sodocálcicos de sílice (Tabla modificada de Haldimann, M., 2006).....	72
Tabla 5.1 Influencias principal que tienen los parámetros en la implementación del MPVÚ de un elemento de vidrio (Tabla modificada de Haldimann, H., Luible, A. y Overed, M., 2008).....	86
Tabla 5.2 Factor de intensidad de esfuerzo crítico en función del módulo de elasticidad.....	87
Tabla 5.3 Limite de esfuerzo de corrosión K_{th} para vidrio de sodocálcico de sílice para diferentes condiciones ambientales (Haldimann, M., 2006).....	87
Tabla 5.4 Valores del factor de geometría Y de fisuras de superficie determinados analíticamente y experimentalmente (Tabla modificada de Haldimann, M., Luible, A. y Overed, M., 2008).....	87
Tabla 5.5 Factor de geometría, Y. Borde cortado por fabricante. Probado en pruebas de F4P a tasa alta de carga y con tasa de deformación controlada de 0.133 mm/s (Lindqvist, M., 2013).....	88
Tabla 5.6 Parámetros de velocidad de grieta (Tabla modificada de Haldimann, M., Luible, A. y Overed, M., 2008).....	90
Tabla 5.7 Parámetros de condición de superficie de pruebas de laboratorio en condiciones ambientales [$n = 16$, $v_0 = 0.01$ mm/s] (Tabla modificada de M. Haldimann, Andreas Luible y Mauro Overed, 2008).....	91
Tabla 5.8 Análisis de datos estadísticos del esfuerzo residual para vidrio termo-endurecido (Haldimann, M., 2006).....	92
Tabla 5.9 Análisis de datos estadísticos del esfuerzo residual para vidrio templado (Haldimann, M., 2006).....	93
Tabla 6.1 Configuración de pruebas CDA.....	97
Tabla 6.2 Especímenes de vidrio recocido nuevo para prueba CDA bajo tasa de carga de 79 kN.....	99
Tabla 6.3 Resultados de falla de muestras de vidrio recocido nuevo.....	102
Tabla 6.4. Parámetros de densidad de probabilidad, media y varianza.....	107
Tabla 6.5. Prueba de bondad ji-cuadrada para ajuste de bondad relativa.....	107
Tabla 6.6. Resumen de resultados de las Pruebas de bondad ji-cuadrada.....	107
Tabla 6.7. Parámetros de densidad de probabilidad, media y varianza.....	108
Tabla 6.8. Cálculos de prueba de bondad de ajuste ji-cuadrada.....	109

Tabla 6.9 Datos experimentales de vidrio recocido bajo tasa de 4 mm/min (Costa y et al., 2001).....	110
Tabla 6.10 Módulo de elasticidad para vidrio recocido.....	111
Tabla 6.11 Contiene los valores de $\sqrt{m_r}$ como función de E_1 (Tabla 6.4) y E_2	123
Tabla 6.12 Contiene el cálculo de los parámetros θ_0 y m_0 , con datos de los experimentos.....	124
Tabla 6.13 Contiene los valores de $\theta_0[\beta, \theta, m_r]$ (en MPa), donde $A_0 = 1 \text{ m}^2$, $A = 0.00204 \text{ m}^2$ y $n_b = 1$	124
Tabla 6.14 Contiene los valores de los parámetros promedio de diseño.....	126
Tabla 6.15 Datos para el ejemplo.....	128
Tabla 7.1 Modelos analíticos de paneles desarrollados en Ansys 14.5 para los espesores de 2.5 mm, 3mm, 4 mm, 5 mm, 6mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm y 25 mm, con diferentes relaciones de aspecto (a/b , donde $a \geq b$), a y b son las dimensiones de la placa en metros.....	134
Tabla 7.2 Conjunto de parámetros y propiedades considerados para la construcción de curvas de fragilidad para cada panel de vidrio recocido nuevo.....	140
Tabla 7.3 Resumen de resultados de los métodos aproximado y preciso para la predicción de la resistencia de falla del panel de vidrio recocido nuevo.....	171
Tabla 7.4 Factores de duración de carga.....	175
Tabla A.1 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 3 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	182
Tabla A.2 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 4 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	182
Tabla A.3 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 5 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	182
Tabla A.3 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 5 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	183
Tabla A.5 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 8 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	183
Tabla A.6 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 10 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	184
Tabla A.7 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 12 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	184
Tabla A.8 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 19 mm en condiciones cercanas a las inertes.....	185
Tabla C.1 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 2.5 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	191

Tabla C.2 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 3 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	192
Tabla C.3 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 4 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	193
Tabla C.4 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 5 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	194
Tabla C.5 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 6 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	195
Tabla C.6 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 8 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	196
Tabla C.7 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 10 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	197
Tabla C.8 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 12 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	198
Tabla C.9 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 16 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	199
Tabla C.10 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 19 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	200
Tabla C.11 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 22 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	201
Tabla C.12 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 25 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.....	202

El Vidrio como Material de la Construcción

1.1 Origen e historia del vidrio

La edad antigua marcó el comienzo sobre el origen de un nuevo material para la construcción y que hoy conocemos como vidrio, a través de los descubrimientos arqueológicos e históricos localizados en las regiones de Mesopotamia a partir del año 5000 A.C. y durante el desarrollo de la cultura Egipcia, 3500 años A.C. Un descubrimiento más durante el periodo 668 a 629 A.C. fue el “Manual del Vidrio”, grabado en tablillas de arcilla, perteneciente a la gran biblioteca del rey Asirio Asurbanipal en Nínive. El manual dice: “Tome 60 partes de arena, 180 partes de cenizas de plantas marinas, 5 partes de tiza; y usted obtendrá vidrio” (Schittich, C., Staib, G., Balkow, D. et al., 2007). Dichas proporciones son correctas de acuerdo con la composición química actual que se conoce del vidrio.

Después el vidrio soplado fue una técnica dominada por parte de los artesanos sirios, alrededor del año 200 A.C. en Siria. Esto se debió principalmente a la elaboración de herramientas en hierro y en especial de la barra de soplado.

La época romana (27 A. C. a 476 D. C.) fue otro gran periodo donde sobresalió la elaboración del vidrio, debido a los avances tecnológicos con que se contaba en aquél entonces. Se sabe que los romanos fabricaban el vidrio con una técnica nueva, que consistía en verter una cantidad de vidrio fundido sobre una placa de metal con una capa previa de arena que evitaba la adherencia entre materiales, además durante el enfriamiento del vidrio, los romanos estiraban el vidrio para conseguir el tamaño y la uniformidad del espesor deseado.

La edad Media (entre el siglo V y el XV) representa otro periodo en el manejo de nuevas técnicas para la fabricación de vidrio. Debido a la demanda de decoración de iglesias y monasterios, lo que propició la necesidad de incrementar la velocidad de producción del vidrio. Las dos técnicas de producción de vidrio más importantes de la Edad Media fueron: la hoja de vidrio soplado (Figura 1.1) y el vidrio corona. Tanto el vidrio corona como el vidrio soplado eran procesos muy artesanales, puesto que el artesano iniciaba tomando una burbuja de vidrio fundido que debía retener con la barra de soplado por uno de sus extremos y con el otro extremo debía soplar fuertemente para conseguir inyectar aire y poder crear una burbuja, la cual debía estarse recalentando continuamente para formar la pieza de vidrio (Schittich, C., Staib, G., Balkow, D. et al., 2007).

Durante los siglos XV y XVIII, Venecia alcanzó un importante prestigio por la calidad de sus productos de vidrio, ya que contaban con decoraciones y una gran variedad de recipientes, como la fabricación de espejos con una base de mercurio y estaño.

El año de 1687 destacó por la técnica desarrollada por el francés Bernard Perrot. Su modelo

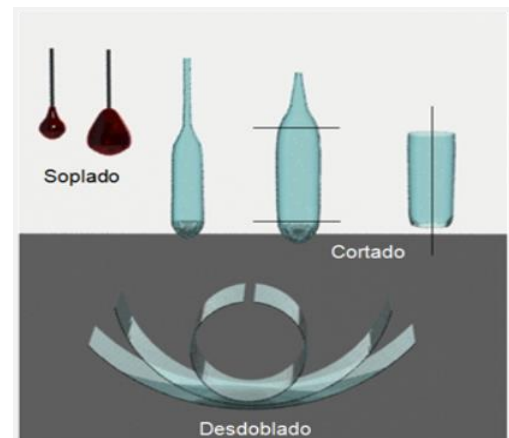


Figura 1.1 Proceso de hoja de vidrio soplado desarrollado durante la Edad Media.

de fabricación comenzaba en el horno, de donde se sacaba un cucharón de hierro lleno de vidrio fundido, el cual era llevado y vaciado sobre una superficie de hierro caliente o mesa-rodillo, además, el rodillo de hierro estiraba al vidrio, durante el tiempo de enfriado. La aplicación de este método disminuyó la mano de obra; sin embargo, aún era necesario pulir las caras del vidrio, incrementándose de esta forma su costo. A partir de ella, las piezas alcanzaban dimensiones de 1.2 x 2 metros.

El periodo de la Industrialización (mitad del siglo XVIII y principios del XIX) no se hizo esperar y fue en el año de 1839 que la Chance Brother's implemento un proceso de cortado, rectificado y pulido de vidrio soplado, en un tiempo mínimo de producción. Con estos adelantos se pudo construir el "The Crystal Palace" de Londres Inglaterra durante los años 1850 y 1851, véase Figura 1.2. Pero a inicios del siglo XIX el estadounidense John H. Lubbers, desarrolló por medios mecánicos el soplado continuo.

El siglo XX fue el comienzo de una nueva era para darle al vidrio su máximo esplendor. También este siglo se caracterizó por los avances de la tecnología en otras áreas de la ciencia como; la medicina y la física, pero sobre todo, las máquinas sustituyeron en gran medida la mano del hombre, en especial si se trataba de la producción continua de vidrio.

El Belga Emile Fourcault dio la primera aportación en el año de 1913, su proceso iniciaba con la fusión de la materia prima en un horno, luego colocada en un tanque caliente, en donde se le inyecta aire comprimido a través de una boquilla de material cerámico que se encuentra por debajo de la columna de vidrio fundido, logrando el alzado vertical de una lámina de vidrio que era dirigida y sostenida por unos rodillos metálicos enfriados por agua, la Figura 1.3 muestra la representación esquemática.

Finalmente el proceso de fabricación de vidrio moderno que se mantiene hasta nuestros días, y que muy probablemente corresponde el vidrio de la ventana de nuestra casa, está elaborado con este método, el cual fue inventado en la década de 1950 por Alastair Pilkington y es conocido como vidrio "Float" o vidrio flotado.

Dicho proceso comienza con mezclar la materia prima, cuya composición principal es: sodio, calcio y sílice, una vez hecho esto se ingresa al horno con una temperatura de hasta 1550°C, temperatura que permite que se funda y al mismo tiempo genera un estado líquido con

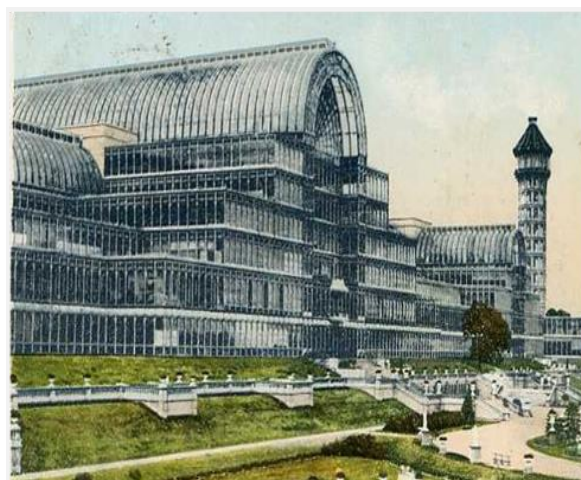


Figura 1.2 Pintura del "The Crystal Palace" en el año de 1851, Londres Inglaterra.

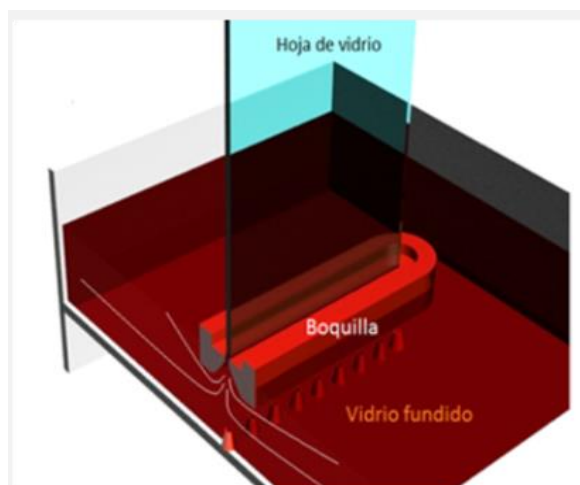


Figura 1.3 Ilustración de otra perspectiva de la boquilla de material cerámico usada para inyectado de aire a presión, creada por Fourcault.

cierto grado de viscosidad de la mezcla, para que de esta manera después se vierta continuamente a 1000°C a una piscina con estaño líquido. Debido a que el estaño se mantiene en estado líquido en un intervalo de temperaturas comprendidas entre los 232°C y los 2270°C, a su vez el estaño siempre se mantiene en el fondo debido a su peso específico mayor que el del vidrio fundido. Para evitar la oxidación del vidrio durante el proceso se crea una atmósfera inerte, compuesta de hidrógeno y nitrógeno. Luego el vidrio flota sobre el estaño y se nivela a medida que se extiende por la piscina, dándole al vidrio una superficie lisa y perfecta por ambos lados. El espesor se determina, y con esto el vidrio viaja sobre rodillos hasta otra cámara con baja temperatura, 600°C, la cual es una cámara de enfriado gradual llamada “Lehr”, véase la Figura 1.4. Sin embargo, el mismo vidrio debe pasar por el área de inspección para cumplir con requisitos de calidad, de modo que la revisión evita que las imperfecciones y los defectos en la superficie pasen desapercibidos, siendo estos eliminados durante el corte, estos forman los desperdicios que emprenden un camino de vuelta al inicio del proceso. Por lo que los tamaños típicos son de 3.12 m x 6.00 m como máximo, pero esto depende mucho de la capacidad de la empresa fabricante. Todo este proceso es la base de creación de todo tipo de vidrio utilizado en la construcción, como son los vidrios laminados y los vidrios templados. Finalmente, a raíz de este avance tan importante, el vidrio se ha convertido en el material favorito de muchos diseñadores que desean aplicarlo a grandes y nuevas ideas a la rama de la construcción.

Durante la primera década del siglo XXI y hasta nuestros días, sin duda, una vez que se consiguió unificar los avances tecnológicos con el control de los procesos de fabricación para conseguir productos de vidrio de excelente calidad, así como también el lograr la aparición de otros y distintos tipos de vidrio para ventana, como son los casos de los vidrios laminados y templados, cada uno de ellos está definido por tener propiedades y características muy particulares que más adelante vamos a describir. Además se ha visto una gran aplicabilidad y aceptación en la arquitectura moderna por el material de vidrio, ya que este permite satisfacer las exigencias propias de grandes proyectos, que como generalmente sucede es empleado como elemento de recubrimiento de fachadas o en casos especiales como elemento de soporte (viga, columna, losa, etc.) en casas y edificios de todo tipo de uso (oficinas, comercial, residencias y museos entre otros).

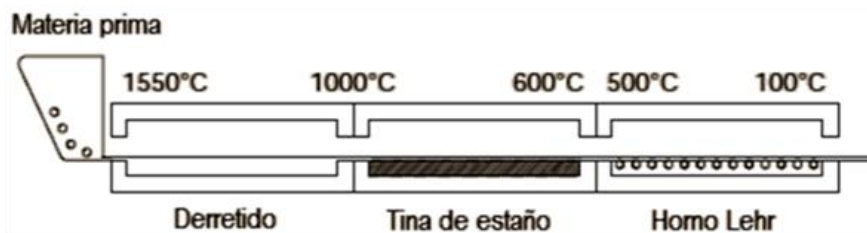


Figura 1.4 Muestra las temperaturas alcanzadas durante proceso de fabricación del vidrio flotado (Imagen modificada de Haldimann, M., 2006).

Por ello al inicio de siglo XXI, los diseñadores se han dado cuenta de que el vidrio como material se puede aprovechar al máximo si se toman en consideración sus propiedades mecánicas; no obstante se han implementado recursos e investigaciones directas sobre el tema para generar conocimientos que se reflejen en códigos de diseño y en normativas de pruebas experimentales validadas para elementos estructurales de vidrio. Este tipo de trabajos se pueden encontrar en varias partes del mundo cuyo objetivo común es garantizar el buen comportamiento y uso del vidrio como material de construcción.

1.2 Definición del vidrio como material

Las acciones que generalmente se consideran dentro de la construcción para determinar la resistencia del vidrio son por ejemplo: el peso propio, que para el vidrio no suele ser problema; sin embargo existen otras acciones como las presiones impuestas por el efecto de la acción del viento, las cuales suelen ser muy importantes en determinados lugares y alturas para los edificios; los cambios de temperatura; la corrosión de la superficie del vidrio por presencia de humedad del medio ambiente; acciones de impacto por objetos o actividad de los humanos; y las fuerzas percibidas durante un evento sísmico. Sin duda, el efecto que producen las acciones a que va estar sometida una estructura es un factor importante que debe ser considerado en el estudio del comportamiento del vidrio, ya que el vidrio presenta una falla de tipo frágil, y tal vez también debamos saber sobre las propiedades mecánicas del vidrio antes de poder diseñar elementos conformados por este tipo de material. Además, quizás es necesario cuestionarnos sobre los siguientes aspectos:

- ¿Cómo podemos definir el vidrio?,
- ¿Cuál es la composición química del vidrio que se utiliza con mayor frecuencia en la construcción?
- ¿Cuáles son los tipos de vidrio implementados en la construcción?
- ¿Qué otras propiedades mecánicas tiene el vidrio?, entre otras preguntas.

En este trabajo se tratará de dar respuesta a preguntas de esta naturaleza con el objetivo de coadyuvar con el entendimiento sobre el vidrio, así como saber por qué o de donde proviene la confianza estructural concebida o supuesta de un número importante de trabajos que se han ejecutado en la práctica constructiva, desarrollados hace apenas unas décadas en muchas ciudades del mundo. Lo cual servirá de base conceptual para el desarrollo de los siguientes capítulos que se presentan en este trabajo.

El vidrio quizás no tiene una definición muy convincente como la gran mayoría de los materiales utilizados comúnmente en la rama de la construcción, porque hasta ahora sigue investigado; sin embargo, lo podemos definir de la siguiente manera: el vidrio es un material inorgánico en estado sólido con una fase cristalina amorfa. Además de que el vidrio es un material isotropo, es decir sus propiedades no varían como función de su dirección u orientación.

El vidrio en sí es un material inorgánico debido a su composición química, ya que los elementos químicos que lo integran son puramente inorgánicos (sílice, calcio, sodio, boro, entre otros), estos son elementos primarios encontrados en una matriz de vidrio y serán analizados en la Sección 1.3. A continuación se describe el origen de una fase cristalina amorfa del vidrio.

1.2.1 Origen de la fase cristalina amorfa del vidrio

Para ilustrar un poco más porqué el vidrio es un sólido con estructura molecular amorfa se presenta la Tabla 1.1, donde se describe con mayor detalle su estructura para diferentes estados físicos de la materia. Para distinguir la naturaleza de los materiales es importante saber que parámetros los gobiernan y que los hace ser diferentes unos con respecto a otros. En el caso del vidrio es importante hablar del estado de agregación o físico de la materia (Gas líquido y sólido, principalmente), de su distancia interatómica de equilibrio (r_0) y de su arreglo molecular, por lo que si se modifica alguno de estos parámetros, su efecto se verá reflejado de manera directa sobre

el material. Entonces la Tabla 1.1 presenta los estados físicos de la materia, la distancia interatómica de equilibrio (r_0) con valores de cero a infinito, donde se presentan leyendas descriptivas del ordenamiento molecular que va de la ausencia hasta el perfecto orden molecular.

Tabla 1.1 El vidrio dentro de los diferentes estados físicos de la materia, con relación con el orden molecular y la distancia interatómica de equilibrio (r_0). El gas perfecto significa que las interacciones entre las moléculas pueden ser nulas. El cristal perfecto es un concepto usado para describir la estructura cristalina con una celda de unidad repetida. De hecho, todos los cristales verdaderos tienen defectos (Bourhis, E. L., 2008).

Estado de la materia	Distancia y orden			
		0	3-10 r_0	$\gg 100 r_0$
	Gas	Gas perfecto		
	Líquido		Líquido ↓	
	Sólido		Vidrio →	Cristal
		Ningún orden	Poco orden	Mayor orden
				Perfecto cristal
				Perfecto orden

Solo para explicar de manera general lo que se muestra en la tabla anterior, sobre todo la influencia del parámetro de la distancia interatómica de equilibrio, considérese además la curva de energía contra distancia interatómica (ejes vertical y horizontal, respectivamente, de la Figura 1.5) de un enlace simple entre dos átomos de un material cualquiera.

El punto r_0 es la distancia interatómica de equilibrio comprendida entre átomos, se produce debido a una interacción predominante de los efectos de repulsión y de atracción de los átomos involucrados que crean el enlace. También se muestran estas contribuciones en la gráfica de la Figura 1.5. Al mismo tiempo el punto r_0 define la energía mínima del enlace, que es lo mismo que la energía requerida para romper el enlace y lograr la separación de los átomos, esto se puede conseguir bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. También la suma entre la atracción y la repulsión conforman la curva de energía potencial (E_p) mostrada de igual manera en la gráfica 1.5, esta nos ayuda a definir de qué forma se está dado el enlace (atracción o repulsión) y la cantidad de energía disponible. En consecuencia, la curva energía contra distancia interatómica y el punto r_0 , suelen ser diferentes para cada tipo de material, aunque con mucha utilidad como para establecer valores bien definidos atómicamente.

Si regresando a la Tabla 1.1, pero ahora seguimos las flechas que se muestran, se observa que el vidrio tiene la misma distancia interatómica que la de un líquido, valores de r_0 en el intervalo de 3 a 10. Ambos estados de la materia tienen poco ordenamiento molecular; sin embargo, estos presentan comportamientos muy diferentes. El vidrio es totalmente rígido como un sólido. Para poder explicar en cierta forma como sucede esto, recordemos el proceso de fabricación del vidrio, lo cual nos muestra claramente la respuesta, debido a que durante la creación

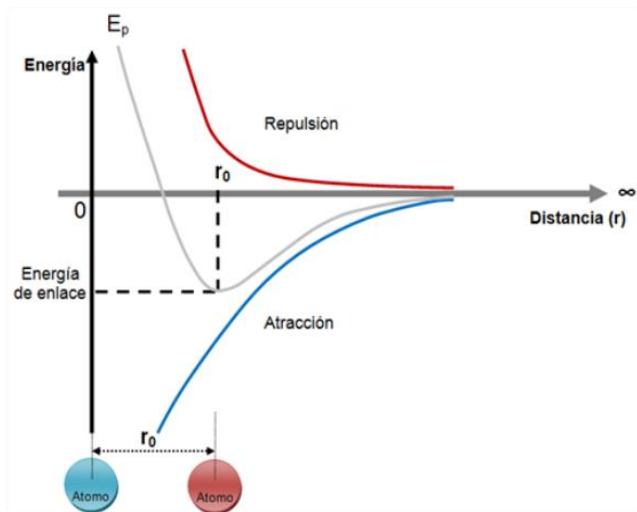


Figura 1.5 Gráfica, Energía Vs. Distancia interatómica (Imagen modificada de Bourhis, E. L., 2008).

del vidrio, este pasa del estado líquido viscoso a un sólido durante el proceso de enfriamiento. La forma en que la transición ocurre, es tan rápida que las moléculas en el vidrio no tienen el tiempo suficiente para buscar una posición ordenada dentro de la estructura atómica del vidrio. Es por eso que en ocasiones se dice que el vidrio es un líquido con cierta viscosidad infinita. La verdad es que aún se sigue investigando sobre el estado físico real del vidrio, por lo cual para los fines de este trabajo nos basta con la definición establecida previamente, que es totalmente válida en el ámbito científico.

Antes de continuar con los siguientes temas, observemos en la Figura 1.6 más de cerca la estructura atómica o red cristalina amorfa con la que cuenta el vidrio en comparación con la de un silicato en fundición y la de un cristal.

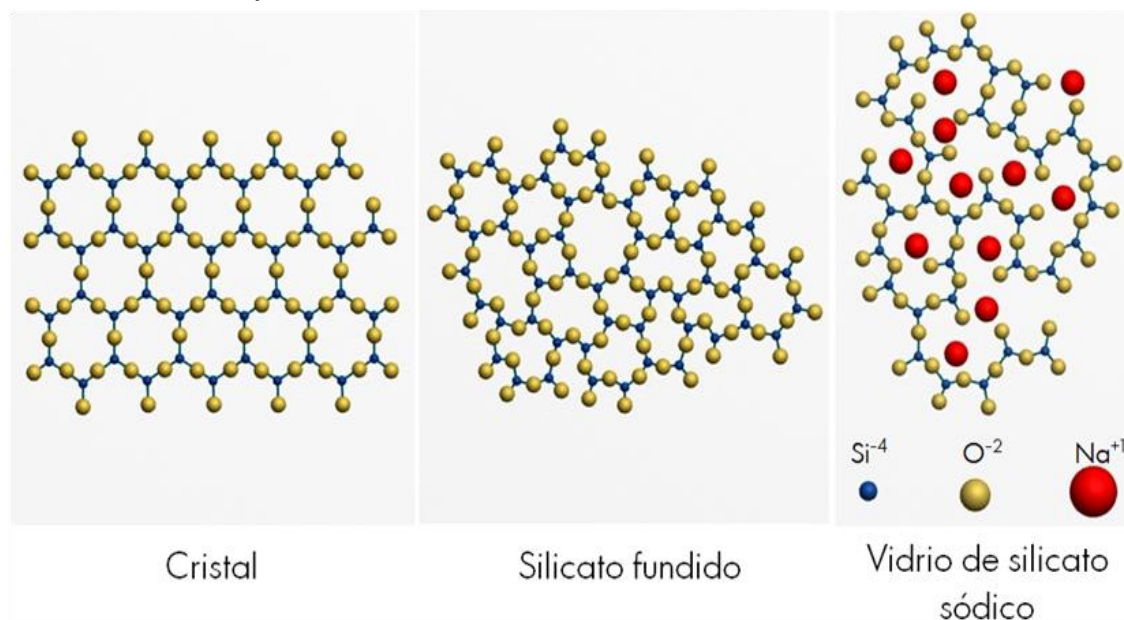


Figura 1.6. Comparación de la estructura molecular del vidrio con la de un sólido cristalino.

Además de lo anterior, el vidrio se considera en el grupo de los cerámicos, quienes poseen enlaces iónicos o covalentes con los más altos niveles de energía (Tabla 1.2), por lo que encaja perfectamente bien con las propiedades de los cerámicos, véase Tabla 1.3.

Tabla 1.2 Energías para Cuatro Tipos de Enlaces Atómicos (Bourhis, E. L., 2008).	
Tipos de enlace	Energía de enlace (kjoule/mol)
Iónico	600-1600
Covalente	500-1300
Metálico	100-840
Van der Waals	<45

Tabla 1.3 Categoría de materiales con sus respectivas ventajas y desventajas, el vidrio se encuentra dentro de los cerámicos (Tabla modificada de Bourhis, E. L., 2008).

Material	Ventajas	Desventajas
Metales	Tiene Rigidez Elevada ($E \approx 1020000 \text{ kgf/cm}^2$). Son dúctiles Se Producen en Formas Complejas Buena conductividad térmica y eléctrica Elevado punto de fusión ($T_m = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)	Bajo esfuerzo de fluencia para metales puros. Necesita de aleaciones. Corrosión, se necesita recubrimiento Elevada densidad
Cerámicos	Rigidez $E \approx 204000 \text{ kgf/cm}^2$ Elevado esfuerzo de fluencia $Y > 30600 \text{ kgf/cm}^2$ Dureza alta Elevado punto de fusión ($T_m = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$) Resistencia a la corrosión Buena resistencia a la conductividad térmica y eléctrica	Fragilidad Baja resistencia al choque térmico ($\Delta T \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$) Dificultad para producir formas complejas Elevada densidad
Polímeros	Ductilidad, Producción de formas complejas Resistencia a la corrosión Baja densidad	Baja rigidez ($E \approx 20400 \text{ kgf/cm}^2$) Baja transmisión de temperatura Baja tenacidad
Compuestos	Rigidez ($E > 509860 \text{ kgf/cm}^2$) Elevado esfuerzo de Fluencia ($Y \approx 4080 \text{ kgf/cm}^2$) Resistencia a la fatiga Resistencia a la corrosión Tenacidad Densidad de media a baja	Dificultad para producirse en formas complejas Costosos

1.3 Composición química del vidrio

Una vez conocida la estructura cristalina amorfa del vidrio, debemos conocer su composición química. La composición química del vidrio que generalmente se emplea en la construcción se compone de hasta un 74% de óxido de silicio (SiO_2), y se trata de uno de los elementos más abundantes sobre la corteza terrestre que se encuentra en forma de arena de cuarzo, también está conformado por una parte importante de óxido de calcio (CaO), hasta un 14%, que sirve de estabilizador de la reacción y a su vez le da al vidrio una mayor resistencia química, estos dos componentes sumados dan un total de 88% de la masa del material, y al vidrio que contiene porcentajes mayores suele llamársele vidrio de silicato. Si además se incluyen a los componentes anteriores óxido de sodio, con valores que pueden ser del 10% al 16% que ayudan además a bajar el punto de fundición, el vidrio adquiere el nombre de vidrio de silicato sódico, se agregan también en un porcentaje más pequeño aditivos e impurezas, que influyen en las propiedades ópticas, térmicas y de tonalidad del vidrio. De hecho la composición más usada de vidrio para la construcción es la del vidrio de silicato sódico.

Además de la composición química básica del vidrio para la construcción, también existe la del vidrio compuesto con hasta un 15% de óxido de boro, que es un vidrio útil para casos especiales debido a que la adición de este material permite desarrollar su principal propiedad que es su resistencia a pruebas de calor, es decir es capaz de resistir cambios bruscos de temperatura y hasta incendios, por lo que tiene mayor capacidad térmica, además de no sufrir daño ante sustancias altamente ácidas e hídricas. Aunque la rotura de este tipo de vidrio suele ser la misma que se presenta en un vidrio de silicato sódico. En la Tabla 1.4 se presentan las dos composiciones de los vidrios más comunes y que son formalizadas por los estándares europeos.

Tabla 1.4 Composición química del vidrio silicato y del vidrio sílice de boro; valores indicados en % de masa (Haldimann, M. 2006).

Componentes		Vidrio de silicato sódico	Vidrio sílice de boro
Arena de sílice (óxido de silicio)	SiO ₂	69 - 74%	70 - 87%
Limo (óxido de calcio)	CaO	5 - 14%	-
Óxido de sodio	Na ₂ O	10 - 16%	0 - 8%
Óxido de Boro	B ₂ O ₃	-	7 - 15%
Óxido de potasio	K ₂ O	-	0 - 8%
Magnesia	MgO	0 - 6%	-
Alúmina	Al ₂ O ₃	0 - 3%	0 - 8%
Otros		0 - 5%	0 - 8%

1.4 Propiedades mecánicas del vidrio

La naturaleza del vidrio sobre todo cuando se habla de su resistencia mecánica se dice en términos generales que es realmente buena. Si recordamos que el vidrio cuenta con enlaces químicos fuertes que mantienen unidas sus moléculas, a partir de esto se puede obtener una estimación teórica de la resistencia a tracción del vidrio, que resulta de alrededor de 80000 kgf/cm², valor que es aproximadamente 31 veces mayor al esfuerzo de fluencia del acero con esfuerzo de fluencia de 2530 kgf/cm² (A36); sin embargo, en la práctica se alcanza tan solo a una centésima de este valor (menos de 800 kgf/cm²). La resistencia a la compresión del vidrio es aproximadamente mayor que 10 veces su resistencia a la tensión. Aunque los esfuerzos a compresión son más difíciles de medir, ya que las metodologías de ensayo establecidas en normas y en investigaciones siempre están relacionadas con la presencia de esfuerzos de tensión, por lo que se estima a la fuerza de compresión con valor cercano a 5000 kgf/cm², valor considerado apropiado con respecto de su valor teórico que es de más de 9000 kgf/cm². Cuando la resistencia a compresión está bajo carga permanente el valor se encuentra en alrededor de 1700 kgf/cm², de acuerdo con lo reportado en la literatura (Wurm, J., 2007). La resistencia a flexión del vidrio suele variar antes de alcanzar la ruptura.

El módulo de elasticidad es otra propiedad mecánica importante, que en el caso del vidrio presenta un hipotético valor de 700000 kgf/cm², valor correspondiente solamente a una tercera parte del valor correspondiente al acero; sin embargo, este valor es 5 veces mayor que el que corresponde a la madera de gran dureza. El material de vidrio presenta un comportamiento elástico-lineal como función de cargas incrementales, siguiendo con perfección la ley de Hooke hasta alcanzar su máxima capacidad, que es cuando sin previo aviso se presenta la fractura, esto corresponde a un material que puede solamente desarrollar una ductilidad igual a la unidad, por lo que se considera como un material frágil.

La fragilidad del vidrio lo hace que sea considerablemente diferente a otros materiales dúctiles empleados en la construcción, los cuales son capaces de deformarse plásticamente con el fin de reducir la concentración de esfuerzos, como se muestra en la Figura 1.7. Por lo que es recomendable que durante el proceso de diseño se evite el contacto directo entre un vidrio y otro, o entre vidrio y metal, o entre un elemento capaz de establecer una concentración de esfuerzos superiores a los que puede soportar el vidrio. Debido a que el vidrio no se deforma plásticamente y no puede disipar los esfuerzos impuestos, deben considerarse también los esfuerzos producidos por cambios repentinos de temperatura.

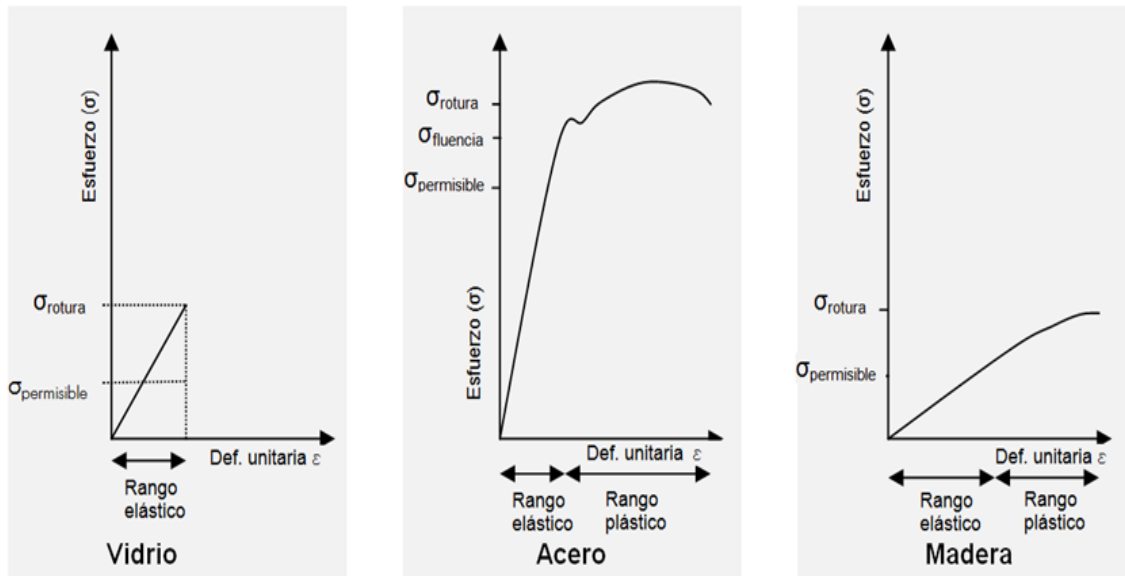


Figura 1.7. Gráficas de esfuerzo vs deformación del vidrio, acero y la madera. El vidrio solo se comporta elásticamente, en cambio el acero y la madera si presentan un rango de comportamiento inelástico (Imagen modificada de Wurm, J., 2007).

Otras propiedades importantes para la caracterización de un material son el coeficiente de Poisson y la densidad específica del vidrio. El coeficiente de Poisson, coeficiente de contracción lateral, del vidrio puede variar de 0.2 a 0.25, este valor se obtiene de la relación entre el estrechamiento unitario sobre una dirección perpendicular al sentido del esfuerzo y el alargamiento unitario en la dirección de dicho esfuerzo. Mientras que la densidad del vidrio es aproximadamente de 2500 kgf/cm³.

1.5 Propiedades térmicas del vidrio

Uno de los parámetros térmicos importantes es el coeficiente de expansión térmico lineal (α_T). Este se define como la dilatación relativa de la longitud de un elemento por el incremento gradual de la temperatura. El valor comúnmente usado en edificios para el vidrio de silicato sódico es de $9.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, valor que representa aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes del valor correspondiente al del acero estructural.

El diferencial de temperatura máximo que un componente puede tolerar en su superficie, sin fracturarse, a menudo llamado resistencia al choque térmico, es baja para el material del vidrio. Para vidrio de silicato sódico sin templar corresponde un valor de tan solo 40°C. La resistencia al choque térmico del vidrio boro cálcico es más de 2 veces este valor debido a su bajo coeficiente de expansión térmico. Aunque también, un vidrio de sílice de calcio tratado térmicamente incrementa su resistencia al choque térmico, como el caso de un vidrio templado.

1.6 Propiedades ópticas del vidrio

El vidrio no es del todo transparente, debido a cierta coloración característica que los mismos componentes químicos originan, como el hierro y el cobre, esto propicia a la formación de dos propiedades ópticas importantes, la transmisión y absorción de las ondas de luz solar. Mientras que la transmisión es un factor que indica la proporción de la luz incidente que pasa a través de un vidrio

sin dispersión alguna, la absorción describe la propiedad que tiene un material para transformar la luz penetrada en otras formas de energía. Es común que el vidrio lo haga en forma de calor por su alta resistividad térmica. Además, la cantidad de luz que absorbe depende del grueso y del color del vidrio. Otra propiedad importante que tienen los vidrios es la reflexión entre el aire y el vidrio; por ejemplo la reflexión para un vidrio de 4 mm de espesor, para una incidencia de luz visible es de un total de 8% (Schittich, C., Staib, G., Balkow, D. et al., 2007). La reflexión se puede eliminar casi totalmente con la aplicación de capas dieléctricas finas para longitudes de onda particulares. Con esto, la conservación de la energía luminosa se hace presente con los parámetros de absorción α , transmisión τ y reflexión ρ , $\alpha + \tau + \rho = 1$.

1.7 Tipos de vidrio y su comportamiento

En las secciones 1.7.1 a 1.7.3 se discutirán las características de los diferentes tipos de vidrio implementados con mayor frecuencia en la industria de la construcción, con base en información relevante sobre su rendimiento y cualidades. Los productos provenientes de los procesos de laminado y templado son relevantes, y por lo tanto serán detallados en este trabajo.

También es adecuado mencionar que el término de panel de vidrio se introduce para referirnos a una sola hoja o placa de vidrio monolítico. Un panel de vidrio puede usarse como vidrio monolítico, como parte de un vidrio laminado, o puede formar parte de una unidad de vidrio aislador o de otro tipo de montaje de vidrio. La unidad de vidrio es un término genérico para cualquiera de estos.

Por lo que la elección del tipo de vidrio y de su adecuada combinación, es fundamental y decisiva para el éxito de un proyecto. Esto es simplemente porque cualquier proceso adicional que se haga a un panel de vidrio puede repercutir directamente en el costo.

1.7.1 Vidrio recocido

Un vidrio que no ha sido templado ni termo-endurecido se conoce como vidrio recocido (Annealed glass, ANG, siglas en inglés). El recocido es el proceso de enfriamiento controlado que evita la tensión residual en el vidrio, y es inherente al propio proceso de fabricación del vidrio flotado. Además, el vidrio recocido se puede cortar, taladrar, biselar, pulir y curvar.

Un panel de vidrio de este tipo se agrieta inmediatamente después de exceder su capacidad de esfuerzo de tensión, o ante un impacto capaz de minar su integridad, rompiéndose en fragmentos grandes y agudos, en el peor de los casos estos fragmentos pueden caer y causar lesiones fatales a las personas que transiten en el momento que ocurre la falla (Ver Tabla 1.5, Sección 1.7.3).

1.7.2 Vidrio templado

El vidrio templado (Fully Tempered Glass, FTG, sigla en inglés) es un tipo de vidrio extremadamente resistente, el cual se elabora en un proceso secundario a partir del vidrio flotado. Durante este proceso secundario el vidrio se calienta a una temperatura uniforme de aproximadamente 650°C, al alcanzar esta temperatura se enfriará rápidamente para inducirle esfuerzos de compresión en la superficie dentro del intervalo de 770 kgf/cm² a 1462 kgf/cm², mientras que en los bordes el esfuerzo de compresión es cercano a los 680 kgf/m² (Garg, N. K.,

2007). Para aplicaciones estructurales, este tipo de vidrio resulta ser el más importante (Ver Figura 1.8 y Tabla 1.5, Sección 1.7.3).

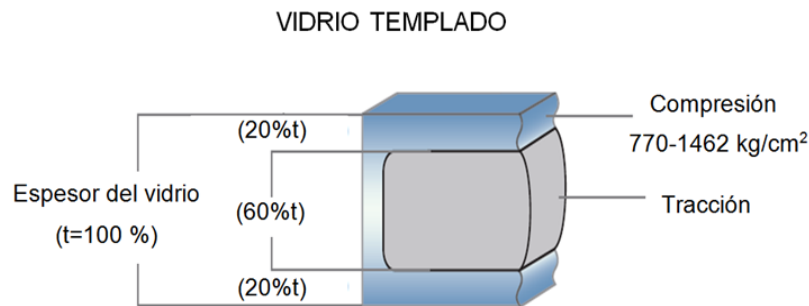


Figura 1.8 Resultado final, después de un tratamiento de templado en un vidrio normal.

Los defectos inevitables se encuentran en la superficie del vidrio, como son las grietas descubiertas por Griffith (Sección 1.8). Por lo que contar con un esfuerzo residual de compresión sobre las superficies es bastante benéfico, ya que mantiene unidas las grietas, sobre todo si los efectos a los que pudiera estar sometido el vidrio corresponden a los debidos a la flexión, lo cual genera esfuerzos de tensión y compresión, por una y otra de las caras del vidrio, pero no sin antes haber superado los esfuerzos de compresión prescritos por el proceso de templado. Para una mejor comprensión de la contribución de este proceso de templado véase la Figura 1.9, donde se presenta una comparación con el vidrio recocido flexionado. Un vidrio templado puede ser aproximadamente cinco veces más fuerte que un vidrio normal con el mismo espesor.

También este tipo de vidrio suele ser bastante resistente a los cambios bruscos de temperatura, de hasta 250 °C en comparación con un vidrio normal que solo puede soportar diferencias de temperatura de hasta 40 °C.

Por otro lado, al vidrio templado no se le pueden realizar modificaciones posteriores, como cortes y perforaciones. Por lo que sus medidas son confeccionadas antes de entrar al proceso de templado; sin embargo gracias a este proceso, un vidrio templado puede acompañarse de fijaciones más atrevidas con reducidas áreas de contacto durante su uso, aprovechando así al límite su capacidad.

Sus aplicaciones son en lugares donde el viento, la nieve y los cambios bruscos de temperatura se presentan, que es donde un vidrio normal no es capaz de cumplir con su función. Además al vidrio templado se le da la posibilidad de funcionar como vidrio de seguridad (laminado) en puertas de entrada, barandas, mamparas y de anti-incendio.

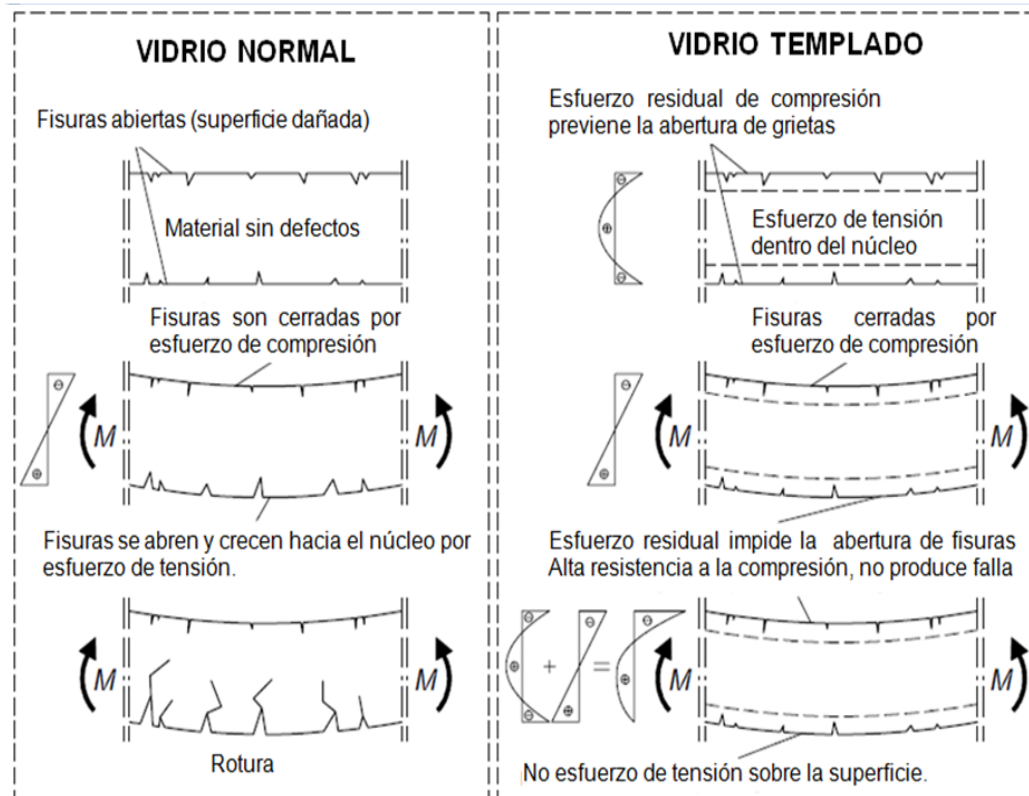


Figura 1.9 Comparación de un vidrio templado contra vidrio recocido, ante flexión (Haldimann, M., 2006).

Existe también el vidrio reforzado con calor o termo-endurecido (heat strengthened glass, HSG, sigla en inglés) su elaboración es similar a la de un vidrio templado, solo que llevada a cabo con temperaturas más bajas de calentamiento (Figura 1.10). Sus características son considerablemente más resistentes, aproximadamente del doble de las correspondientes a un vidrio recocido, pero si se llega a romper lo hará de manera casi semejante a la de un vidrio recocido (Figura 1.11).

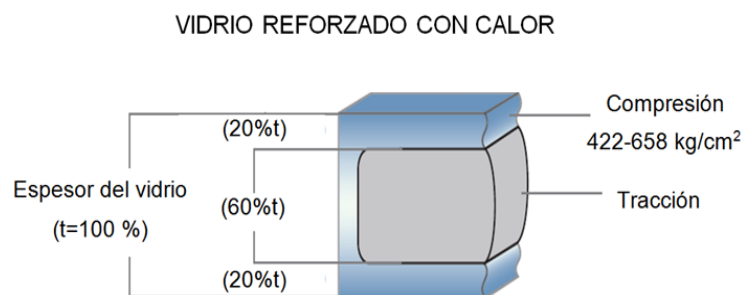


Figura 1.10 Resultado final, después de un vidrio reforzado al calor.

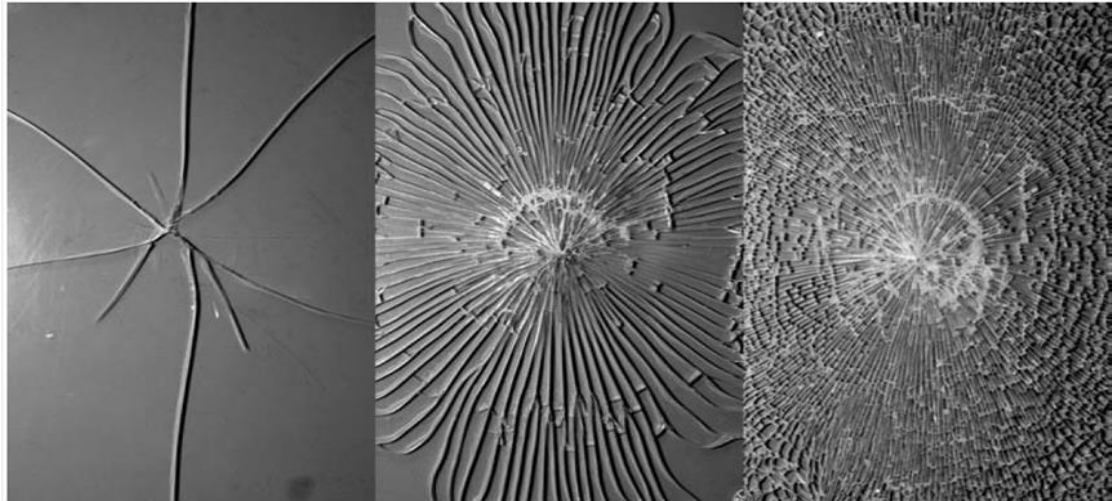


Figura 1.11 Comparación de fracturas: Vidrio normal (izquierda), vidrio reforzado con calor (en medio) y vidrio templado (a la derecha) (Haldimann, M., 2006).

1.7.3 Vidrio laminado

El vidrio laminado, como lo indica su nombre, es un vidrio compuesto por la unión de dos o más capas de paneles de vidrio monolítico con una o más capas transparentes de plástico de polivinilbutiral (PVB) de forma permanente, como ejemplo. El proceso de laminación más común es el autoclave, con aproximadamente 140 °C de calor a una presión de hasta 140 bares, asegurando la no inclusión de aire entre el vidrio y la capa intermedia. Las capas de vidrio pueden ser de vidrio recocido, vidrio reforzado al calor o vidrio templado, y de diferente espesor. Cuando un vidrio laminado llega a romperse, los fragmentos se adhieren al plástico de PVB en lugar de caer, evitando así el riesgo de lesionar a las personas. A continuación se describe el comportamiento del vidrio laminado formado con distintos tipos de vidrio. Para lo cual consideramos que existen tres tipos de vidrio laminado: el compuesto de paneles de vidrio recocido, el de vidrio laminado compuesto de paneles de vidrio endurecido al calor, y finalmente el vidrio hecho con paneles de vidrio templado, como se muestra en la Figura 1.12. De donde se puede observar que el mejor comportamiento o desempeño estructural y resistencia al impacto antes de la falla, se presenta en el vidrio laminado compuesto de paneles de vidrio templado. Sin embargo, el buen comportamiento ante capacidad remanente después de la falla estructural lo tiene el vidrio laminado compuesto de paneles de vidrio recocido.

Las propiedades de un vidrio laminado son:

- El vidrio laminado se considera un vidrio de seguridad porque cumple los requisitos establecidos en las diferentes leyes y normas nacionales para la construcción.
- El vidrio termo-endurecido y el vidrio templado se pueden incorporar a unidades de vidrio laminado para reforzar aún más la resistencia frente a impactos.
- La protección contra las ondas expansivas de bombas, la atenuación acústica y la protección antibalas o de seguridad, son algunos otros casos donde se implementa el vidrio laminado.

En la Tabla 1.5 se muestran las propiedades de los diferentes tipos de vidrio usados en vidrio laminado.

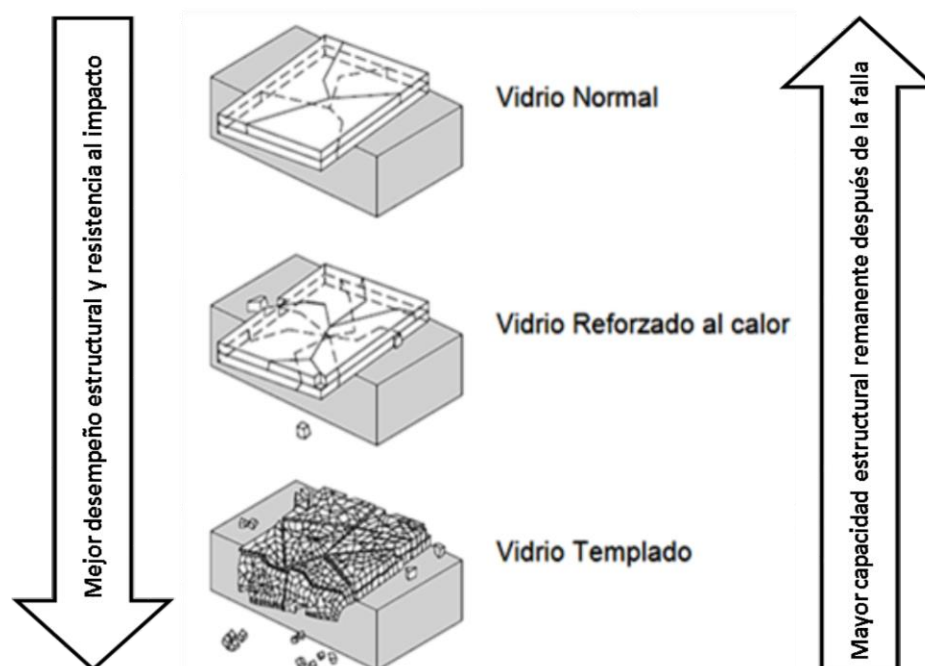


Figura 1.12 Desempeño antes y después de la fractura de un vidrio laminado con distintos tipo de vidrio (Imagen modificada de Haldimann, M., 2006).

Tabla 1.5 Propiedades generales de vidrio recocido, vidrio templado y vidrio laminado (Garg, N. K., 2007).

Propiedad	Vidrio Normal	Vidrio Templado	Vidrio Laminado
Transparencia	80 – 90 %	-	-
Densidad	2420 – 2520 kgf/m ³	2420 – 2520 kgf/m ³	2,420 – 2,520
Módulo de elasticidad	713800 kgf/cm ²	713800 kgf/cm ²	713800 kgf/cm ²
Esfuerzo a tensión	400 kgf/cm ²	1200-2000 kgf/cm ²	320 kgf/cm ²
Esfuerzo a compresión	10000 kgf/cm ²	10000 kgf/cm ²	10000 kgf/cm ²
Coefficiente de expansión lineal	9×10^{-6} 1/°C	9×10^{-6} 1/°C	9×10^{-6} 1/°C
Rango de espesores	2 – 19 mm	4 – 19 mm	4.38 – 20.76 mm
Tamaño	2440 × 3660 mm	2440 × 3660 mm	2000 × 3210 mm

1.8 La fragilidad del vidrio

Si bien es cierto que el vidrio es un material sumamente resistente ante acciones, mecánicamente hablando como se explicó en la sección 1.4 de este capítulo, también es cierto que el vidrio nos genera grandes preocupaciones debido principalmente a dos razones: su fragilidad y la gran variabilidad de su resistencia, la cual se ha encontrado en los resultados de un importante número de experimentos para estimar su resistencia a la falla. Esto nos obliga a replantearnos si el vidrio en sí mismo como material es adecuado para implementarlo como parte de elementos estructurales, o si el material presenta un índice de confiabilidad estructural aceptable para su uso como elemento estructural. Para tratar de subsanar estos defectos del vidrio, y para implementarlo adecuadamente en la industria de la construcción, se utilizan regularmente factores de seguridad que reducen considerablemente sus valores de resistencia en comparación con los valores teóricos de tensión, compresión y flexión obtenidos en pruebas de laboratorio.

La razón de la fragilidad del vidrio se atribuye en gran medida al daño o estado asociado de la superficie del vidrio. Sin duda alguna, el vidrio no es un sólido completamente compacto, ni

tan poco contempla una superficie del todo perfecta, es más la superficie del vidrio tiene muchas irregularidades y defectos microscópicos, como son las fisuras de Griffith. En 1921 A. Griffith demostró que los vidrios con superficie pulida y bien ejecutada, reducían el número de fisuras, por lo que presentan una mayor resistencia. Un gran número de fisuras de Griffith aumenta la probabilidad de falla, y también se incrementa la diversificación de los valores de la resistencia a la ruptura. Además, deben considerarse los daños macroscópicos como rasguños, cortes ocasionados por la abrasión, el viento, y otros factores mecánicos acumulados en los bordes y en la superficie del vidrio durante su vida útil. Si no se controlan los daños, el riesgo de rotura del vidrio es inminente ante un evento de tal exigencia. Por lo que el vidrio suele romperse al instante que el valor crítico a tensión que puede soportar es superado por alguna de las fisuras encontradas en las superficies y bordes.

“La resistencia a la tracción o flexión del vidrio refleja la calidad de la superficie y no es un valor constante. En relación con el tamaño y edad del panel será mayor la probabilidad de la existencia de un defecto crítico”, (Wurm, J., 2007). Además la resistencia del vidrio depende de la permanencia de la carga y del medio circundante, así como de la humedad que favorece la aparición y crecimiento de grietas subcríticas.

Hoy en día se toman en cuenta dos técnicas de fabricación de vidrio, antes descritas, para solucionar los problemas de fragilidad y de incertidumbre por resistencia: una de ellas supera las grietas de Griffith con superposición de piezas (vidrio laminado), contribuyendo a un mayor nivel de seguridad al valor esperado; mientras que la otra busca aumentar la resistencia del vidrio manteniendo unidas las fisuras mediante el proceso de templado (Ignacio, P., 2000). Ambos recursos mejoran el comportamiento del vidrio, como se explicó en las secciones 1.7.2 y 1.7.3.

Sin duda, la fragilidad, la resistencia a tensión, y el comportamiento de deformación elástica del vidrio como material de construcción son propiedades muy importantes de determinar para el diseño de estructuras fabricadas con vidrio.

1.9 Patrón de falla del vidrio

1.9.1 Patrón de falla en placas de vidrio

La información que se obtiene de un análisis de una placa de vidrio que ha fallado, coadyuva con el entendimiento del comportamiento de falla y el origen mismo de la falla. Cuando la falla se origina, lo hace en un solo punto de la superficie o borde, de donde se desprende una grieta principal que atraviesa el elemento, y otras grietas secundarias se pueden desprender de ella. Desde hace varias décadas, se ha desarrollado una gran cantidad de investigación en esta área del conocimiento, donde se ha intentado sin mucho éxito correlacionar los patrones de falla con los esfuerzos desarrollados bajo condiciones de carga, esto se debe a la complejidad que presenta la determinación de falla del vidrio. En 1980 Willian Lynn Beason trabajó con placas rectangulares y cuadradas de vidrio recocido. Él observó que las placas fallaban como producto de aplicar carga uniforme en un único punto de origen de falla sobre la superficie, el cual estaba asociado con la magnitud del esfuerzo nominal máximo de tensión, y además se presentaba la fisura principal con dirección normal al esfuerzo principal máximo de tensión sobre todo si el esfuerzo principal mínimo era mucho menor. En el caso de las placas rectangulares, éstas presentaban un estado de esfuerzos biaxial, donde el esfuerzo de tensión principal máximo era mucho mayor que el esfuerzo principal mínimo, lo que originaba un patrón de grietas bien definido en la dirección normal del

esfuerzo principal máximo, véase la Figura 1.13. Para el caso de las placas cuadradas su estado de esfuerzos biaxial entre el esfuerzo principal máximo y mínimo era más semejante en el punto de origen de la falla, la grieta principal se presentaba normal al esfuerzo principal máximo, pero además estaba acompañada de un gran número de grietas secundarias en otras direcciones, Figura 1.14. Willian Lynn Beason (1980) concluyó entonces que: “Para una geometría de placa de vidrio dada y una situación de carga, el número de grietas y el tamaño del resultado de las piezas de vidrio son relacionadas a la magnitud y a la energía almacenada de deformación en los especímenes de vidrio recocido o a la relativa intensidad de carga de falla”.

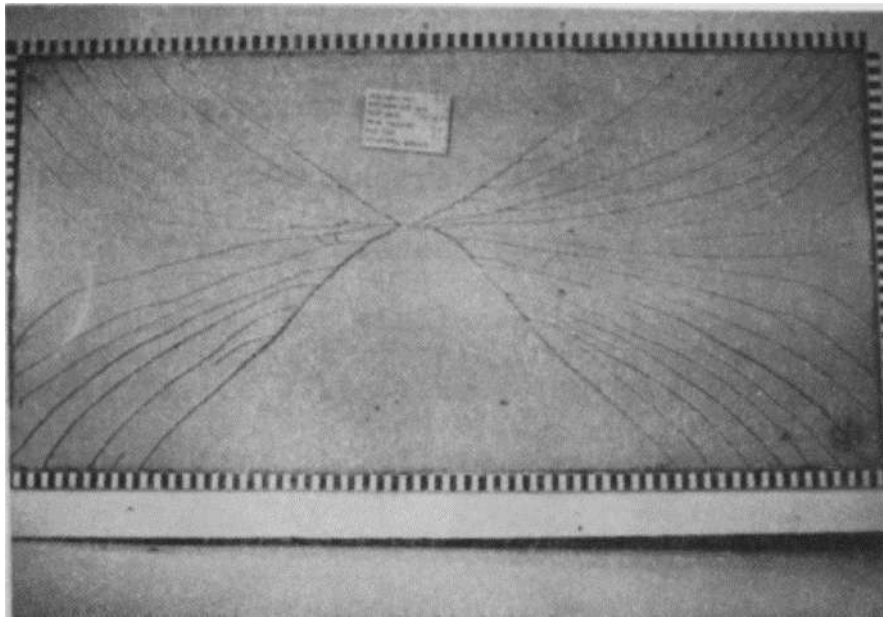


Figura 1.13 Patrón típico de fractura de una placa rectangular de vidrio: $\sigma_{m\acute{a}x} \gg \sigma_{m\acute{i}n}$ (Beason, W. L., 1980)

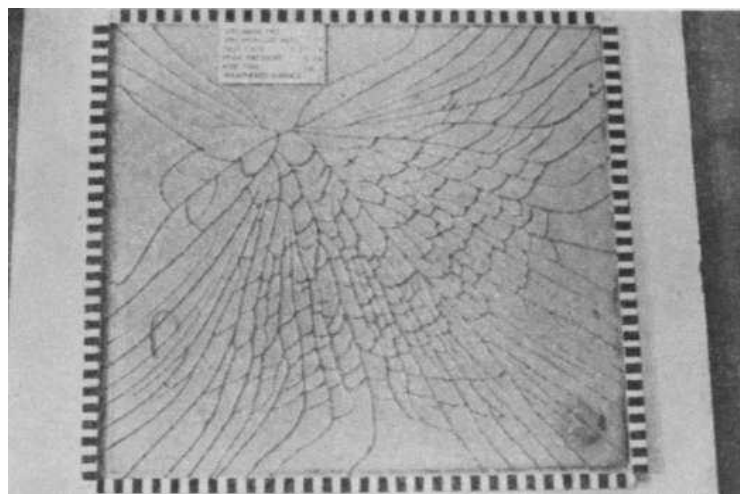


Figura 1.14 Patrón típico de fractura de una placa cuadrada de vidrio: $\sigma_{m\acute{a}x} \approx \sigma_{m\acute{i}n}$ (Beason, W. L., 1980)

1.9.2 Patrón de falla en vigas de vidrio

Los patrones de falla en vigas de vidrio han sido estudiados recientemente debido que es cada día más común al uso del vidrio. Lindqvist, M. (2013) trabajó con vigas de vidrio recocido con bordes pulidos, los especímenes estudiados corresponden a pequeña escala. En sus resultados encontró patrones de falla repetidos en los especímenes probados a flexión con dos apoyos simples. Para los patrones de carga asociados con baja resistencia se reportó una simple línea vertical. En el caso de patrones donde la resistencia era mayor se reportaron patrones en forma de V, N o M de los fragmentos. Esto se puede observar en las Figuras 1.15 y 1.16.

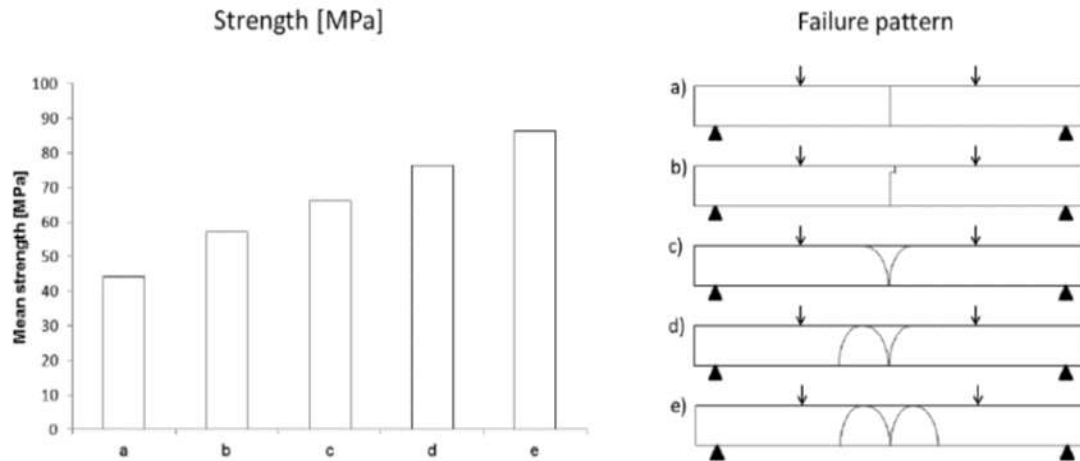


Figura 1.15 Vigas a pequeña escala, a) patrón recto más bajo en resistencia y e) el patrón M con mayor resistencia (Tomada de Lindqvist, M., 2013).

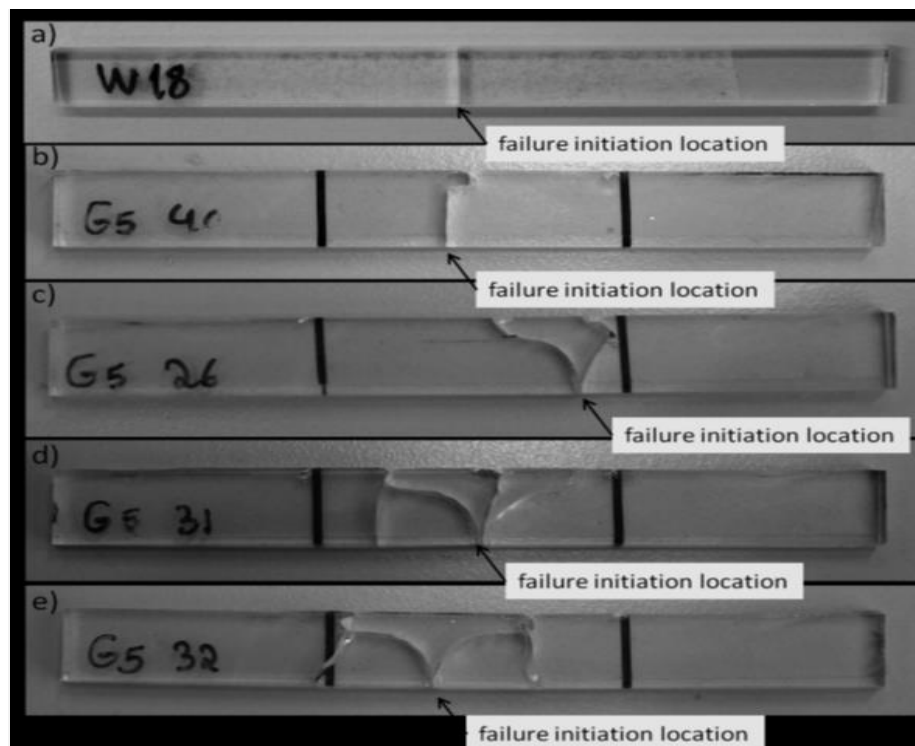


Figura 1.16. Vista de los patrones de fractura de la figura 1.15 (Lindqvist, M., 2013).

De acuerdo con lo anterior, se observa que para especímenes grandes la posible energía relacionada con la falla es mucho más alta generándose así una fragmentación pequeña. La relación que existe entre esta energía y la forma como se presenta la fragmentación es tema de estudio e investigación.

1.9.3 Otros tipos de patrones de falla en el vidrio

En otro tipo de pruebas que se han llevado a cabo se encuentra la prueba concéntrica de doble anillo, los detalles de la prueba se dan en el Capítulo II (Sección 2.1). Mediante la prueba se estima la resistencia de un espécimen de vidrio, pero las fotografías que se muestran en la Figura 1.17 nos hacen pensar nuevamente que el patrón de falla está asociado directamente con el valor de la resistencia, por lo que se convierte en un tema muy importante de investigación y de herramienta para el diagnóstico de los tipos de fallas del vidrio, con relación a los esfuerzos presentes y el patrón de falla.

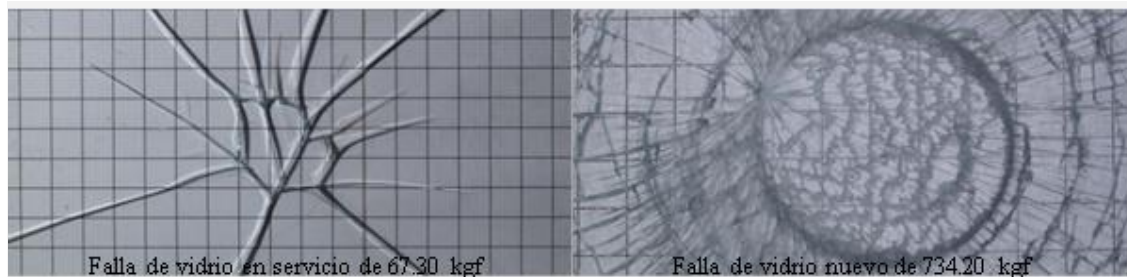


Figura 1.17. Patrones de falla en pruebas concéntricas de doble anillo (Zammit, K. y Overend, M., 2009).

Descripción de Conexiones en Cortinas de Vidrio

2.1 Elementos estructurales de vidrio

Una diferencia sobresaliente del vidrio con respecto a otros materiales de la construcción es su fragilidad, ya que la rotura del vidrio es repentina. Esto obliga al diseñador a ser muy cuidadoso con las medidas estructurales adoptadas durante el proceso de diseño para evitar de esta manera la falla del elemento. Algunas recomendaciones para un buen diseño se deben atender de inicio a fin, por ejemplo, las condiciones de apoyo, las dimensiones del elemento y la elección del tipo de conexión, son aspectos donde se puede favorecer enormemente el diseño del elemento estructural de vidrio para que pueda desempeñarse apropiadamente. Además, el diseñador puede alcanzar un mejor aprovechamiento de los elementos de vidrio, si considera la capacidad de carga remanente de rotura. Este aspecto tiene el propósito de resguardar el daño hacia las personas y conservar la estabilidad de un elemento o de la estructura misma en caso de serlo. Con esto, los elementos de vidrio en estructuras generalmente se clasifican como paneles o placas, vigas o columnas, dependiendo de la dirección en que se aplican las cargas o de la forma del elemento, esto se muestra en la Figura 2.1.

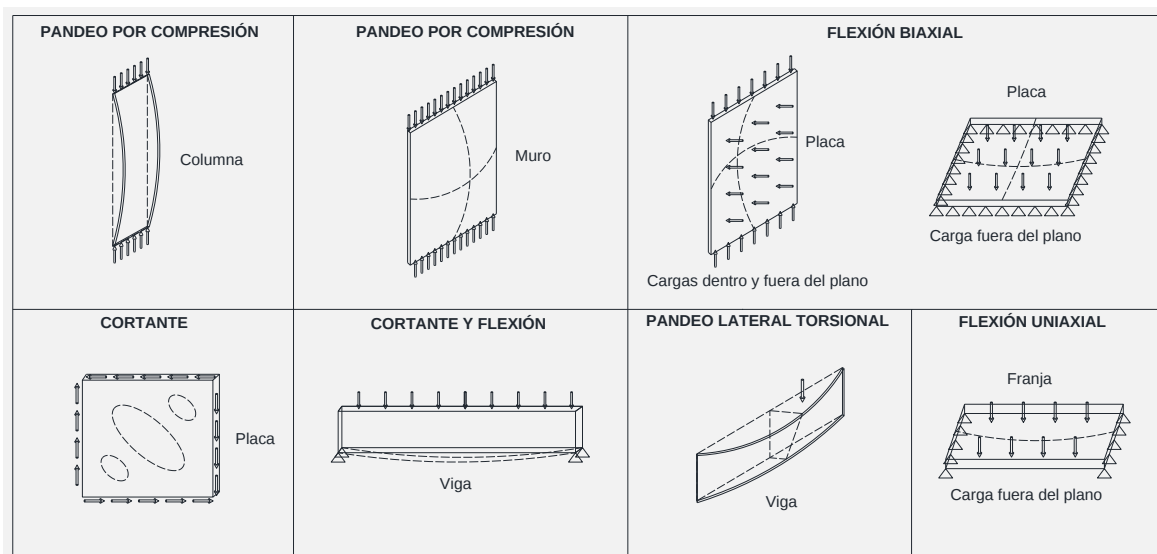


Figura 2.1 Descripción de elementos estructurales de vidrio usados en la construcción para distintas condiciones de carga.

En el caso de los elementos tipo placa o panel pueden llegar a utilizarse en estructuras planas como acristalamiento de fachadas de edificios. Un aspecto importante de este tipo de elementos cuando se someten a cargas como el viento, su peso propio o incluso la nieve que actúa de forma transversal al plano del vidrio, es su resistencia debida a la rigidez por flexión fuera del plano, la cual transmite inmediatamente la descarga a los soportes. Sin embargo, elementos de vidrio como son los muros, vigas y columnas sometidos a compresión, suelen presentar deformaciones laterales importantes debidas a su pequeño espesor y su gran longitud. Este tipo de deformaciones puede generar problemas de pandeo local y de pandeo general, siendo estos

problemas comunes que se presentan en el comportamiento estructural de vigas y columnas, mientras que los desvíos fuera del plano y pandeo lateral por flexotorsión se presentan con mayor frecuencia en muros y vigas, respectivamente.

Pero aún existe la tarea de comprender como se transfieren las cargas y sus efectos de acuerdo con el tipo de falla que se espera en un elemento estructural fabricado de vidrio, ya que el contar con estos conocimientos nos permitiría diseñar con una mayor seguridad los elementos estructurales antes mencionados para un grado deseable de estabilidad en la estructura. En la Figura 2.2 se muestran diferentes tipos de conexiones implementados en elementos estructurales de vidrio.

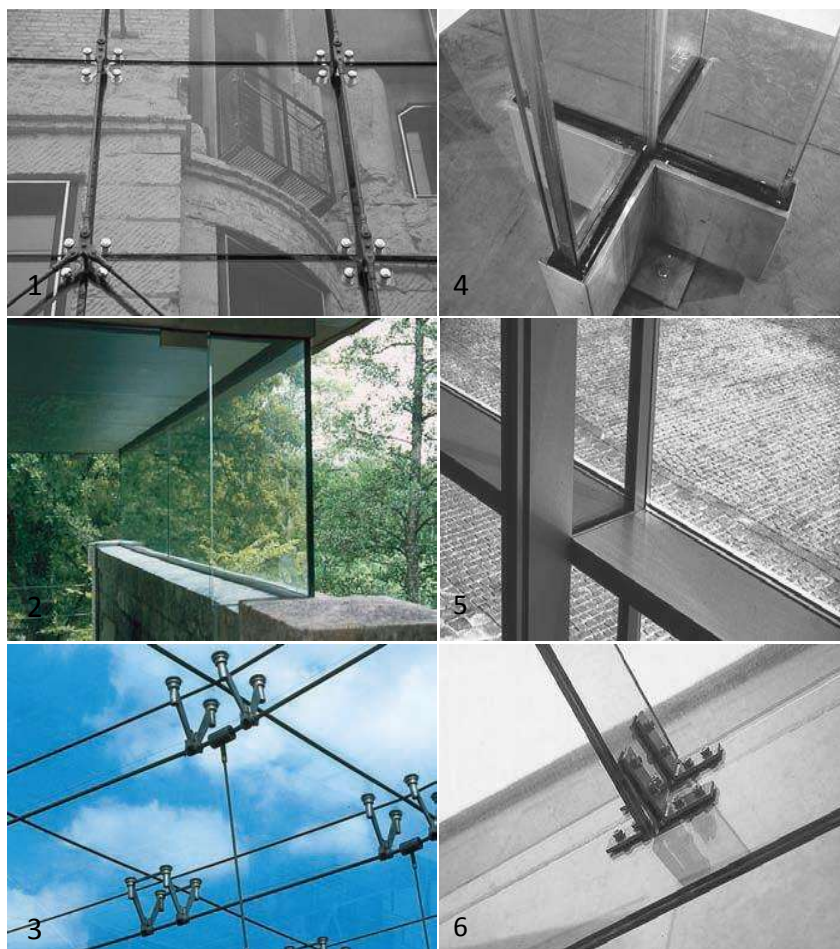


Figura 2.2 Elementos estructurales de vidrio y sus conexiones. (Wurm, J., 2007):

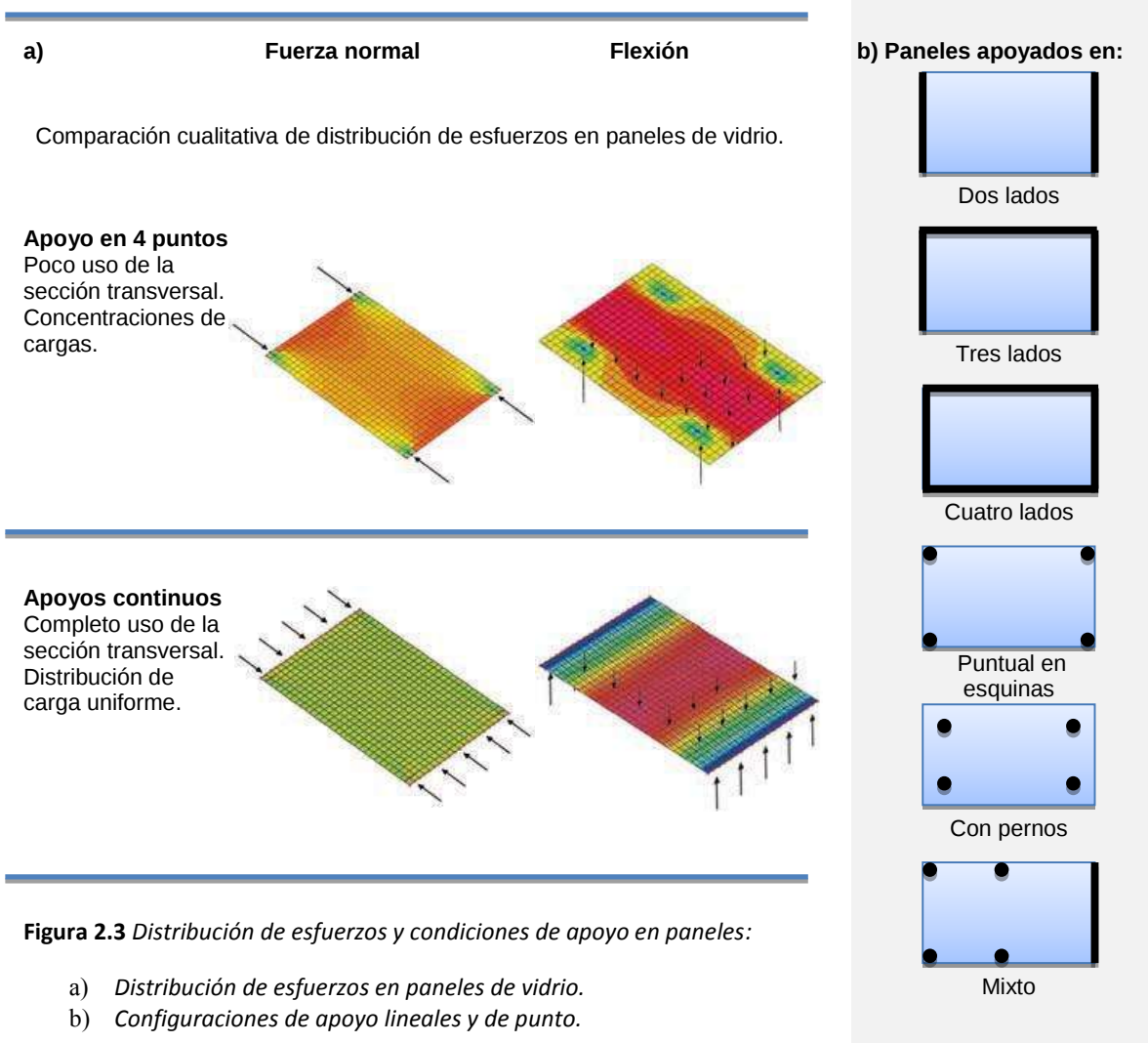
1. Paneles verticales apoyados y fijados por puntos, Sony Center Potsdamer Platz Berlin, 2000.
2. Placa que actúa como pared de carga. Templo de l' Amour, Borgoña, 2002.
3. Placas suspendidas en lo alto, Stuttgart, 1998.
4. Columna de vidrio, Göttingen, 2004.
5. Aleta de vidrio, como parte de un poste de fachada, New Museum Nuremberg, 2000.
6. Elementos lineales que actúa como vigas de vidrio, azotea del Judenbad en Speyer, 1999.

2.2 Conexiones

La fragilidad del vidrio impone un reto importante en la concepción de técnicas de conexión para aquellos elementos de vidrio que forman parte de una estructura. Las conexiones pueden llegar a desarrollar diferentes estados de esfuerzos sobre un elemento dependiendo de la intensidad de las cargas, por ello, debemos evitar que en una conexión se concentren los esfuerzos para no inducir el mecanismo de falla y para que la conexión cumpla con la tarea estructural asignada, véase la Figura 2.3.a.

El mejor comportamiento que puede presentar una conexión es la transferencia uniforme de las fuerzas. La concentración de esfuerzos en una conexión se presenta en los casos de contactos

entre vidrio y vidrio, o entre vidrio y metal u otro material rígido, es probable que esto origine la falla.



Los apoyos de un elemento tipo panel o placa estructural pueden proveerse de diferentes maneras, estos pueden ser apoyados en sus bordes, esquinas, superficies o por una combinación, como lo muestra la Figura 2.3.b. La manera en que estos tipos de conexiones transfieren y distribuyen la carga sobre los elementos no es igual. Para que la sección de la placa se aproveche eficientemente debe evitarse la concentración de tensiones, ya que dan apertura al micro fisurado encontrado en la superficie y bordes del vidrio, para más detalles ver las secciones 1.8 y 4.1. En muchos casos se atenta contra el buen desempeño estructural del elemento, por ejemplo en la fijación por medio de puntos es muy común que se concentren tensiones; por lo que para estos casos se recomienda siempre el uso de un vidrio tratado térmicamente. Otro aspecto importante con respecto a las conexiones con puntos que se tiene que considerar es su número y tamaño, porque de estas variables depende la transferencia y el comportamiento de la rotura.

Como se puede observar en las conexiones, dependiendo del mecanismo de transferencia de la fuerza de una conexión éstas se pueden clasificar como: de fuerza, mecánica o de engranaje y de adhesivos. Las conexiones de fuerza que son utilizadas en la construcción se dan por una sujeción por fricción de contacto. Las conexiones de engranaje corresponden al tipo de conexiones

atornilladas. Las conexiones hechas con adhesivos son muy usuales y tienen diversas peculiaridades que merecen ser mencionadas con mayor detalle, por lo que éstas se describen en la Sección 2.2.3.

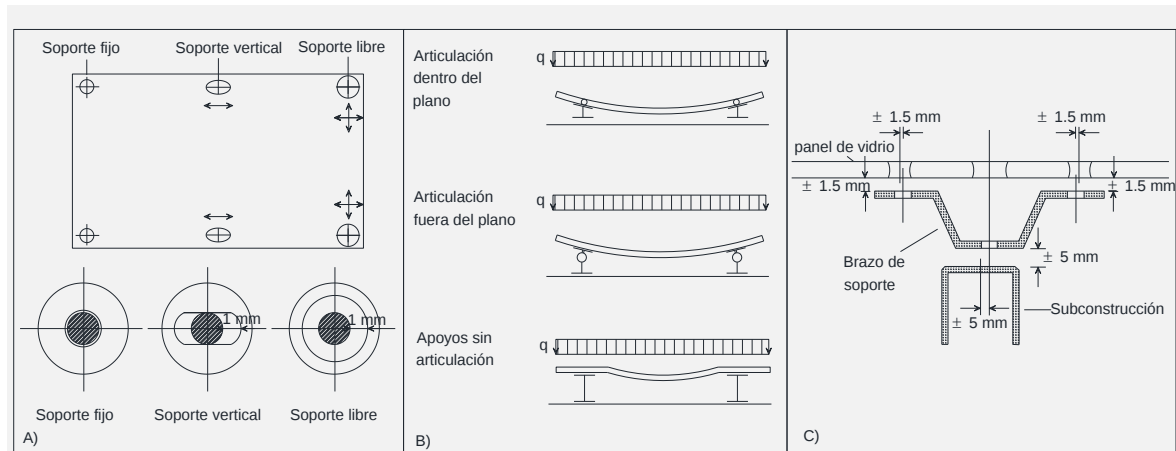


Figura 2.4 Descripción de conexiones de engranaje:

- a) *Agujeros geométricos en el vidrio para soportes de tipo fijo, vertical o libre; y sus tolerancias ante movimientos por temperatura.*
- b) *Esquema de los diferentes tipos de soportes.*
- c) *Tolerancias horizontales en un brazo de soporte de un acristalamiento vertical.*

2.2.1 Conexiones mecánicas

Cuando se opta por usar conexiones de tipo mecánico, es decir, por medio de puntos o atornilladas, como es el caso de las fijaciones que requieren de una perforación, permiten que los elementos de acristalamiento puedan estar articulados de la estructura principal (Figura 2.4.b). Esto significa que las conexiones de este tipo no restringen el movimiento fuera del plano de la placa de vidrio en su totalidad. La sujeción de apoyo fuera del plano se proporciona de igual forma por las conexiones articuladas, también es importante tener presente el efecto de los esfuerzos generados por su excentricidad, dado que entre mayor sea la distancia entre una rotula y el plano del panel mayores serán los esfuerzos. Una conexión rígida provoca esfuerzos locales de tensión muy altos. Además, para efectos de este tipo de conexiones deben existir tolerancias de construcción para ajustar los paneles con la subestructura adecuadamente (Figura 2.4.c). Esto resulta benéfico inclusive para tolerar movimientos causados por efecto de la temperatura. Sin embargo, la configuración de una perforación que sirve para poder sujetar al panel de vidrio, predetermina la libertad de los movimientos en un panel; por ejemplo, existen apoyos fijos que impiden los desplazamientos verticales y horizontales, asegurando una posición exacta dentro de la superficie del vidrio. Pero de igual forma, existen apoyos con perforaciones ovaladas que tienen el objetivo de permitirse el libre movimiento horizontal, o incluso otros mantienen la libertad del movimiento en ambas direcciones debido al gran diámetro que se da en los agujeros que se tienen en el vidrio (Figura 2.4a).

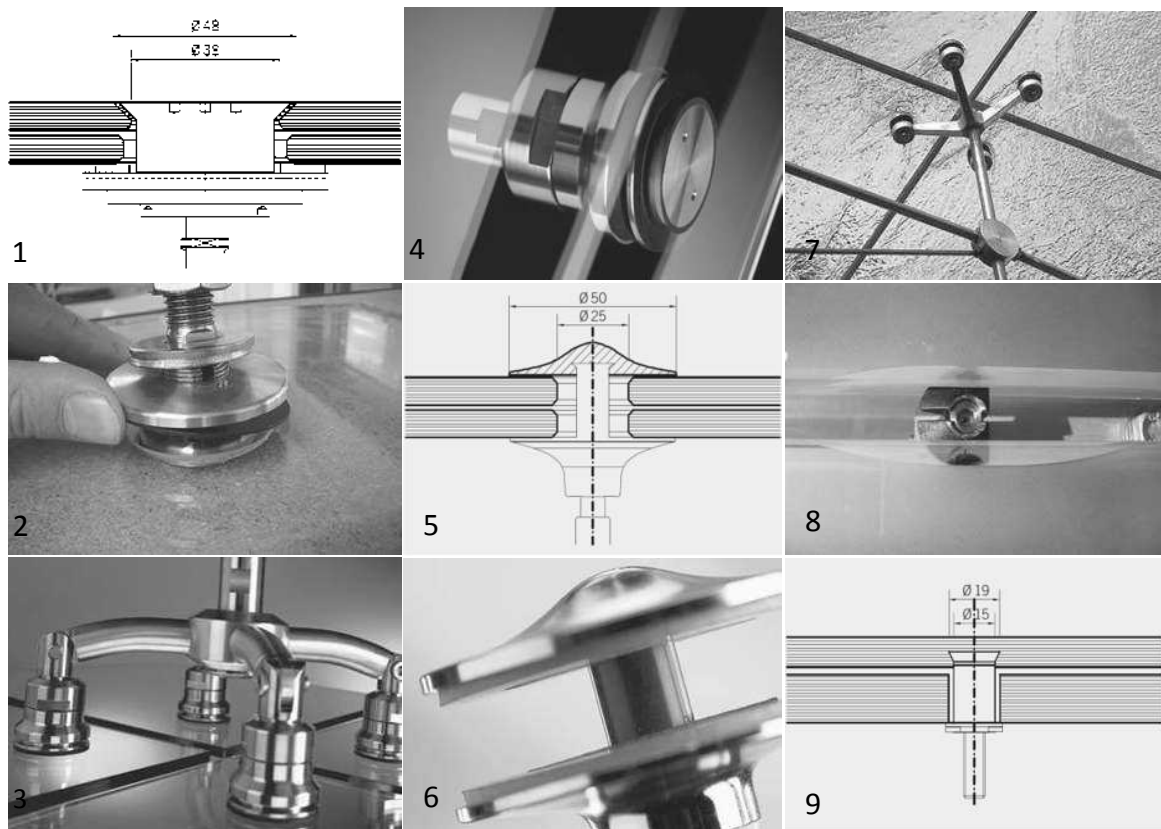


Figura 2.5 Conexiones mecánicas (Wurm, J., 2007):

1-4) Vistas de una conexión avellanada.

5-7) Conexión botón.

8-9) Conexiones especiales de reducido tamaño y baja capacidad de carga.

Hablando propiamente de una fijación de botón, esta consiste de una conexión mecánica que ejerce presión entre sus discos de fijación, los cuales corresponden a unos 5 cm de diámetro contra el panel de vidrio, la presión se genera por su perno de acero inoxidable que mantiene las piezas en posición (Figuras 2.5.5 a 2.5.7). Además, una fijación de botón, por ejemplo, transmite la fuerza del viento a través del contacto de entre sus discos de fijación y el vidrio. Cuanto mayor sea el ancho del diámetro del disco de fijación, mayor es la capacidad de carga.

Otro tipo de fijación similar al anterior es la conocida como fijación avellanada, esta consiste en perforar al panel de vidrio en forma cónica, además la penetración puede hacerse parcial o completa según sea el caso. De tal forma que la conexión del panel de vidrio se crea con un perno con cabeza que embona perfectamente con la forma de la perforación hecha, y por la otra cara del vidrio se encuentra una placa de sujeción (Figuras 2.5.1 a 2.5.4). El agujero cónico suele tener menos complicaciones para mantener las tolerancias de construcción referidas al diámetro del agujero. Las fuerzas como el peso propio del vidrio y las debidas a acciones del viento se transmiten por un plástico situado entre el agujero y el perno. En contraste este tipo de conexiones tienen una baja capacidad de carga residual, ya que el riesgo de arrancarse del vidrio es mucho mayor que una fijación de botón.

Una conexión mecánica más estilizada es la de puntos, esta suelen ser aproximadamente de 2 cm de diámetro, en las Figuras 2.5.8 y 2.5.9 se muestran unos casos. Este tipo de conexiones se utilizan generalmente en acristalamientos verticales de poca altura, donde el tipo de panel UMSNH

implementado es templado. Cuando se utilizan paneles de vidrio suspendidos en techos con fijaciones puntuales es recomendable utilizar vidrio laminado de seguridad hecho de vidrio paneles procesados térmicamente. La perforación parcial de este tipo de conexiones, donde la fijación es solamente anclada sin la necesidad de traspasar ambas caras del vidrio, lo que la hace resistir poca carga.

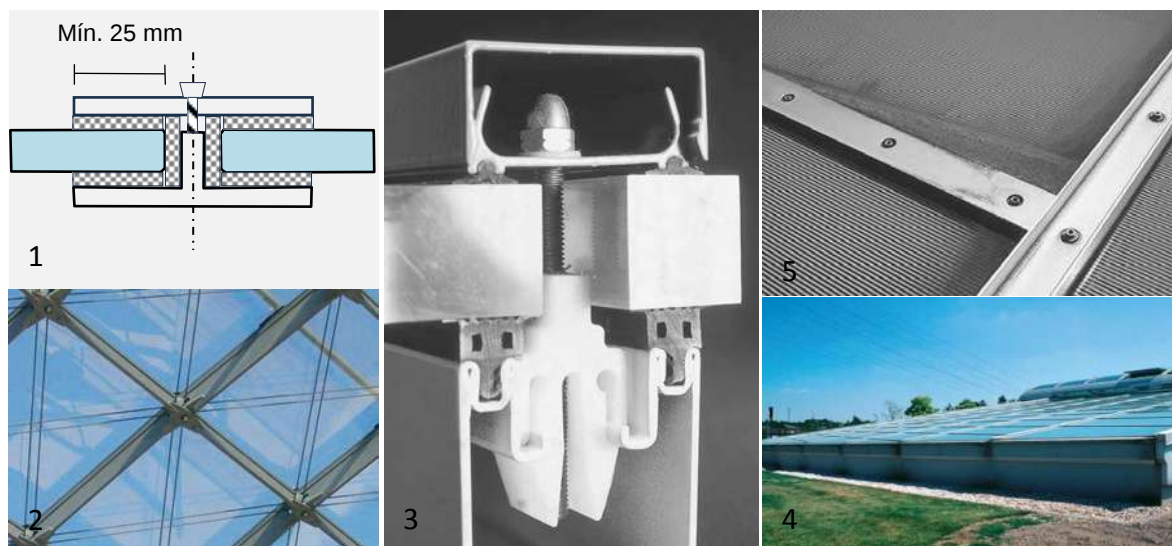


Figura 2.6 Conexiones de fuerza o de contacto (Wurm, J., 2007):

1. Principio de la fijación con abrazadera.
2. Vista interior de un acristalamiento de un techo sujetado con placas.
3. Corte de un modelo de sujeción con perfiles o barras.
- 4-5. La sujeción con barras o perfiles de una cubierta inclinada, interrumpe el flujo de agua de lluvia.

2.2.2 Conexiones de fuerza

Las fijaciones de abrazadera son conexiones de fuerza hechas a los paneles de vidrio en los bordes o también en las esquinas (Figuras 2.6.1 y 2.6.2). Entre mayor sea el área de sujeción y la profundidad de sujeción de las conexiones de fuerza se favorece a mayor capacidad de carga.

Los acristalamientos de edificios se logran comúnmente fijando los bordes de un vidrio con placas que tengan una adecuada presión sobre perfiles rectangulares o perfiles con empaques dentro de un sistema a base de marcos formados por montantes y travesaños (Figura 2.6.3). Para los acristalamientos verticales e inclinados el peso propio de los paneles se apoya sobre calzas adecuadas en juntas horizontales, mientras que los espaciadores elásticos fijan el panel en el marco. En los casos donde el acristalamiento tienda a la horizontal, se debe evitar la estanqueidad y penetración del agua como lo muestra la Figura 2.6.5. Se deben sellar los bordes de un panel exterior, lo cual no es una tarea sencilla, por el número de elementos expuestos, véase Figura 2.6.4.

Un número importante de fabricantes ya ofrecen sistemas de acristalamiento a base de sujeción con barras hechas de perfiles de acero o de materiales más livianos como el aluminio extruido. Sin embargo, un panel apoyado en los bordes y de ciertas dimensiones, puede ser diseñado bajo reglamento en mano y conocer su capacidad de carga, esto se explica con mayor detalle en el capítulo 3.

2.2.3 Conexión adhesiva

Los adhesivos pueden funcionar como técnica de sellado, pero como adhesivo estructural es más importante para los acristalamientos de fachada, donde normalmente están hechos a base de marcos, es común unir los componentes mediante silicón y realizar tareas estructurales, es decir, a través de este se transfieren las cargas a la estructura portante (Figuras 2.7.4 y 2.7.5). En 1963 en Estados Unidos se comenzó a utilizar esta clase de adhesivo para estos fines.

Dentro de las ventajas que se tienen al implementar el adhesivo en una conexión, está la resistencia a la temperatura, por ejemplo para un silicón esta se encuentra en el intervalo de 50°C a 100°C, existen silicones especiales que soportan los 300°C, al mismo tiempo los silicones tienen una muy buena resistencia química. Hay ejemplos de silicón donde después de 20 años de estar expuestos éste aún conserva su elasticidad, adherencia y fuerza (NOM-146-SCFI-2001). La resistencia a tensión es aproximadamente 10 kgf/cm² (Figura 2.7.3). El espesor de colocación del adhesivo generalmente se encuentra entre 6 y 8 milímetros, el ancho de la junta está en función del espesor en una proporción 1:1 a 3:1.

Resumiendo, una conexión adhesiva es aquella en la que se realiza una unión usando adhesivo o pegamento, siendo un material no metálico. Las propiedades mecánicas que puede adquirir una conexión con adhesivos, dependen del tipo de adhesivo seleccionado, puesto que existe una gran variedad de adhesivos con diversas propiedades en el mercado. Por otro lado, la forma en cómo se transfiere la carga depende del ancho de la unión y de su rigidez, del tipo de materiales que forman la unión, de los movimientos térmicos y de las variaciones que se presenten en las dimensiones de las piezas unidas (Figuras 2.8.1 y 2.8.2).

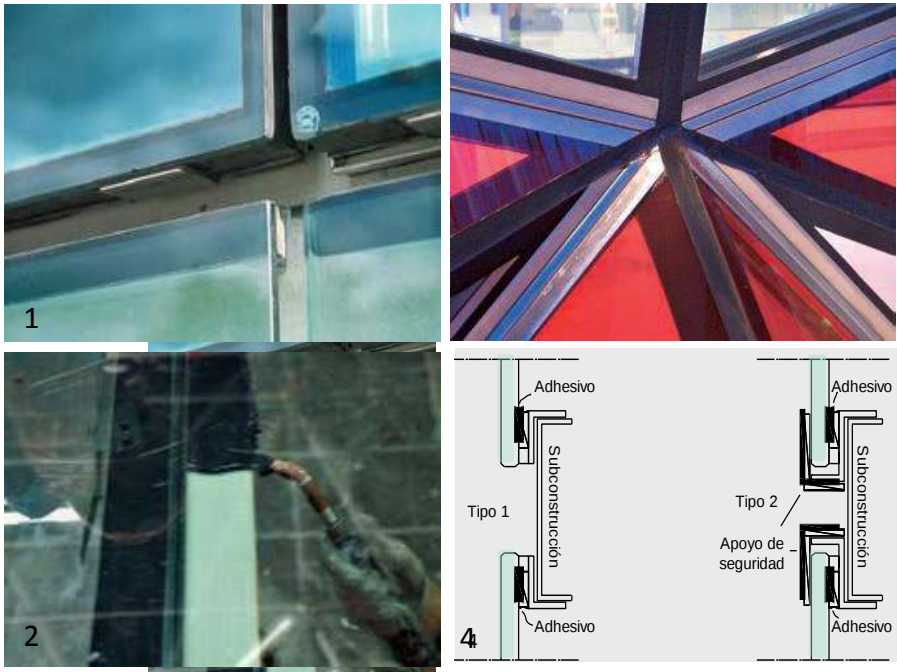


Figura 2.7
Conexiones
adhesivas:

1. Ejemplo de fachada.
2. Acristamiento estructural con dos partes de silicón.
3. Acristamiento de azotea con piezas selladas con adhesivo.
4. Colocación de fachadas con adhesivo, vista en perfil.

(Las imágenes 1, 2, 3 se tomaron de Wurm, J., 2007)

Adhesivo	Esfuerzo de tensión (Kg/cm²)	Esfuerzo cortante (Kg/cm²)	Temperatura de uso (°C)
2 partes de silicón "A"	9.5	---	-50 a 100
2 partes de silicón "B"	9.5	8	-50 a 100
1 parte de poliuretano	80 aprox.	45 aprox.	-40 a 90

Figura 43 [6].

1. Ejemplo de fachada tipo 2.
2. Acristamiento estructural con dos partes de silicón.
3. Comparación de propiedades de dos silicones estructurales con un adhesivo de poliuretano.



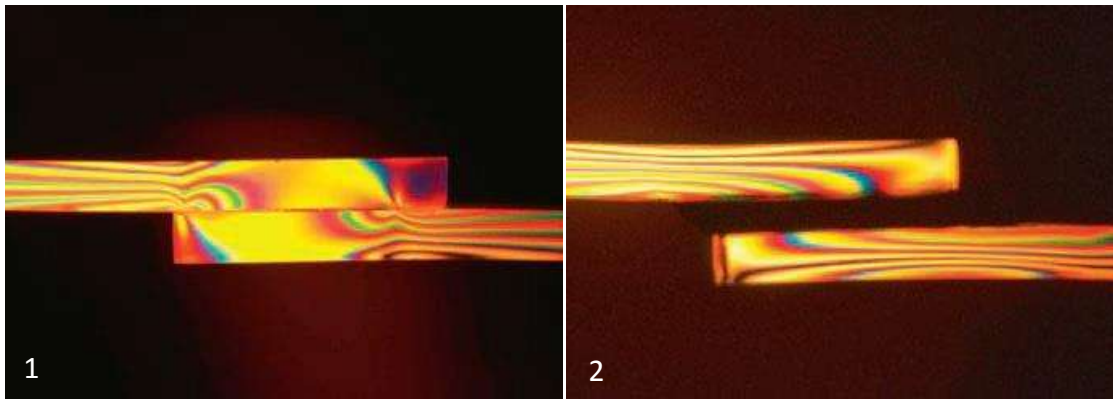


Figura 2.8 Muestra óptica de la distribución de esfuerzos sobre conexiones adhesivas (Wurm, J., 2007):

1. *Altos esfuerzos en los extremos del traslape, conexión hecha con un pegamento duro.*
2. *Distribución uniforme de tensión, conexión hecha con un espesor grueso de pegamento elástico.*

La diferencia de la resistencia de una conexión adhesiva en comparación con las mencionadas en las secciones anteriores, es que esta puede verse afectada en la práctica por un gran número de factores que interfieren en su comportamiento, los cuales se enlistan a continuación para que el diseñador los conozca y los tenga presentes en el momento de seleccionar el adhesivo adecuado:

1. El tipo de carga.
2. El tiempo de duración de carga.
3. La forma geométrica de la unión adhesiva.
4. La calidad de la instalación.
5. La calidad de las superficies de las piezas unidas.
6. Factores ambientales como la incidencia de luz ultravioleta, la humedad y temperatura.

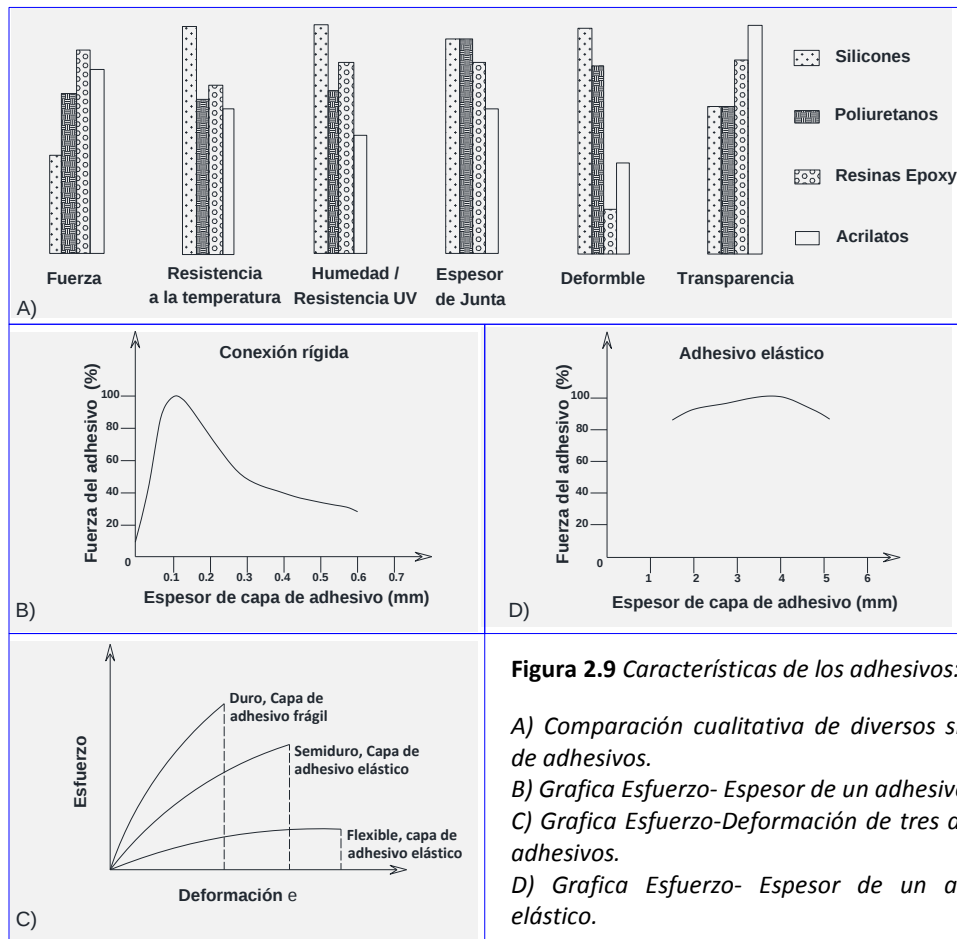
Dentro de otras industrias, los adhesivos han sabido jugar papeles importantes como en los casos de la industria automotriz, aeronáutica y marítima. De este modo, la experiencia adquirida en otras áreas del conocimiento ha permitido el desarrollo de nuevos productos adhesivos con enorme potencial de tecnología, los cuales son capaces también de implementarse en el campo del vidrio estructural, con una amplia gama de nuevas posibilidades de aplicación. Es importante hacer notar que dentro de los adhesivos se pueden encontrar diferencias en sus propiedades mecánicas, por ejemplo, con respecto a su módulo de elasticidad podemos llegar a clasificarlos en flexibles, semi-duros y duros (Figura. 2.9.c).

Los adhesivos flexibles están hechos a base de siliconas, siliconas modificadas (polímeros MS) o poliuretanos (Figura 2.9.a). Este tipo de adhesivos pueden alcanzar resistencias superiores a 10 kgf/cm^2 y alcanzar deformaciones asociadas a la rotura de aproximadamente 150 por ciento, en espesores de alrededor de 5 milímetros. Otras características importantes a resaltar si hacemos una comparación de los adhesivos flexibles con respecto de los adhesivos duros son:

1. Amortiguamiento y aceptación de cargas dinámicas.
2. Sellado, con lo cual se evita el paso del sonido y agua.
3. Factibilidad tanto para reparar como para desmontar una conexión.

Capítulo 2 Descripción de Conexiones en Cortinas de Vidrio

Un adhesivo duro está hecho de resinas epoxi o de acrilatos. Los espesores con que se aplican suelen ser de 0.1 y 0.5 mm. Su comportamiento antes de alcanzar la rotura, nos dice que su resistencia se va incrementando hasta llegar a su máxima resistencia, mientras que sus deformaciones son pequeñas, por lo que su falla es de tipo frágil (Figura 2.9.c). El uso de este tipo de adhesivos es ideal para conexiones hechas a través de puntos, donde se tiene una concentración de tensiones en los puntos de contacto. Además se pueden presentar tensiones como resultado de su alto coeficiente de expansión térmica, hecho que es importante que se conozca. Existen fabricantes que producen vidrio laminado utilizando adhesivos duros para unir las partes, donde la capa intermedia varía de 1.5 a 2 milímetros, en estos casos es importante considerar los efectos del coeficiente de expansión térmica en comparación a la del vidrio.



2.2.3.1 Fijaciones especiales con adhesivo

Actualmente las fijaciones estructurales de vidrio hechas en un punto se pueden conectar con adhesivo sin la necesidad de perforación alguna, con lo que la pieza de vidrio no se debilita, incrementando así su capacidad de carga (Figuras 2.10.1 a 2.10.3). Sin embargo, este tipo de conexiones no es muy apropiado para ser instalado en un sistema de acristalamiento por donde transiten personas. Aspectos importantes de sus resistencias y comportamiento son el espesor del adhesivo y el área de contacto de fijación, ya que de estos parámetros depende la capacidad de carga de este tipo de conexiones.

Otro aspecto importante a considerar durante el proceso de cálculo son los esfuerzos de tensión concentrados en el perímetro de las fijaciones. Un adhesivo utilizado comúnmente en este tipo de conexiones es el acrilato. Dentro de la industria de la construcción se cuenta con una gran gama de acrilatos de curado con luz y de curado con luz ultravioleta, para conexiones de índole rígida o elástica de alta resistencia de vidrio a vidrio y de vidrio a metal. El acrilato como adhesivo en conexiones de alta resistencia de vidrio a vidrio, puede ser influido por factores de espesor de la capa aplicada, la viscosidad y el tiempo de curado. En comparación con los silicones los acrilatos tienen una resistencia diez veces mayor, pero en cuanto a su resistencia por temperatura los silicones son los mejores (Véase también la Figura 2.10.5). Problemas como la fragilidad, la reducida elongación asociada a la rotura, la decadencia de la resistencia a través del tiempo, y la tendencia de color amarillento del pegamento, se han resuelto y controlado hasta hoy en día mediante el desarrollo de modernos adhesivos de acrilato.

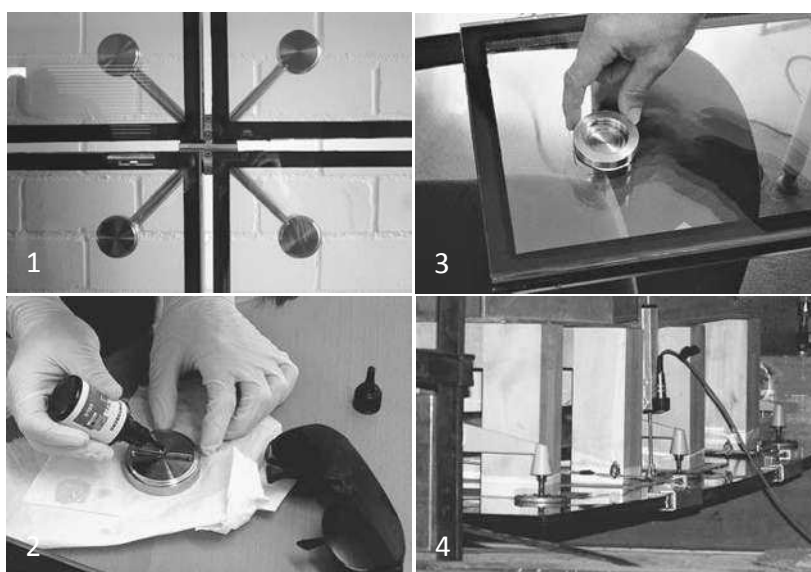


Figura 2.10 Fijaciones especiales con adhesivos:

1,2 y 3 Fijación de puntos con adhesivo.

4. Prueba de carga de un vidrio unido con adhesivo de acrilato.

5. Comparativa de propiedades de adhesivos (instrucciones de fabricante).

Fabricantes de sistemas de adhesivos	Producto	Esfuerzo de tensión (kg/cm ²)	Esfuerzo cortante vidrio-vidrio/vidrio-Al (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Temperatura °C	Elongación a la rotura (%)	Color
Fabricante 1 Dos partes de resina epoxi	Solo uso interior	----	260/----	-2500	Más de 40	-----	claro
Fabricante 2 Adhesivo de acrilato	Curado UV	200	230/230	9000	-40 a 120	17	claro
	Curado con Luz	120	220/240	2500	-40 a 120	200	claro
	Interior/ Conexión de adhesivo lineal	120	100/120	800	-40 a 120	280	claro
5	Interior/ Conexión de adhesivo lineal		60/40		-40 a 120	300	Amarillo /claro

2.3 El uso del vidrio en revestido de edificios

Las distintas posiciones de los paneles de vidrio en la fachada de un edificio, se pueden clasificar en acristalamiento vertical, horizontal e inclinado. Si nos guiamos por su ángulo de inclinación, la posición de acristalamiento vertical es aquella donde la inclinación no rebasa los 10 grados con respecto a la vertical, la posición de acristalamiento horizontal es hasta 15 grados con respecto a una horizontal y, el acristalamiento inclinado se presenta cuando las otras posiciones de acristalamiento no se cumplen.

Algunas veces, la posición de los paneles de vidrio determina el tipo y duración de la carga (estanqueidad del agua o nieve por ejemplo) y el peligro potencial asociado. Sobre todo para los acristalamientos inclinados y horizontales en áreas públicas, donde se debe considerar el aspecto de la capacidad de carga de pos-rotura. Desde luego este aspecto es también válido en el caso de un acristalamiento vertical.

Una descripción detallada de aplicaciones del vidrio en la construcción se incluye en el "Manual de construcción de vidrio" de Schittich, C., Staib, G., Balkow, D. et al., 2007. La siguiente sección resume algunos de los aspectos requeridos para los diferentes tipos de acristalamientos.

2.3.1 Acristalamientos verticales

La acción del viento puede producir fuerzas de empuje y de succión, las cuales suelen producir flexión fuera del plano de la superficie del vidrio, también el efecto del peso propio del vidrio que actúa en el plano del vidrio, son efectos que se transmiten a las calzas de apoyo o a las conexiones de la estructura.

El objetivo fundamental es procurar o asegurar que los espacios públicos o áreas de paso que se encuentran por debajo del sistema de acristalamiento, estén protegidas contra la caída de peligrosos fragmentos de vidrio (Figura 2.13.1-2). Sin embargo, cuando un vidrio se encuentra apoyado a lo largo de todos sus bordes y lejos de ocasionar daños hacia las personas, en esos casos se pueden usar tipos de vidrio como el recocido, a pesar de que este tipo de vidrio se rompa en grandes pedazos. Otra opción para el acristalamiento vertical es el uso del vidrio laminado, ya que este es capaz de resistir cargas vivas durante un tiempo determinado.

Un acristalamiento vertical también funciona como barrera de seguridad que se usa como protección para que las personas no corran riesgo de una caída a una altura determinada o simplemente para impedir el paso de las mismas (Figura 2.11.3). El vidrio laminado es muy útil para este caso, barreras de seguridad, ya que es capaz de resistir el impacto de un cuerpo humano. La NOM-146-SCFI-2001 hace referencia a pruebas de impacto.

Es importante recordar que el uso del vidrio laminado formado por placas de vidrio templado presenta baja capacidad de carga residual, y que un panel de vidrio apoyado en dos bordes opuestos presentará una flecha mayor en su centro que un panel apoyado en sus cuatro bordes, por lo tanto es más deseable proporcionar apoyo en los cuatro bordes siempre que sea posible.



Figura 2.11 *Sistemas de acristalamiento verticales:*

1. *Fijaciones de araña en un acristalamiento vertical*
2. *Acristalamiento vertical hecho de vidrio templado, una rotura y caída de fragmentos podría causar lesiones severas*
3. *Acristalamiento que actúa como barrera de seguridad: Café en el Tate Modern con una vista sobre el Thames, 2001*
4. *Barreras de vidrio de seguridad en los andadores elevados, Museo de la ciencia en Paris, Francia.*
(Imágenes 1, 2 y 3 tomadas de Wurm, J., 2007)

Los acristalamientos verticales son también cortinas de vidrio cuya función es brindar iluminación natural y transparencia en divisiones interiores y en fachadas. El reto a superar para su construcción dada su esbeltez, no es su propio peso ya que la resistencia a compresión del vidrio es muy alta, sino su capacidad para resistir acciones horizontales, el pandeo y los movimientos diferenciales. Por lo que podemos subdividir a los acristalamientos verticales en los siguientes grupos:

1. Cortinas de vidrio de baja altura.
2. Cortinas de vidrio de mediana altura y suspendidas.
3. Cortinas de vidrio de mediana altura con cables y tensores.
4. Cortinas de vidrio de gran altura conformadas con montantes y travesaños.

2.3.1.1 Cortinas de vidrio de baja altura

Son estructuras simples de placas de vidrio verticales donde su apoyo principal es el piso aislado o sobre un elemento de soporte inmóvil, además de otro tipo de apoyo que evite su vuelco. Generalmente, la sujeción es mixta, pero sobresalen las de pletinas atornilladas, las cuales generan una sujeción de tipo empotramiento, es decir, comprimen entre las dos placas el borde del vidrio. La altura de estas cortinas de vidrio se limita a tan solo el tamaño máximo de una hoja de vidrio, esto se muestra en la Figura 2.12.

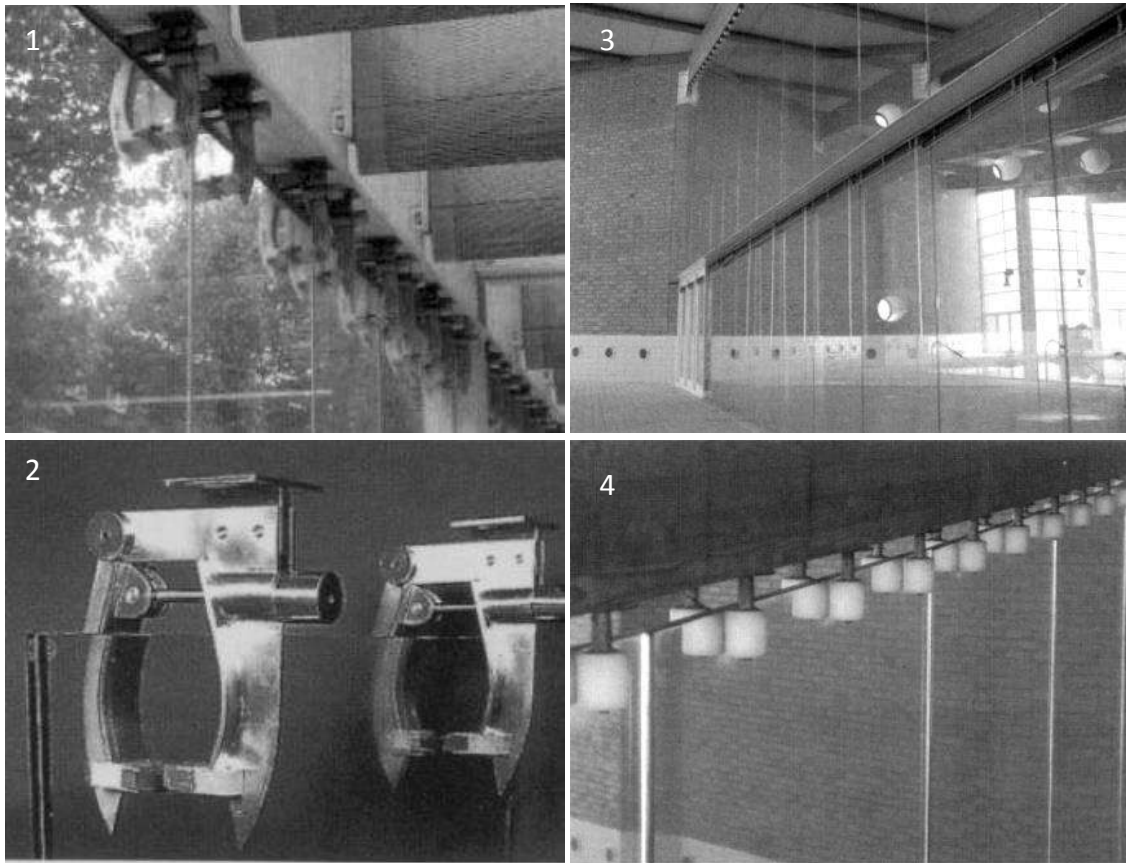


Figura 2.12 Cortinas de vidrio simples (Ignacio P., 2000):

1. Sujeción con pinzas (Estación de metro St. Bermondsey, Londres).
2. Pinzas, restringen el desplazamiento fuera del plano del vidrio en los bordes.
3. Vidrios apoyados en sus extremos en el interior de un edificio.
4. Elementos de sujeción que evitan el vuelco de la cortina de vidrio de la figura anterior.

2.3.1.2 Cortinas de vidrio de mediana altura y suspendidas

Las cortinas con vidrios colgados son la solución para trabajos de mayor altura. Lo ideal sería que los paneles de vidrio se colocaran uno sobre otro, tomando en cuenta que el valor del vidrio a compresión es muy alto (Sección 1.4), sin embargo en ese caso, no se asume el riesgo de que la cortina vertical de vidrio colapse a causa de la rotura de alguno de sus paneles de vidrio situados en una zona inferior. Otro problema que se presentaría es el de cómo sostener a los paneles de vidrio superiores mientras se hace el remplazo del panel fracturado. Para evitar problemas de este tipo y de pandeo, se optó por colgar las piezas de vidrio inferiores de las superiores, lo cual genera otro problema que se puede presentar en dicho sistema, y que consiste en la capacidad para resistir

las tensiones en zonas de fijación, esto también es un problema del vidrio templado. En consecuencia se limita la altura de las cortinas de vidrios colgados.

Las acciones horizontales de viento se contrarrestan en muchas ocasiones con contrafuertes verticales de vidrio laminado de un espesor superior a los paneles de vidrio colgados.

2.3.1.3 Cortinas de vidrio de mediana altura con cables y tensores

Esta clase de cortinas de vidrio resuelve los problemas de pandeo, de tal forma que cada panel de vidrio soporta su propio peso. Este tipo de cortinas de vidrio están conformadas por cables y tensores metálicos, los cuales cuelgan de lo más alto para sostener el peso de toda la cortina de vidrio. Las acciones de viento son solventadas en ocasiones por secciones tubulares o de contrafuertes de vidrio, verticalmente (Figura 2.13).



Figura 2.13 Cortinas de vidrio con tensores y cables:

1. Torres de vidrio del museo Reina Sofía, Madrid, España.
2. Vista lateral de una de las torres, en la que se observa el atirantado de cables de acero que cuelgan de la parte superior, siendo tensados para resolver las acciones horizontales del viento.
3. Vista interior, por donde se observa la conexión del vidrio con la subestructura.

2.3.1.4 Cortinas de vidrio de gran altura conformadas con montantes y travesaños

Las cortinas de vidrio conformadas por un sistema de montantes y travesaños (Figura 2.14) son las más comunes en edificios de mediana a gran altura, ya que este sistema de acristalamiento vertical ofrece un mayor grado de seguridad en el diseño, porque los paneles de vidrio siempre se encuentran bien sujetos a lo largo de todos sus bordes, para que las cargas puedan ser transmitidas a la subestructura rápidamente y sin concentrar los esfuerzos. La rotura de un panel con este tipo de acristalamiento resulta fácil de remplazar y no pone en riesgo la estabilidad del mismo. Este tipo de cortinas de vidrio también parecen ser las más estudiadas y reglamentadas hasta el momento para diferentes tipos de acciones y condiciones de apoyos, sin embargo, en los últimos años se ha interrumpido la frecuencia de la implementación de estos sistemas, debido a que las nuevas tendencias arquitectónicas han demandado el desarrollado de otro tipo de sistemas de acristalamiento. Como veremos en el capítulo tres, los reglamentos de construcción para elementos de vidrio con que cuentan varios países, están enfocados principalmente a este tipo de sistemas de

Capítulo 2 Descripción de Conexiones en Cortinas de Vidrio

acristalamiento, porque ofrecen mayor capacidad a la resistencia y en consecuencia a la deformación máxima. Sin embargo, los reglamentos actuales no cubren todas las necesidades reales de los diseñadores, quienes tienen que recurrir a usar métodos aproximados y a realizar pruebas a escala real.

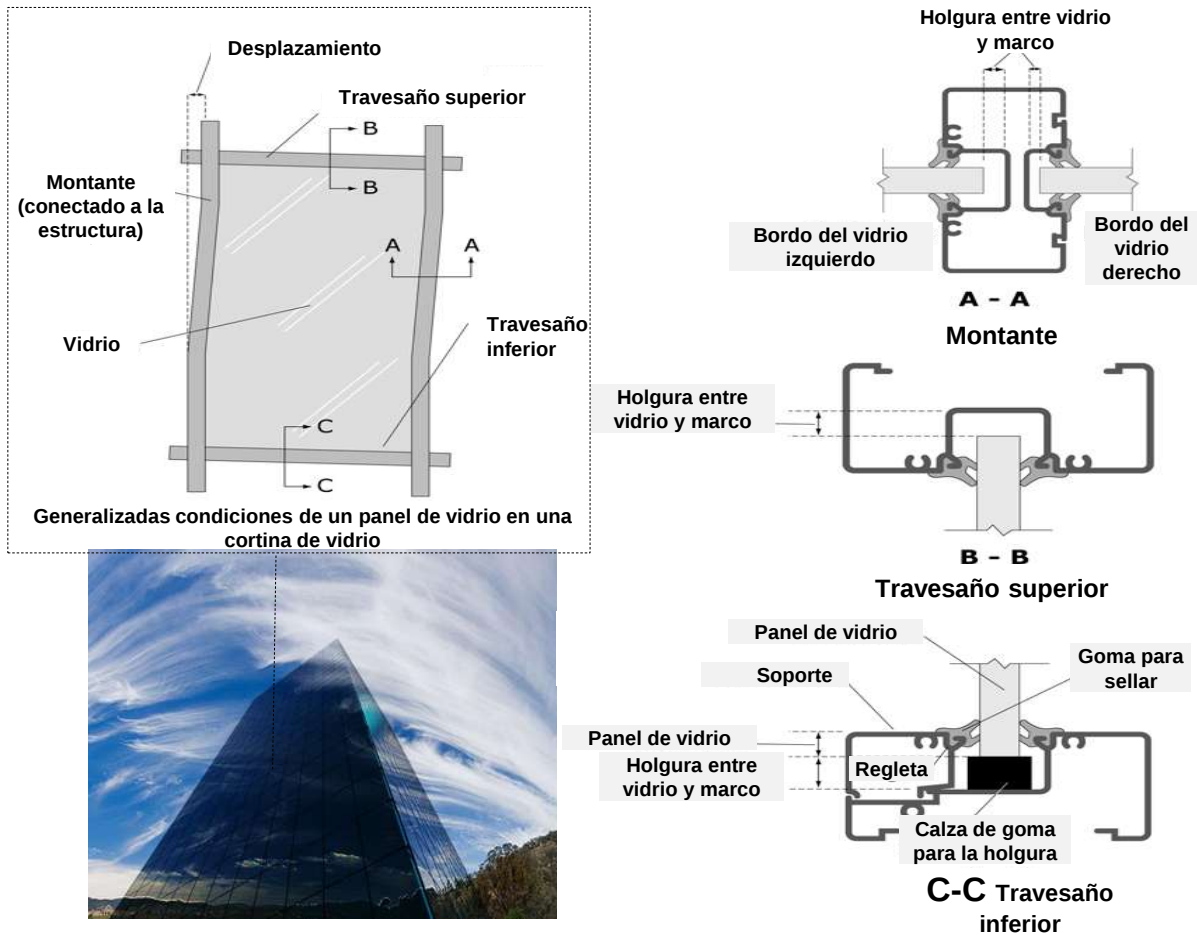


Figura 2.14 Cortina de vidrio con montantes y travesaños, frecuentemente empleado en edificios de mediana a gran altura.

2.3.2 Acristalamientos horizontales e inclinados

Los paneles de vidrio de un acristalamiento horizontal o inclinado, experimentan el efecto de su propio peso, sobre todo los de tipo horizontal, por lo cual se recomienda por seguridad el empleo de un vidrio laminado. No es aconsejable utilizar un vidrio templado para este tipo de acristalamientos debido a su baja capacidad de carga en el estado de rotura.

También es bueno asegurar el vidrio en sus cuatro bordes en comparación de hacerlo solamente en dos bordes, puesto que así se aminora el riesgo de la flecha en el centro del panel, inclusive para los vidrios laminados de seguridad. Las normas técnicas Alemanas para acristalamiento apoyados de forma lineal (TRLV), aconsejan que los apoyos sean lineales y continuos en todas sus partes, y con una relación longitudinal máxima de 3:1 para claros de hasta de 1.2 m. Los casos donde los vidrios se apoyan solamente en puntos y perforados o curvos no son cubiertos por estas nomas.

Las conexiones para acristalamientos horizontales pueden ser de vidrio con vidrio y unidas con adhesivo (Figura 2.15.2) o simplemente apoyados sobre barras metálicas. Es muy importante

que se evite la estanqueidad del agua y su filtración sobre los vidrios horizontales dado que debilitan la superficie del vidrio. Construir un sistema eficiente de drenado de agua, casi siempre resuelve estos problemas.

Para acristalamientos inclinados sus conexiones suelen ser muy similares a los casos de acristalamiento horizontal y vertical (Figura 2.15.1). Las recomendaciones existentes de estos últimos acristalamientos encajan perfectamente para los acristalamientos inclinados.

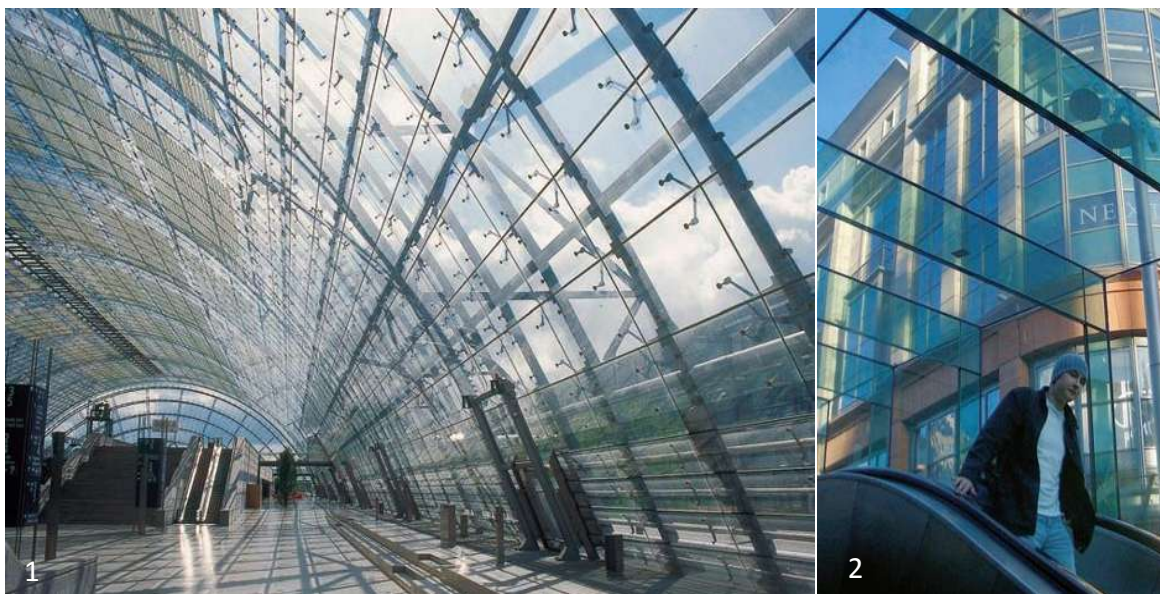


Figura 2.15 Acristalamientos de vidrios horizontales y verticales (Wurm, J., 2007):

1. *Neue Messe Leipzig, 1996, es un ejemplo de la forma y arreglo de fijaciones puntuales, la capacidad residual de carga en este caso fue dispensable.*
2. *Acristalamiento horizontal con paneles de vidrio laminado. Entrada a la estación de tren subterráneo, calle de Buchanan, Glasgow, 2003.*

2.3.2.1 Tránsito sobre acristalamientos horizontales

Los acristalamientos que se elevan por encima de las personas se limpian y se les da mantenimiento por personal calificado, lo cual debe considerarse durante el proceso de diseño. Si se quiere evitar un riesgo mayor es recomendable dar cierre del paso público durante las tareas antes mencionadas. De esta manera surge la necesidad de contemplar la capacidad de carga de pos-rotura como medida de seguridad en el elemento de vidrio.

Los paneles de vidrio que cumplen funciones de tránsito peatonal, tales como peldaños de escalera, pisos traslucidos o iluminados, presentan un diseño que cubre el planteamiento de cargas peatonales concentradas y distribuidas de manera uniforme (Figura 2.16.1). Estos son aspectos que actualmente el diseñador debe contemplar sin una normativa vigente para su construcción.

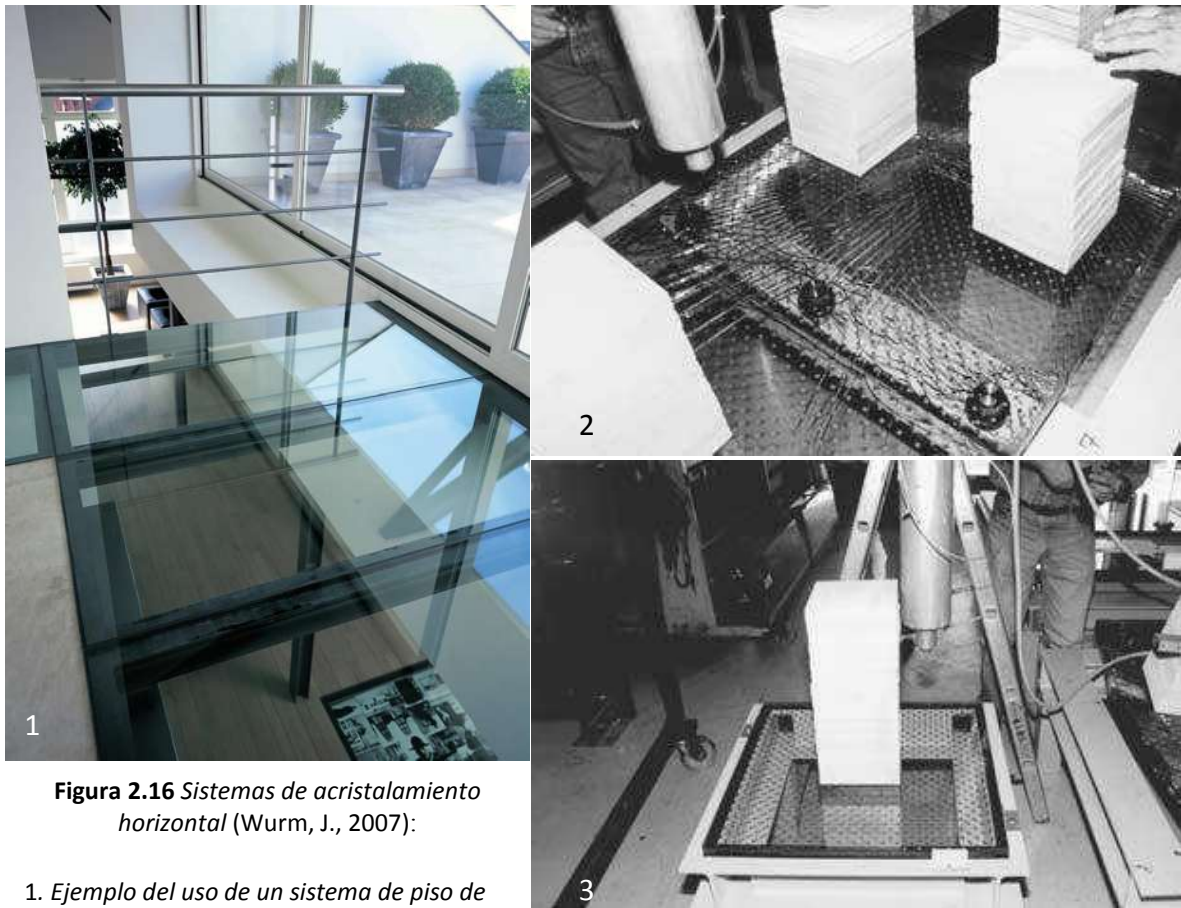


Figura 2.16 *Sistemas de acristalamiento horizontal (Wurm, J., 2007):*

1. *Ejemplo del uso de un sistema de piso de vidrio: Casa privada Amberes, Bélgica.*
- 2-3 *Pruebas de carga y de impacto.*

Para este tipo de uso de vidrio se recomienda realizar la prueba de impacto, seguida de una prueba de capacidad de carga de pos-rotura (Figuras 2.16.2 y 2.16.3). A demás, es normal usar vidrio laminado de seguridad de al menos tres paneles de vidrio combinando, vidrio templado, vidrio semi-templado o vidrio recocido. El panel que debe colocarse encima es el panel de vidrio templado, puesto que es el más resistente contra impactos. Como se trata de usar el vidrio como piso, este debe contar con una superficie antideslizante, donde se debe tener presente el desgaste de la capa superior en el análisis estructural. El apoyo de los lados incrementa considerablemente la capacidad de carga de pos-rotura. Las juntas de elastómero son compatibles con el vidrio siempre que se apliquen adecuadamente, es decir, el ancho y espesor deben ser uniformes. El comportamiento de los bordes debe ser isostático y no de un perfecto empotramiento, al mismo tiempo se debe tener un control de sus desplazamientos, es decir que cuando se llegue la rotura el panel no se pueda soltar de los apoyos, lo cual se consigue con la fijación de pernos o adhesivos (Figura 2.17).

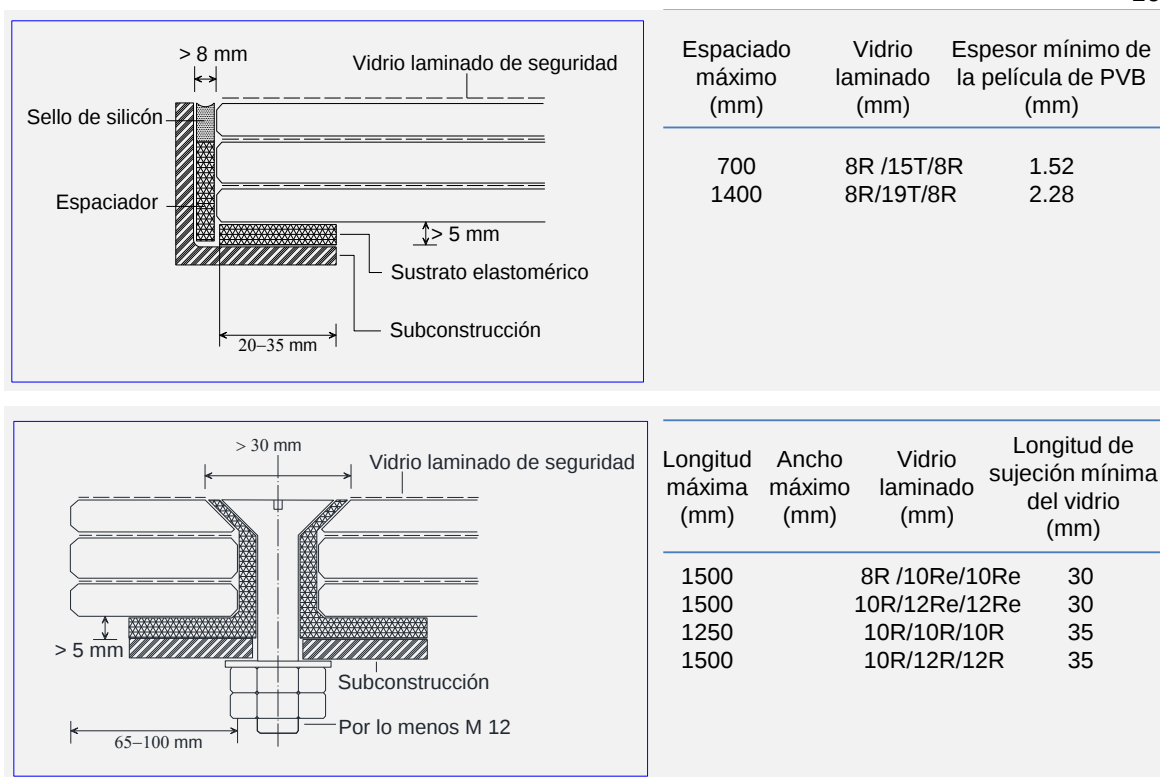


Figura 2.17 Detallado de una conexión para un acristalamiento horizontal contra carga viva (libre tránsito de personas) :

1. Esquema para la construcción de un vidrio laminado en apoyos simples en los 4 bordes.
 2. Esquema para la construcción de un vidrio laminado en apoyos simples en dos bordes.
- Re: vidrio recocido, T: vidrio templado y R: vidrio reforzado al calor

Pruebas y Métodos de Diseño en Vidrio

3.1 Pruebas de laboratorio para el vidrio

3.1.1 Pruebas de fatiga estática

Las pruebas de fatiga estática a flexión inicialmente se practicaban solamente en elementos simplemente apoyados, a esta prueba también se le conoce como prueba de flexión de tres puntos, F3P, dos son apoyos y uno más para la aplicación de la carga. Actualmente se prefiere que los elementos a flexión estén apoyados en cuatro puntos (F4P), dos de apoyos extremos y dos en el centro, donde es aplicada la carga. La carga que se utiliza para realizar las pruebas corresponde a una carga permanente que hace fallar al espécimen en un tiempo determinado. Debido a que la resistencia del vidrio depende tanto de la duración como de la magnitud de la carga, estas pruebas presentan una gran desventaja en cuanto al tiempo necesario para hacerlas con respecto de los materiales tradicionales de construcción. Se tiene registrado que este tipo de pruebas pueden llegar a durar días, como las pruebas realizadas por Black en 1935, en una configuración de prueba en F3P, donde 9 de 18 especímenes alcanzaron la falla después de transcurrir 20 días. Por lo tanto, es muy importante considerar para el diseño de una prueba las condiciones de la superficie y los efectos de corrosión sobre el vidrio para determinar el tiempo esperado de falla. Este tipo de prueba tiene la ventaja de recrear las condiciones ambientales a las que se verá sometida una placa de vidrio puesta en servicio durante su vida útil. La Figura 3.1 muestra un ejemplo en donde se puede observar el efecto de la resistencia del vidrio ante cargas estáticas asociadas al tiempo de rotura.

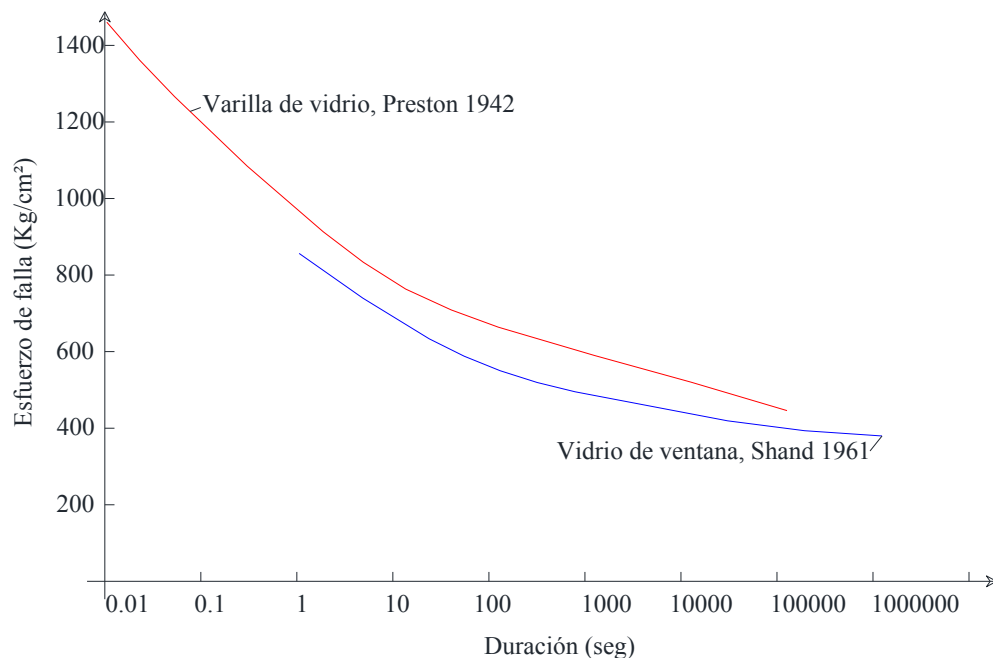


Figura 3.1 Efecto de la carga estática (Gráfica modificada de Beason, W. L., 1980).

3.1.2 Pruebas de fatiga dinámica

Las pruebas de fatiga dinámica se usan cuando la carga que se aplica a los especímenes varía de forma incremental en el tiempo, es decir, cuando ésta es transmitida a velocidad o tasa constante hasta la falla, de modo que las pruebas consumen menos tiempo. Las pruebas de este tipo se usan en una configuración a flexión de cuatro puntos (F4P), la prueba coaxial de doble anillo (CDA) o prueba concéntrica de anillos y las pruebas en placas de vidrio a flexión biaxial sobre un marco hermético de vacío, como las pruebas realizadas por Beason en 1980. La prueba de F4P se desarrolla únicamente a esfuerzo de tensión en una sola dirección (uniaxial, es decir, $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$); mientras que la prueba CDA establece esfuerzos de tensión de igual magnitud en las dos direcciones, es decir, se tiene una distribución de esfuerzos equibiaxial ($\sigma_1 = \sigma_2$); y para las pruebas hechas con el formato de Beason en placas rectangulares los esfuerzos de tensión son distintos ($\sigma_1 \neq \sigma_2$). A partir de estas pruebas es posible estimar dos aspectos fundamentales para la caracterización de su resistencia: los esfuerzos de falla y los parámetros de velocidad de grieta v_0 , cuyos parámetros definen el comportamiento de una grieta superficial en el vidrio, Figura 3.2.

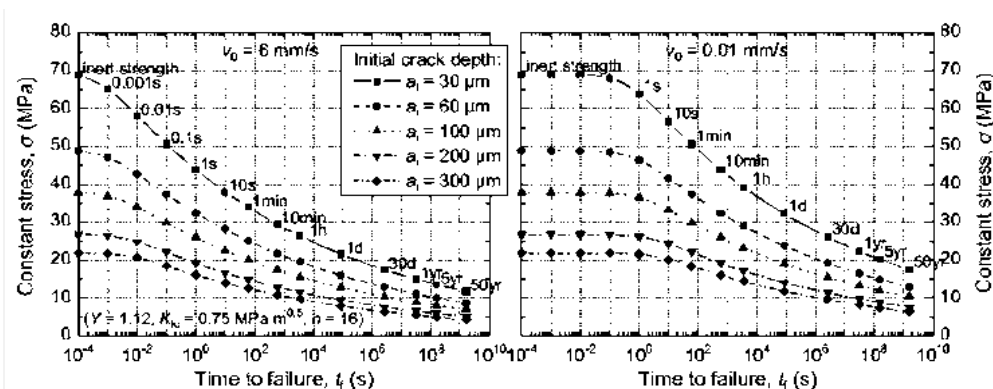


Figura 3.2 Ilustración la resistencia analítica de una grieta bajo esfuerzo constante, con diferentes profundidades de fisura y en el tiempo. Para $v_0 = 6 \text{ mm/s}$ (izquierda) y para $v_0 = 0.01 \text{ mm/s}$ (derecha) (Haldimann, M., 2006).

Ocasionalmente los esfuerzos de falla de muestras de vidrio se relacionan con el daño de la superficie y con el crecimiento subcrítico de grieta de ensayos en condiciones ambientales. Otras veces, los esfuerzos de falla se obtienen bajo ensayos sobre muestras de vidrio en condiciones inertes, donde el crecimiento de grieta subcrítico es evitado. Los parámetros de velocidad de grieta son difíciles de precisar puesto que el micro fisurado que se tiene sobre la superficie del vidrio es aleatorio y muchas veces se elige un criterio de grietas inducidas artificialmente para determinar estos parámetros. Los defectos en la superficie y en los bordes de una muestra pueden influir de manera importante en la resistencia del vidrio. En una prueba CDA solamente influyen los defectos de superficie, mientras que para el caso de una prueba de F4P, no cabe duda de la influencia tanto de los defectos de borde como los de superficie. Las pruebas antes descritas se ilustran en la Figura 3.3.

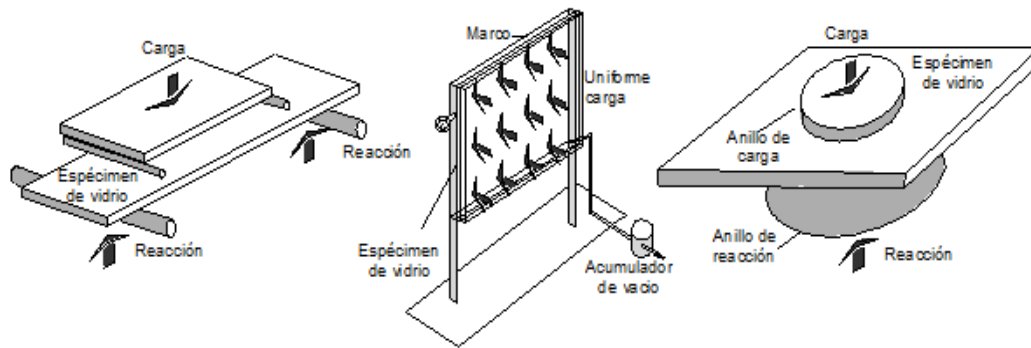


Figura 3.3 Prueba de flexión de cuatro puntos (izquierda), prueba de flexión de placa en marco (medio) y prueba coaxial de doble anillo (derecha).

Dadas las dificultades que se han encontrado en la realización de pruebas experimentales de elementos estructurales de vidrio, es que se han desarrollado normas donde se especifican todos los detalles y aspectos a cumplir; por ejemplo, las pruebas de fatiga dinámica de CDA y de F4P se manejan bajo las normas europeas. En el caso de la prueba coaxial de doble anillo están los códigos EN 1288-1:2000, EN 1288-2:2000 y EN 1288-5:2000. Los dos últimos informan sobre las configuraciones que debe tomar la prueba, mientras que el primero explica los fundamentos de la prueba. La norma europea 1288-3:2000 describe la prueba de flexión de cuatro puntos. En todas estas normas se especifica una velocidad o tasa de esfuerzo de 20.4 ± 4 (kgf/cm²)/s. Este aspecto contribuye en la respuesta esperada de la resistencia en el tiempo de falla del espécimen de vidrio.

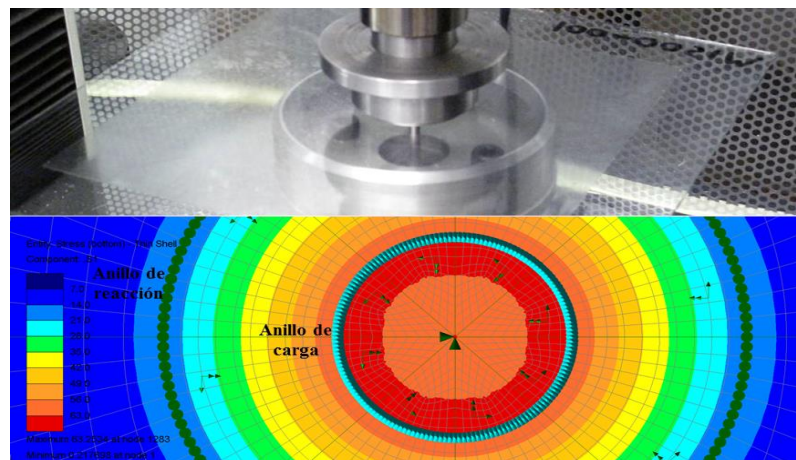


Figura 3.4 Prueba CDA (superior) y Distribución de Esfuerzo de Tensión donde $\sigma_1 = \sigma_2$ (inferior), tomadas de Zammit y Overend, 2009.

Hablando un poco más de estas normas, la norma EN 1288-2:2000 presenta la configuración de la prueba CDA en formato R400, que es una prueba donde se emplea un anillo para aplicar carga con un radio de 30 cm, con ± 1 mm de tolerancia, y otro anillo de reacción de radio de 40 cm, con ± 1 mm de tolerancia, por lo que, el área de la prueba bajo el anillo menor es de 2400 cm² con respecto al tamaño total de la muestra que es de 10000 cm². De igual forma, la norma EN 1288-5:2000 presenta la prueba CDA en un formato R45, en ésta se emplean anillos más

pequeños de 0.9 y 4.5 cm de radio con una aproximación de más menos un milímetro, un área de ensaye de 2.54 cm² y una muestra del tamaño de 100 cm² de área, como se muestra en la Figura 3.4.

El laboratorio de la Universidad Tecnológica de Texas facilitó el desarrollo de las pruebas hechas en placas de vidrio bajo carga lateral controlada, las cuales fueron dirigidas por Beason en 1980. Básicamente las pruebas necesitaban de tres componentes: uno de ellos era la placa de vidrio, la cual sería llevada hasta la falla en un marco con bordes herméticos para generar vacío, de un sistema de carga y de un sistema de medición de carga o presión (manómetros) a lo largo del tiempo. Finalmente también existe la norma americana general ASTM C 1499 – 05 para determinar monotónicamente la resistencia a flexión equibiaxial de cerámicos avanzados (vidrio) a temperatura ambiente.

3.2 Métodos norteamericanos y europeos de diseño estructural para vidrio

En las tres secciones siguientes se describen los métodos de diseño estructural para vidrio más importantes de Norte América y en las seis secciones finales de este capítulo se describen los métodos de diseño estructural para vidrio más importantes de Europa.

3.2.1 Modelo de predicción de falla de vidrio (MPFV)

El método inicialmente fue presentado en 1980 por William Lynn Beason como su trabajo de tesis doctoral intitulado Modelo de Predicción de Falla para Ventanas de Vidrio. Poco después en 1984, Beason y Morgan presentaron un artículo sobre el método, solamente que con el nombre de Modelo de Predicción de Falla de Vidrio (MPFV). Años más tarde Beason realizó algunas mejoras al método, las cuales se integraron en 1998 a la norma ASTM E 1300. Esta norma es la base y referencia fundamental para algunos de los diseñadores de la práctica profesional en Norte América. Entonces, el MPFV es un método norteamericano que surge de la necesidad de acabar con las diferencias en los resultados de las resistencias sobre el vidrio propuestos por los fabricantes, y principalmente de la gran confusión que esto generaba a los diseñadores de sistemas de acristalamiento. El MPFV reconoce la incertidumbre que se tiene en la resistencia del vidrio, la cual se atribuye en parte a las micro fisuras o defectos encontrados en la superficie del vidrio, y es mediante una distribución de probabilidad de Weillbul (1939) que se modela este problema; concepto que es aplicable exclusivamente al comportamiento de materiales frágiles (vidrio), la probabilidad de falla se puede determinar mediante:

$$P_f = 1 - e^{-B} \quad (3.1)$$

donde B representa el riesgo de falla, que incluye los factores de magnitud y duración de los esfuerzos de tensión en la superficie sobre la placa, el área de la placa expuesta a esfuerzos de tensión, y la geometría y orientación de las fisuras de la superficie. Esto se obtiene mediante la función de riesgo generalizada:

$$B = k \int_A \left[c(x, y) \tilde{\sigma}_{equivalente, máx} (q, x, y) \right]^m dA \quad (3.2)$$

Capítulo 3 Pruebas y Métodos de Diseño en Vidrio

k y m son parámetros representativos de los defectos de superficie, permitiendo que mediante el modelo se estime la probabilidad de falla de una placa de vidrio. $c(x,y)$ es el factor de corrección de tensión biaxial y la relación del menor al máximo esfuerzo principal que varía a lo largo de la superficie de la placa como función de la carga lateral, q . A es el área de la superficie. $\tilde{\sigma}_{equivalente,m\acute{a}x}(q,x,y) = \sigma(q,x,y)(t_d \div 60)^{1/16}$ es el esfuerzo máximo equivalente que es función de la carga lateral, q , y de un punto (x,y) en la superficie de la placa. De acuerdo con las definiciones anteriores se obtiene la siguiente expresión, correspondiente al caso de placas rectangulares de vidrio bajo carga lateral uniforme de duración constante:

$$B = k(ab)^{1-m} (Eh^2)^m \left(\frac{t_d}{60} \right)^{m/16} R \left(m, \hat{q}, \frac{a}{b} \right) \quad (3.3)$$

donde:

a y b	son las dimensiones de la placa rectangular, además de que $a > b$.
h	es el espesor efectivo del vidrio.
t_d	es la duración de la carga en segundos.
E	es el módulo de elasticidad del vidrio.

El factor de riesgo se define como:

$$R \left(m, \hat{q}, \frac{a}{b} \right) = \frac{1}{ab} \int_A \left[c(x,y) \hat{\sigma}_{m\acute{a}x}(\hat{q},x,y) \right]^m dA \quad (3.4)$$

donde:

$\hat{q} = q(ab)^2 / Eh^4$ es la carga lateral normalizada como función de la carga lateral q aplicada. $\hat{\sigma}_{m\acute{a}x}(\hat{q},x,y) = \sigma(q,x,y)ab / Eh^2$ es el esfuerzo máximo normalizado expresado en función del esfuerzo $\sigma(q,x,y)$.

Por lo que, al sustituir estas definiciones en la ecuación 3.1, la probabilidad de falla para una placa de vidrio en términos de B y R es:

$$P_f = 1 - e^{-k(ab)^{1-m} (Eh^2)^m \left(\frac{t_d}{60} \right)^{m/16} R \left(m, \hat{q}, \frac{a}{b} \right)} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 expresa la probabilidad de falla de placas rectangulares de vidrio bajo carga lateral uniforme como función del factor de riesgo, R , los parámetros de defecto de superficie, m y k ; las dimensiones de placa, a , b y h ; y la duración de carga, t_d .

Consecuentemente m y k son los parámetros encargados de describir los defectos de la superficie del vidrio y se estiman a partir de pruebas experimentales de placas rectangulares de vidrio para dos modalidades, nuevas y en servicio, ante carga lateral uniforme (Sección 3.1.2). En 1980 Beason utilizó placas con 20 años de servicio. Por lo tanto, la determinación de estos parámetros está ligada a un proceso que es iterativo y laborioso, a fin de que el modelo se base en la teoría de que la falla del vidrio resulta de la interacción de los esfuerzos de tensión en la superficie con los parámetros de defectos de superficie. Lo primero que se hace entonces es calcular la relación bien definida entre la magnitud de la carga aplicada y la magnitud del esfuerzo de tensión (información de laboratorio), después se establece la relación de la duración de la carga y el tiempo de falla, el punto donde se originó la falla se describe visualmente a partir del patrón de rotura. A partir de estas relaciones se puede establecer una nueva relación entre el esfuerzo y el tiempo; por lo que se puede formular un esfuerzo equivalente a una carga con duración de 60 segundos. De allí se obtiene la carga equivalente de 60 segundos de duración. El proceso de la obtención de los parámetros continúa con el cálculo de los factores de riesgo, R , correspondientes a la carga de falla equivalente y a una serie de valores de m supuestos. Los valores estadísticos del factor de riesgo son calculados (la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación). Si el coeficiente de variación es cercano a 1.0 (media igual a la desviación estándar), éste representa el mejor valor de m para el cálculo de k en conjunto con el valor medio del factor de riesgo y de la geometría de la placa. El valor y unidades de k son entonces dependientes del parámetro m .

3.2.2 Norma ASTM E 1300-12a para la determinación de la resistente del vidrio en edificios

Como se mencionó antes, la norma ASTM E 1300-12a es una de las normas más importantes hasta el momento para el diseño de paneles de vidrio bajo carga uniforme y para diferentes configuraciones de apoyos, esto se hace a través de la implementación de un número extenso de gráficos que permiten determinar el espesor requerido de vidrio. Los gráficos fueron desarrollados bajo los fundamentos teóricos del modelo de predicción de falla de vidrio propuesto por Beason (Sección 3.2.1), y bajo la implementación del método de diferencias finitas para estimar los esfuerzo, y de trabajos desarrollados por Vallabhan desde 1983 para el cálculo de las deflexiones en el vidrio considerando un análisis geométrico no lineal.

La norma ASTM E 1300-12a trata sobre la determinación de la resistencia de carga de varios tipos de vidrio específicos expuestos a una carga lateral uniforme de corta o larga duración, la determinación de la resistencia se estima para una probabilidad de falla (P_f) del 0.8% para casos de acristalamientos verticales o con una cierta inclinación en edificios. La carga de diseño considerada puede deberse a una combinación de varias acciones como son viento, nieve, sismo y el peso propio, o bajo combinación de acciones siempre y cuando se cumpla que esta sea menor o igual que 15 kPa (315 psf ó igual a 0.15285 kgf/cm²). La norma no se recomienda para los casos de barandillas, panales de vidrio en piso, acuarios, miembros estructurales de vidrio y estantes. También, no se aplicará en ningún caso cuando el vidrio se encuentre enmallado, estampado, grabado, arenado, perforado, vidrio con ranuras o surcos y, vidrio con tratamientos de superficie y borde en donde se altere la resistencia. Los tipos de vidrio en donde es aplicable únicamente la

Heriberto Puga Juárez

Capítulo 3 Pruebas y Métodos de Diseño en Vidrio

norma corresponden a vidrio monolítico, vidrio laminado y a unidades de vidrio aislante para la construcción, de forma rectangular con soporte lateral continuo simple en uno, dos, tres o cuatro bordes, este último caso se tiene únicamente para la unidad de vidrio aislante. En esta norma se presenta un procedimiento para la determinación de la carga resistente (o LR por sus siglas en inglés: Load Resistance) de un panel de vidrio, la cual se compara con la carga de diseño, q , es decir, la acción lateral perpendicular que actué sobre la superficie del vidrio, de donde se establece que se debe de cumplir la igualdad:

$$q \leq LR \quad (3.6)$$

Si LR es menor que la carga específica, q , debe adoptarse un espesor o tipo de vidrio necesario hasta que LR sea igual o mayor a la carga de diseño especificada, q . Dos factores definen la LR, la cual se puede estimar de acuerdo con la siguiente expresión:

$$LR = GTF \cdot NFL \quad (3.7)$$

GTF (por sus siglas en inglés: Glass Type Factor), es el llamado factor de tipo de vidrio, con el cual se toma en cuenta el tipo de vidrio y el efecto de la duración de la carga, algunos de sus valores se tabulan en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

NFL (por sus siglas en inglés: Non-Factored Load), es la carga no factorizada, y se basa en la teoría del modelo de rotura del vidrio que relaciona la resistencia del vidrio con los defectos de superficie (basada en una duración de 3 segundos), el cual se obtiene a partir de los gráficos propuestos como función de la geometría, tipo de apoyos y el espesor de vidrio. En el caso de vidrio laminado el NFL incorpora un modelo viscoelástico para el análisis de la capa intermedia. Este modelo describe con precisión el módulo de corte del polímero a una temperatura de 50°C durante 3 segundos, por lo que la intercapa de butiral de polivinilo se basa en un módulo de elasticidad de 1.5 Mpa (15.285 kgf/cm²). Este valor es inferior para capas del PVB comercialmente disponibles, bajo las condiciones antes mencionadas.

Tabla 3.1 Factores de tipos de vidrio (GTF) para un único vidrio monolítico o vidrio laminado (norma ASTM E 1300-12a).

Tipo de vidrio	GTF	
	Carga de corta duración (3s)	Carga de larga duración (30 días)
Vidrio Recocido (ANG)	1.0	0.43
Vidrio Tratado Térmicamente (HSG)	2.0	1.30
Vidrio Templado (FTG)	4.0	3.00

Tabla 3.2 Factores de tipos de vidrio (GTF) para doble acristalamiento en vidrio aislante (IG), carga de corta duración (norma ASTM E 1300-12a).

Núm. 1 Vidrios Monolíticos o Tipo de Vidrios Laminados	Núm. 2 Vidrios Monolíticos o Tipo de Vidrios Laminados					
	AN		HS		FT	
	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2
ANG	0.9	0.9	1.0	1.9	1.0	3.8
HSG	1.9	1.0	1.8	1.8	1.9	3.8
FTG	3.8	1.0	3.8	1.9	3.6	3.6

Tabla 3.3 Factores de tipos de vidrio (GTF) para doble acristalamiento en vidrio aislante (IG), carga de larga duración (norma ASTM E 1300-12a).

Núm. 1 Vidrios Monolíticos o Tipo de Vidrios Laminados	Núm. 2 Vidrios Monolíticos o Tipo de Vidrios Laminados					
	AN		HS		FT	
	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2
	ANG	HSG	FTG			
ANG	0.39	0.39	0.43	1.25	0.43	2.85
HSG	1.25	0.43	1.25	1.25	1.25	2.85
FTG	2.85	0.43	2.85	1.25	2.85	2.85

Los gráficos constituidos por la norma están representados por los valores de los parámetros de $m = 7$, $k = 2.86 \times 10^{-53} N^{-7} m^{12}$ ($1.365 \times 10^{-29} lb^{-7} in^{12}$), un módulo de elasticidad de 71.7 Gpa (730623 kgf/cm^2) y el espesor mínimo del vidrio, véase Tabla 3.4. Si estos valores se usan para el caso de vidrio recién fabricado, la predicción de los resultados puede ser muy conservadora. Si se desea cambiar la duración asociada a los 3 segundos en que se fundamenta la estimación del factor de LR a otra duración, se pueden usar los factores de duración (F_D) de carga, los cuales se presentan en la Tabla 3.5, esto se logra simplemente con hacer la multiplicación entre los factores. La conversión del factor de duración resulta tener la forma de la siguiente expresión:

$$F_D = \left(\frac{3 \text{ seg}}{\text{Tiempo en seg}} \right)^{1/16} \quad (3.8)$$

Tabla 3.4 Espesor de vidrios nominal y mínimo (norma ASTM E 1300-12a)

Espesor Nominal o designación		Espesor Mínimo	
mm	in	mm	in
2.5	3/32	2.16	0.085
2.7	27/10	2.59	0.102
3	1/8	2.92	0.115
4	5/32	3.78	0.149
5	3/16	4.57	0.18
6	1/4	5.56	0.219
8	5/16	7.42	0.292
10	3/8	9.02	0.355
12	1/2	11.91	0.469
16	5/8	15.09	0.595
19	3/4	18.26	0.719
22	7/8	21.44	0.844
25	1	24.61	0.969

Tabla 3.5 Factores de duración de carga (norma ASTM E 1300-12a)

Duración	Factor
3 s	1
10 s	0.93
60 s	0.83
10 min	0.72
60 min	0.64
12 h	0.55
24 h	0.53
1 semana	0.47
1 mes (30 días)	0.43
1 año	0.36
Más de 1 año	0.31

Capítulo 3 Pruebas y Métodos de Diseño en Vidrio

Las combinaciones de carga para la carga de diseño, q_3 , se pueden llevar a cabo a través de una técnica aproximada para j cargas con diferente duración, todas deben ser consideradas normales a la superficie del vidrio. Para identificar cada carga se usa q_i , y su duración con d_i en segundos, para j cargas. Con la intención de obtener una carga combinada de diseño de 3 segundos de duración:

$$q_3 = \sum_{i=1}^{i=j} q_i \left(\frac{d_i}{3} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.9)$$

donde:

q_3	es la magnitud de carga uniforme de 3 segundos de duración.
q_i	es la magnitud de la carga de duración d_i .
n	es una constante igual a 16 para vidrio recocido.

Otra técnica conservadora para el análisis de los esfuerzos de forma independiente, se obtiene a través del cálculo del esfuerzo máximo en la superficie del panel para apoyos continuos en todos los bordes. El esfuerzo máximo aceptable se relaciona con el área A , la duración de la carga d , y la probabilidad de rotura P_f . Esta técnica además puede ser empleada para extensos casos de diseños especiales de formas de vidrio y cargas que no están cubiertas por la norma. Las formas a las que se refiere son por ejemplo: trapecios, círculos, triángulos y de más formas geométricas. Algunos valores de esfuerzo para una carga de duración de 3 segundos pueden ser de 23.3 Mpa (3380 psi ó 237.43 kgf/cm²) para vidrio recocido, de 46.6 Mpa (6 750 psi ó 474.85 kgf/cm²) para vidrio tratado térmicamente, y de 93.1 Mpa (13 500 psi ó 948.69, kgf/cm²) para vidrio templado. Siguiendo los mismos fundamentos que para el factor NFL , el máximo esfuerzo aceptable se estima con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x, aceptable} = \left(\frac{P_f}{A \cdot k \left(\frac{d}{3} \right)^{\frac{7}{n}}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.10)$$

donde:

$\sigma_{m\acute{a}x, aceptable}$	es el esfuerzo de tensión superficial máximo aceptable.
-----------------------------------	---

P_f	es la probabilidad de falla menor a 0.05 (para NFL se usa 0.8%).
k	es el parámetro de superficie de grieta.
d	es la duración de la carga.
A	es el área de la superficie del vidrio.
n	es una constante que es igual a 16 para vidrio recocido y $m = 7$.

Si empleamos los valores de $P_f = 0.008$, $d = 3 \text{ seg}$ y $A = 1 \text{ m}^2$, en la ecuación 2.10, obtenemos la siguiente expresión,

$$\sigma_{\text{máx, aceptable}} = \left(\frac{0.008}{[1000 \text{ mm}]^2 \cdot (2.87 \times 10^{-17} \text{ N}^{-7} \text{ mm}^{12}) \cdot \left(\frac{3 \text{ seg}}{3 \text{ seg}} \right)^{\frac{7}{16}}} \right)^{\frac{1}{7}} = 16.09 \text{ Mpa},$$

en efecto, el resultado es muy conservador con respecto al valor del valor de 23.3MPa (3380 psi, 237.43 kgf/cm²).

El esfuerzo en bordes, es un aspecto muy importante, ya que de ellos se puede dar el origen de la falla, por lo que la norma establece valores máximos aceptables de esfuerzos de borde según los tipos de vidrio y de borde, esto se puede ver en la Tabla 3.6. En esta tabla se presentan valores que se aplican inclusive para el vidrio cuando no está soportado en uno o más bordes, o sin importar la forma del borde. No obstante, el esfuerzo máximo aceptable de borde para un panel de vidrio se estima de forma aproximada y está asociado a una probabilidad de rotura menor o igual a 0.8%. También se asocia a una carga con duración de 3 segundos.

Tabla 3.6 Esfuerzo aceptable de borde (norma ASTM E 1300-12a)

	Bordes de corte limpio			Bordes unidos			Bordes pulidos		
	Mpa	psi	kgf/cm ²	Mpa	psi	kgf/cm ²	Mpa	psi	kgf/cm ²
ANG	16.6	2400	168.74	18.3	2650	186.31	20	2900	203.89
HTG	No aplica			36.5	5300	372.63	36.5	5300	372.63
FTG	No aplica			73	10600	745.25	73	10600	745.25

Acciones de diseño

Es muy importante estimar la resistencia del vidrio como elemento estructural, así como es igualmente importante poder definir y predecir las acciones de diseño que se espera actúen sobre elementos estructurales de vidrio, ya que de la correcta determinación de estas acciones depende la precisión y seguridad de nuestro diseño. La norma E1300 no propone cómo debe considerar la combinación de acciones (peso propio, viento, nieve, por temperatura y otras) de una forma confiable y razonable en conjunto con el uso de factores de carga y reducción de resistencia asociados a un estado límite de diseño, para con base en esto determinar el valor de la carga uniforme perpendicular al plano de la placa de vidrio que puede resistir (q , ecuación 3.6). Solamente se aclara el tiempo que se debe considerar para la duración de la carga q , el cual debe ser de 3 segundos, y con base en este resultado se compara la carga obtenida directamente con la resistencia (LR). Solamente, la norma incluye una tabla (Tabla 3.5) y una expresión que permite obtener diferentes factores de corrección asociados a diferentes duraciones de carga (ecuación 3.8), además de ofrecer otra expresión (ecuación 3.9) con la que se define la combinación de cargas normales al plano de la placa de vidrio para diferentes duraciones e intensidades. En la misma norma se incluye una serie de ejemplos ilustrativos para el cálculo de la resistencia de diseño para diferentes tipos de vidrio (recocido, termo-endurecido y templado).

Como conclusión, la norma Americana no propone el cálculo de las acciones de diseño, con un modelo para definir apropiadamente las distintas acciones de diseño, tal vez con la intención de que esto sea establecido en una reglamentación adicional, y de esta forma lograr desarrollar una metodología más completa para el ingeniero de la práctica profesional en contraste de las normas de Canadá y Europa.

A continuación se presenta un ejemplo para ilustrar la implementación de los gráficos de *NFL* y el cálculo de *LR*.

Ejemplo:

Determinar el *NFL* asociado con una placa de vidrio monolítico de 1200 mm por 1500 mm y con 6 mm de espesor.

La gráfica apropiada de la norma para estimar el factor *NFL* se muestra en la Figura 3.5 para un espesor de 6 mm. El proceso consiste en entrar en el gráfico por el eje horizontal con 1500 mm y proyectar una línea vertical, después por el eje vertical con 1200 mm y proyectar una línea horizontal, en seguida se traza una línea de aspecto ($\text{largo}/\text{ancho} = 1.25$) constante que atraviese el punto de intersección de las líneas antes trazadas, partiendo del origen del gráfico, seguido de la interpolación del valor del factor *NFL*, para este ejemplo se estima un valor de a 2.5 kPa (0.255 kgf/cm²). Entonces, en la Tabla 3.1 se determina el valor de $GTF = 1$, y sustituyendo estos valores en la ecuación 3.7 se obtiene el valor de $LR = 2.5$. De forma similar para un vidrio templado, corresponde un valor para $NFL = 2.5$ y de $GTF = 4$, por lo que $LR = 2.5 \times 4 = 10$ kPa (0.102 kgf/cm²).

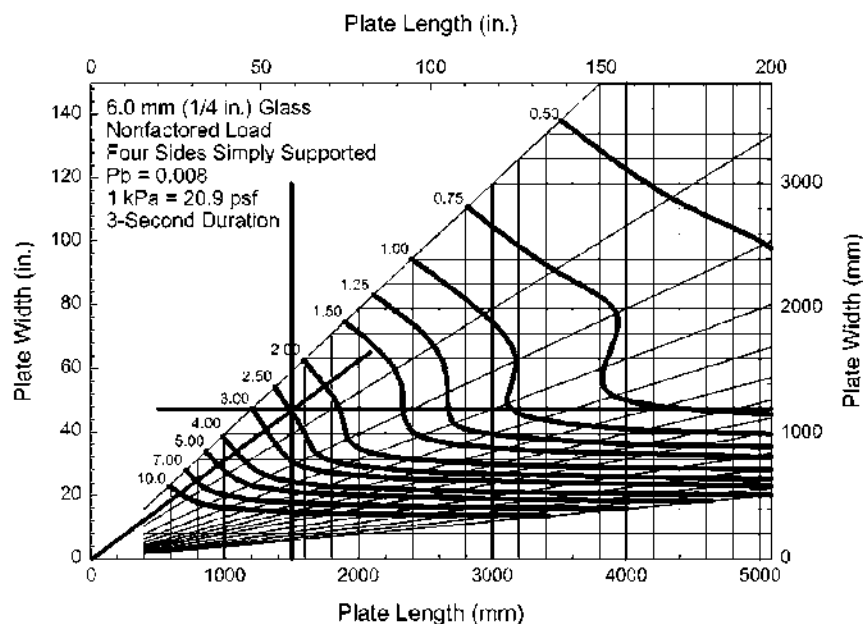


Figura 3.5 Grafico para obtener NFL para vidrio monolítico de 6 mm de espesor.

3.2.3 Norma nacional de Canadá CAN/CGSB 12.20-M89

La norma canadiense CAN/CGSB 12.20-M89 ofrece un método de diseño estructural para elementos de vidrio (sodocálcico de sílice) implementados en la construcción; el método es similar al propuesto en la norma ASTM E1300-12a, sus semejanzas se encuentran al considerar paneles bajo carga lateral uniforme y una probabilidad de falla de $P_f = 0.8\%$, pero con la diferencia de que en esta norma se utiliza una duración de 60 segundos para definir la resistencia, mientras que la norma estadounidense emplea directamente solamente 3 segundos. Otro aspecto importante en el que coinciden las normas es la base teórica, puesto que ambos métodos se fundamentan en el método de MPFV.

La norma CAN/CGSB 12.20-M89 presenta dos escenarios para diseño: uno para casos de diseño comunes y otro para casos de diseño especiales. Para los casos comunes, el diseño se revisa mediante las siguientes expresiones:

$$E_d \leq R_d \quad (3.11)$$

donde, E_d es igual a la combinación de acciones de diseño, incluyéndose los factores parciales, y se define matemáticamente con la siguiente expresión:

$$E_d = \alpha_D D + \gamma \cdot \psi (\alpha_L L + \alpha_Q Q + \alpha_T T) \quad (3.12)$$

R_d es igual a la resistencia de diseño del panel, incluyéndose igualmente los factores parciales, y se define con la siguiente expresión:

$$R_d = R_{ref} (c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4) \quad (3.13)$$

donde:

D	corresponde a las cargas muertas o peso propio y/o la presión hidrostática invariante.
L	corresponde a las cargas vivas por nieve, lluvia, uso u ocupación, y presión hidrostática variable.
Q	corresponde a las cargas vivas por viento, sismos y condiciones climáticas.
T	corresponde a los efectos por temperatura, excepto los ya incluidos en Q .
α_D	es un factor parcial de 1.25 para el caso desfavorable, o 0.85 para el caso favorable.
α_L y α_Q	son factores parcial iguales a 1.50.
α_T	es un factor parcial de 1.25.
γ	es el factor de importancia del edificio (de 0.8 a 1).

El factor de combinación ψ , se define en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Factor de combinación, ψ (considera el efecto de peligro en caso de colapso del edificio) para el efecto más desfavorable (norma CAN/CGSB 12.20-M89).

Casos de carga del tipo L , Q y T :	Valor de ψ
En caso de presentarse todas las cargas combinadas	0.6
En caso de dos tipos de cargas combinadas	0.7
En caso de sólo una carga	1.0

c_1 es el factor del tipo de vidrio: 1.0 para vidrio plano o vidrio laminado, y 0.5 para vidrio tratado superficialmente con chorro de arena, grabado o con malla de vidrio.

c_2 es el factor de tratamiento térmico: 1.0 para vidrio recocido, 2.0 para vidrio termoendurecido, y 4.0 para vidrio totalmente templado.

c_3 es el coeficiente de duración de carga y se define a través de la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Coeficiente de duración de carga C_3 (norma CAN/CGSB 12.20-M89).

Carga	Duración aproximada equivalente	ANG	HSG	FTG
Viento y sismo	1 minuto	1.0	1.0	1.0
Sostenida: nieve y encharcamiento	De 1 semana a un mes	0.5	0.7	0.9
Permanente: peso propio y presión hidrostática	De 1 año a 10 años	0.4	0.6	0.8

c_4 es el coeficiente de carga compartida que para unidades de vidrio aislante toma valores de 1.0, 1.7 y 2.0, respectivamente para vidrio monolítico, de doble acristalamiento y triple acristalamiento.

R_{ref} es la resistencia de referencia factorizada de vidrio, donde sus valores son tabulados dentro de la norma. Los valores de R_{ref} se basan para una duración de carga (60 segundos), en el espesor mínimo admisible y una probabilidad de falla de 0.8%.

En el caso del vidrio laminado, la norma canadiense permite una simplificación a sus cálculos, se puede considerar como vidrio monolítico si cumple con ciertas condiciones especificadas, tales como: si la duración de la carga es menor que un minuto y la temperatura menor que 70 °C, entonces el vidrio laminado se puede modelar como vidrio monolítico. De lo contrario, el vidrio laminado tiene que ser considerado como vidrio estratificado, al tenerse que considerar los efectos de las capas internas de PVB.

Para los casos especiales, el diseño se define por la norma canadiense con recomendaciones adicionales. Estas son de tipo general e inclusive muestran con mayor claridad el origen de los valores tabulados en las ayudas de diseño y de algunos de los factores que se utilizan. Tal es el caso del factor de área definido a través de la siguiente ecuación:

$$R_A = R_{ref} A^{\frac{1}{m}} \quad (3.14)$$

donde:

A	es el área del panel en m ² .
m	se elige un valor en el intervalo de 5 a 7, un valor de 7 es más conservador.

La definición del factor de duración de carga se hace a través de la expresión:

$$R_t = R_{ref} t^{\frac{1}{\eta}} \quad (3.15)$$

donde:

t	es la duración de la carga aplicada en minutos.
η	se elige de uno de los valores siguientes: 15 para <i>ANG</i> , 30 para <i>HSG</i> o 70 para <i>FTG</i> . Donde $\eta = nc$, c es una constante < 1 y n es el parámetro de velocidad de grieta. Es importante aclarar que la norma CAN/CGSB 12.20-M89 no expresa esto en forma explícita.

También, la norma canadiense determina que se usen valores de 25 Mpa (254.75 kgf/cm²) y 20 Mpa (203.8 kgf/cm²) para las tensiones lejos de bordes y en los bordes de corte limpio, respectivamente; estos valores son aplicables para cualquier caso en general. Haldimann (2006)

dedujo que estos valores se deben corregir mediante los factores de las ecuaciones 3.14 y 3.15. Al final, en el apéndice B de la norma canadiense se establece a R_{ref} como:

$$R_{ref} = R_f \left(\frac{t_f}{\eta + 1} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (3.16)$$

donde, R_f es la carga de falla para el tiempo t_f (en minutos). Sin embargo, la ecuación 3.16 debe tratarse de acuerdo a las recomendaciones de Haldimann (2006), lo cual se reduce a:

$$R_{ref} = R_f \left(\frac{t_f}{n + 1} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (3.17)$$

Acciones de diseño

La norma canadiense establece que para definir el valor de la demanda de diseño (E_d), es necesario emplear la ecuación 3.12:

$$E_d = \alpha_D D + \gamma \cdot \psi (\alpha_L L + \alpha_Q Q + \alpha_T T)$$

La ecuación considera la posibilidad de combinar diferentes tipos de carga como son: peso propio (D), viento (L), sismo (Q) y temperatura (T), así como de sus respectivos factores parciales asociados a cada acción: α_D , α_L , α_Q y α_T . También se especifica el factor de importancia debido al grado de ocupación del edificio (γ), y un factor de combinación de carga, ψ . Sin embargo, a pesar de lo anterior, la ecuación propuesta no asocia explícitamente a algún tipo de estado límite (servicio o último). A diferencia de la norma E1300, la norma canadiense señala una duración de 1 minuto para la carga de diseño, E_d . Para definir otras duraciones de carga se debe emplear una serie de factores, como los mostrados en la Tabla 3.8 o a través de la ecuación 3.15. En conclusión con respecto a la norma Canadiense, que a pesar de no estar actualizada, maneja detalles vitales como son el uso de factores parciales definidos para los distintos tipos de acciones, factores de combinación de carga que dependen de la probabilidad de ocurrencia simultánea de un número de acciones combinadas, y de la implementación de un factor de importancia o grado de ocupación.

3.2.4 Método simplista por esfuerzos permisibles

Para el caso de elementos de vidrio, el método por esfuerzos permisibles parece ser una opción simple y de fácil implementación, lo que lo hace muy atractivo para su aplicación. Sin embargo, el hecho de ser excesivamente simple no permite considerar aspectos importantes que influyen directamente en el comportamiento mecánico del vidrio. Es decir, no hay manera de considerar los efectos debidos al tamaño, a condiciones ambientales, a la duración de la carga, o de tomar en cuenta en el diseño del elemento una probabilidad de falla específica. El método se fundamenta en una expresión simple como lo es:

$$\sigma_E \leq \sigma_{permisible} \quad (3.18)$$

donde:

σ_E	es el esfuerzo máximo principal en el plano, calculado para la situación de diseño más desfavorable.
$\sigma_{permisible}$	es el esfuerzo permisible en el plano, el valor se obtiene de manera experimental considerándose un factor de seguridad global, el cual se usa para tomar en cuenta las incertidumbres asociadas con las acciones y las resistencias.

En las normas técnicas alemanas TRLV 1998 y TRAV 2003 se presenta un ejemplo de este método de diseño para diversos valores de esfuerzos permisibles, los cuales corresponden a casos de vidrios expuestos a cargas laterales uniformes y a cargas de impacto (Tabla 3.9). Por otro lado, en las normas se establece una serie de especificaciones para la adecuada combinación de cargas, así como algunos detalles adicionales para esfuerzos admisibles en bordes de vigas de vidrio (Hess, 2000).

Es claro que al implementar este método de diseño para la determinación de la resistencia del vidrio se omiten aspectos de suma importancia de acuerdo a los resultados de la investigación reportados por Haldimann (2006): En este método no se toman en cuenta el comportamiento mecánico real del vidrio, ni mucho menos se puede considerar que un solo factor de seguridad global es capaz de compensar la dispersión e incertidumbre de todas las variables que intervienen en el comportamiento del vidrio. Aunado a que el método se fundamenta en la teoría de pequeños desplazamientos, la cual no es válida al contemplar la no linealidad geométrica.

Tabla 3.9 Esfuerzos permisibles (Mpa) para vidrios bajo carga lateral e impacto de acuerdo a las normas Alemanas.

Tipo de vidrio Posición	Carga lateral uniforme		Carga de impacto
	Vertical	Horizontal	
Vidrio Recocido	18	12	80
Vidrio Termo-endurecido	-	-	120
Vidrio Templado	50	50	170
Vidrio Laminado con paneles de vidrio recocido	22.5	15	-

3.2.5 Método de diseño de carga equivalente de daño y resistencia

El método de diseño de carga equivalente de daño y resistencia (CEDyR), fue propuesto por Sedlacek en 1999 con la intención de explicar el comportamiento de placas de vidrio de una manera clara, que se convertiría después en el proyecto base de la norma europea prEN 13474-1:1999, Sección 3.2.6. El trabajo desarrollado por Sedlacek se basa en una serie de trabajos anteriores importantes como son las investigaciones hechas por GÜSGEN et al. en 1998. Fue el primer método europeo de diseño de vidrio que desarrolló los factores parciales de seguridad dentro de la formulación del método. Después el método se pudo extender también para el caso de vigas de vidrio. De modo que la propuesta considera que el esfuerzo principal máximo de diseño debe ser menor o igual a la resistencia equivalente, como se ve a continuación:

$$\sigma_{max,d} \leq \frac{\sigma_{bB,A_{est},k}}{\alpha_{\sigma}(p, \sigma_v) \alpha(A_{red}) \alpha(t) \alpha(S_v) \gamma_{M,E}} + \frac{\sigma_{V,k}}{\gamma_{M,V}} \quad (3.19)$$

donde:

$\sigma_{max, d}$	es el valor del esfuerzo principal máximo de diseño en el elemento, siguiendo la norma EN 1990-2002.
$\alpha(A_{red})$	es el coeficiente del tamaño del área de la superficie descomprimida o mejor dicho el área en tensión; A_{red} (para vidrio recocido es igual a la totalidad de la superficie).
$\alpha(t)$	es el coeficiente de duración de la carga.
$\alpha(S_v)$	es el coeficiente de combinaciones de cargas y condiciones ambientales.
$\alpha_\sigma(p, \sigma_v)$	es el coeficiente que considera la distribución del esfuerzo sobre la superficie del vidrio; p es la carga lateral uniforme y σ_v es el esfuerzo residual de la superficie del vidrio debido al tratamiento térmico del templado.
$\sigma_{bB, Atest, k}$	es el valor característico de la resistencia a la fractura inherente de flexión dado por las pruebas coaxiales de doble anillo. A partir de un 5%, 0.95 de nivel de confianza, un área de superficie de $A_{Test} = 0.24m^2$ (Sedlacek (1999) uso A_o) y una tasa de esfuerzo igual a 2 ± 0.4 MPa/s.
$\sigma_{V, k}$	es el valor del percentil 5 del valor absoluto del esfuerzo residual de la superficie.
$\gamma_{M, E}$	es el coeficiente parcial para la resistencia inherente.
$\gamma_{M, V}$	es el coeficiente parcial para el esfuerzo residual.

Haldimann (2006) explicó que los coeficientes utilizados para determinar la resistencia por Sedlacek (1999) fueron utilizados para simular las condiciones reales en servicio con los ensayos hechos en laboratorio. Ellos se presentan a continuación a través de una serie de expresiones; la primera de ellas explica la distribución de la tensión no homogénea sobre la superficie del vidrio:

$$\alpha_\sigma(q, \sigma_v) = \left[A_{red}^{-1} \int_{A_{red}} \left(\frac{\sigma_1(x, y)}{\sigma_{máx, d}} \right)^\beta dx dy \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.20)$$

donde, $\beta = 25$, es el parámetro de forma de una distribución Weibull (valor definido por Blank (1993) con muestras de vidrio flotado bajo daño artificial homogéneo sobre la superficie para generar una distribución de límite inferior a los datos de prueba).

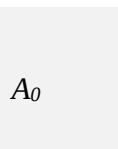
El $\sigma_1(x, y)$ es el esfuerzo principal mayor en el punto con coordenadas (x, y) sobre la superficie.

A partir de un análisis de elementos finitos se puede suponer $\alpha_\sigma = 1.0$ de forma conservadora para los casos normales.

El efecto causado por el tamaño se estima mediante la expresión 3.21:

$$\alpha(A_{red}) = \left(\frac{A_{red}}{A_0} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.21)$$

donde:



es el área, por ejemplo, de una muestra.

Además, Sedlacek (1999) propone la utilización de $\alpha(t) = 3.9$ para condiciones normales y para una vida útil de 50 años del elemento de vidrio.

$\alpha(Sv)$ es el coeficiente de las combinaciones de cargas y condiciones ambientales. Se debe considerar lo siguiente: $n = 16$ para dos diferentes condiciones; una para invierno y otra para verano, con los valores respectivos de: $S_{Invierno} = 0.82 \text{ m/s (MPam}^{0.5})^{-n}$ y $S_{Verano} = 0.45 \text{ m/s (MPam}^{0.5})^{-n}$.

Sedlacek consideró varios aspectos para su método, entre los que se encuentran:

- El crecimiento de grieta subcrítico
- La duración del conjunto de cargas en su combinación
- La probabilidad acumulada de cargas por viento y nieve
- La resistencia a la flexión determinada en los ensayos y la tasa de esfuerzo usado en estas pruebas
- El área de la superficie
- El tiempo de vida requerido

En particular, Sedlacek (1999) extendió un procedimiento de cálculo complejo y difícil de tratar en este documento. Sin embargo, Haldimann (2006) se atrevió a definir el coeficiente de resistencia parcial como:

$$\gamma_{M,E} = \frac{\sigma_{bB, A_{Test,k}}}{\sigma_{bB, A_{Test,d}}} \quad (3.22)$$

De inicio, Haldimann considero que Sedlacek (1999) había determinado el factor de resistencia parcial $\gamma_{M,E}$ aproximadamente como 1.80 para estructuras de importancia media. El valor resultante proviene de asumir dos distribuciones Weibull para distintos tipos de análisis de pruebas. El primer análisis fue un conjunto de especímenes de vidrio flotado en formato R400

prueba coaxial de doble anillo a una tasa de esfuerzo de 2 ± 0.4 MPa/s y un área de prueba de $A_{test} = 2400 \text{ cm}^2$ (95% de nivel de confianza). De la misma forma un segundo conjunto de especímenes se analizó, solamente que las muestras fueron dañadas homogéneamente de manera artificial sobre la superficie. En ambos casos se tomó como base la norma alemana DIN 1249-10:1990.

Del primer caso, obtuvo el numerador de la Ec. 3.22 con un valor de la resistencia inherente de flexión $\sigma_{bB, ATest, k} = 45 \text{ MPa}$ (458.55 kgf/cm²) del percentil 5 de una distribución de Weibull con los parámetros $\theta_{Atest} = 74 \text{ MPa}$ (754.06 kgf/cm²) y $\beta_{test} = 6$.

Del segundo caso, se pudo obtuvo el denominador de la ec. 3.22 con un valor de la resistencia de diseño a flexión de ejemplares dañados $\sigma_{bB, ATest, d} = 24.7 \text{ MPa}$ (251.693 kgf/cm²), esto fue definido como el percentil 0.12 de la distribución Weibull, valor propuesto por Blank en el año de 1993. En esta distribución se asumen los parámetros $\theta_{Atest, límite} = 32 \text{ MPa}$ (326.08 kgf/cm²) y $\beta_{límite} = 25$.

Las ecuaciones que se pueden implementar para el cálculo de los coeficientes en el caso de vigas de vidrio se fundamentan en los siguientes aspectos:

- Debe tomarse en cuenta la resistencia característica a flexión, $\sigma_{bB, Ltest, k}$, con el percentil 5 de la distribución de muestras de viga con longitud descomprimida, L_{test} , igual a 46cm.
- Debe considerarse el mayor esfuerzo principal $\sigma_1(l)$ que depende de la longitud, l .
- Debe tomarse en cuenta la longitud del borde descomprimido de una viga, $\alpha(L_{red})$.
- De acuerdo con Sedlacek(1999), se debe usar $\beta = 5$ para los bordes pulidos y $\beta = 12.5$ para los bordes sin pulir (información obtenida de 11 y 13 muestras respectivamente).
- Al considerar $\beta = 12.5$, el coeficiente parcial para la resistencia inherente es $\gamma M, E \approx 1.40$.
- Para distribuciones de esfuerzo uniforme, parabólica y triangular, el valor de $\alpha_\sigma(q, \sigma_v)_{BZ}$ es 1.0, 0.94 y 0.86, respectivamente.
- El valor del parámetro $\alpha_{BZ}(S_v)$ se obtiene al igual que el del parámetro $\alpha(S_v)$. Por lo que las expresiones resultantes corresponden a:

$$\sigma_{\max, d} \leq \frac{\sigma_{bB, Ltest, k}}{\alpha_\sigma(q, \sigma_v)_{BZ} \alpha(L_{red}) \alpha_{BZ}(t) \alpha_{BZ}(S_v) \gamma_{M, E}} + \frac{\sigma_{v, k}}{\gamma_{M, v}} \quad (3.23)$$

$$\alpha_\sigma(q, \sigma_v)_{BZ} = \left(L_{red}^{-1} \int_{L_{red}} \left(\frac{\sigma_1(l)}{\sigma_{\max, d}} \right)^\beta dl \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.24)$$

$$\alpha(L_{red}) = \left[\frac{L_{red}}{L_{test}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.25)$$

$$\alpha(t) \approx 3.7 \quad (3.26)$$

3.2.6 Norma Europea prEN 13474

El Comité Europeo de Normalización (CEN) publicó de manera oficial la tercera versión del proyecto de norma de diseño prEN 13474-2009 en sus tres únicos idiomas: inglés, francés y alemán. La norma europea prEN 13474-3, establece los principios para la determinación de la resistencia del vidrio ante cargas. Su primera versión se publicó en el año de 1999, y se conoce como EN 13474-1 donde se describe un simple método de cálculo de la resistencia a carga del vidrio implementado como elementos que forman ventanas. En su segunda versión, la norma prEN

13474-2-2000 estableció un método similar al anterior, versión en la que agregaron al método la posibilidad de implementar el vidrio como otro tipo de elementos y no solo en ventanas. En su tercer versión, norma que sigue hasta el momento bajo revisión, la norma prEN 13474-3-2009 da a conocer las propiedades a la resistencia del vidrio, un método general de cálculo para determinar la resistencia a la carga del vidrio y también la determinación de la resistencia a la carga del vidrio por medio de pruebas experimentales. La norma básicamente se trata del método de diseño CEDyR, pero también contiene detalles de los métodos propuestos por Shen y Siebert que, de los cuales se presenta una breve revisión en las siguientes dos secciones. La forma de verificación se hace comparando un esfuerzo efectivo, σ_{ef} , contra un esfuerzo admisible de diseño $f_{g,d}$:

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \quad (3.27)$$

El esfuerzo efectivo, σ_{ef} se determina de acuerdo con la norma prEN 13474-2-2000, considerando los siguientes aspectos: las geometrías más usuales en placas de vidrio (cuadrada, rectangular, circular y triangular), la configuración de los apoyos, y las condiciones de cargas más desfavorables en forma de tablas y ecuaciones para el cálculo del esfuerzo efectivo. De forma generalizada, Haldimann (2006) define el esfuerzo efectivo mediante la expresión:

$$\sigma_{ef} = \sigma_{\max,d} \cdot \alpha_{\sigma}(q) = \left(A^{-1} \int_A (\sigma_1(x,y))^{\beta} dx dy \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.28)$$

donde:

σ_{ef}	es el esfuerzo efectivo expresado en función de la carga aplicada q y de las dimensiones de la placa.
$\sigma_{\max,d}$	es el valor del esfuerzo principal máximo de diseño en el elemento, se obtiene siguiendo la norma EN 1990-2002 o más recientemente en la norma prEN 13474-3.
$\alpha_{\sigma}(q)$	es el coeficiente de vidrio recocido propuesto en el método de diseño CEDyR,
β	es el parámetro de forma de la función de distribución Weibull de la resistencia de rotura.
$\sigma_1(x,y)$	es el esfuerzo principal mayor producto de las acciones en el punto (x,y) sobre la superficie.
A	es el área total de la placa de vidrio (por ejemplo, ancho por altura (ab) para piezas cuadradas).

El esfuerzo permisible $f_{g,d}$ para vidrio recocido, se obtiene con la siguiente expresión:

$$f_{g,d} = \frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (3.29)$$

donde:

$f_{g,k}$	es el valor característico de la resistencia a flexión o resistencia inherente ($f_{g,k} = 45 \text{ N/mm}^2$, valor definido originalmente en la norma alemana DIN 1249-10:1990) en vidrios de composición de silicato sódico o de sílice de boro.
k_{sp}	es el factor para el perfil de la superficie del vidrio (véase Tabla 3.10 para cualquier composición del vidrio).
k_{mod}	es el factor de la duración de la carga para vidrio recocido y se calcula como: $k_{mod} = 0.663t^{\frac{1}{16}} \quad (3.30)$ Donde t es la duración de la carga en horas. En los casos comunes de edificios k_{mod} se puede asumir con un valor máximo y mínimo de 1 y 0.25, respectivamente. Ver la Tabla 3.11 para otros casos.
$\gamma_{M,A}$	es el factor parcial del material para vidrio recocido (véase Tabla 3.12), es el mismo valor que para $\gamma_{M,E}$ del método de CEDyR.

Tabla 3.10 Factor para el perfil de la superficie del vidrio k_{sp} (norma prEN 13474-3)

Material vidrio	Factor k_{sp}
Vidrio flotado	1.0
Vidrio plano estirado	1.0
vidrio flotado esmaltado o plano estirado ¹	1.0
Vidrio estampado	0.75
Vidrio esmaltado estampado ¹	0.75
Vidrio pulido con malla	0.75
vidrio estampado con malla	0.6
Nota 1: Estos tipos de vidrio no están generalmente disponibles como vidrio recocido, pero los valores de k_{sp} también se requieren en las fórmulas para el vidrio pretensado o tratado térmicamente.	

Tabla 3.11 Factor de duración de carga k_{mod} (norma prEN 13474-3)

Acción	Duración de Carga	k_{mod}
Cargas de personas	Corta, única (1 minuto)	0.85
Viento	Corta, múltiple (5 minuto)	0.74
Nieve	Intermedia (1 semana)	0.44
Variación de temperatura diariamente de 11 horas de duración pico extrema	Intermedia	0.57
Variación de presión barométrica	Intermedia	0.50
Variación de la temperatura anual con 6 meses de duración del valor extremo medio	Intermedia	0.39
Carga muerta y peso propio	Permanente	0.29

Tabla 3.12 Valores sugeridos para el factor parcial de material (norma prEN 13474-3)

Tipo	Falla
Vidrio recocido (ANG) ¹	$\gamma_{M,A} = 1.8$
Vidrio con superficie presforzada	$\gamma_{M,v} = 1.2$
Nota 1: El factor parcial del material para vidrio recocido es también aplicable a elementos de vidrio con resistencia de presfuerzo.	

El esfuerzo permisible $f_{g,d}$ para vidrio presforzado, se obtiene con la siguiente expresión:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,v}} \quad (3.31)$$

Si agregamos a $f_{g,d}$ de una forma explícita, el factor de efecto por tamaño que se define por la ecuación 3.31 se convierte en:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A} \cdot k_{A,Wb}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,v}} \quad (3.32)$$

donde:

k_{mod}	es el factor de duración de carga que se describió en la Tabla 3.11.
$\gamma_{M,A}$ y $\gamma_{M,v}$	son los factores parciales: de resistencia inherente y de resistencia por presfuerzo de la superficie, respectivamente (véase Tabla 3.12).
k_{sp}	es el factor para el perfil de la superficie del vidrio (véase Tabla 3.10).
$f_{g,k}$	ya fue descrito anteriormente para el caso de vidrio recocido, es el valor característico de la resistencia a flexión o resistencia inherente.
$f_{b,k}$	es el valor característico de la resistencia a flexión de vidrio presforzado en la superficie, percentil 5, (véase Tabla 3.13).
$f_{b,k} - f_{g,k}$	es la resistencia a la rotura adicional que aporta un vidrio con superficie comprimida; es decir, éste vale cero cuando el vidrio es recocido para dar la ec. 3.29.
k_v	es el factor de fortalecimiento. Empleado para considerar la eficacia del presforzado en el proceso de fabricación, véase Tabla 3.14.

Tabla 3.13 Valores de resistencia característica y factores de fortalecimiento de vidrio presforzado $f_{b,k}$ (norma prEN 13474-3).

Producto de vidrio	Los Valores de Resistencia a la Flexión Característica $f_{b,k}$ para el Vidrio Presforzado de Procesos de:		
	Vidrio de seguridad templado térmicamente	Vidrio termo-endurecido	Vidrio endurecido químicamente
Vidrio flotado o vidrio plano estirado	120 N/mm ²	70 N/mm ²	150 N/mm ²
Vidrio estampado	90 N/mm ²	55 N/mm ²	150 N/mm ²
Vidrio flotado esmaltado o plano estirado	75 N/mm ²	45 N/mm ²	
Vidrio esmaltado estampado	75 N/mm ²	45 N/mm ²	

Tabla 3.14 Factor de fortalecimiento k_v (norma prEN 13474-3).

Proceso de fabricación	Factor de fortalecimiento, k_v
Endurecimiento horizontal (u otro proceso sin el uso de pinzas u otros dispositivos para sostener el vidrio)	1.0
Endurecimiento vertical (u otro proceso utilizando pinzas u otros dispositivos para sujetar el vidrio)	0.6

Si comparamos al método de diseño CEDyR con el método presentado por la norma prEN-13474-3, notaremos algunas de las siguientes modificaciones:

$\alpha(t)$ y $\alpha(S_v)$ se omiten del método de CEDyR por el factor k_{mod} por parte de la norma prEN-13474-3, al asumir de forma implícita pocos valores tabulados de k_{mod} .

La norma prEN-13474-3 sustituyo a $\alpha(A_{red})$ por k_A . Donde k_A , es un coeficiente para tomar en cuenta el área superficial. De modo que se pueda emplear la siguiente expresión:

$$k_A = (A)^{0.04} \quad (3.33)$$

A es el área de la superficie total de la placa de vidrio.

Al observar detalladamente las modificaciones hechas en la norma prEN 13474-3, se concluye que no se pueden o deben comparar los coeficientes parciales con el método CEDyR. Otro aspecto importante de consideración con respecto de la ecuación 3.27, es que la distribución del esfuerzo en la superficie del vidrio se contabiliza del lado de las acciones, y el esfuerzo residual de vidrios procesados térmicamente o químicamente del lado de la resistencia.

Acciones de diseño

La norma europea prEN 13474-3, estipula que la demanda está definida por un esfuerzo máximo de flexión de diseño en la ecuación 3.28:

$$\sigma_{\text{máx,d}} = k_1 \frac{A}{h^2} F_d$$

donde,

A	Es el área de la placa, igual al largo por ancho, $b \times a$.
h	Es el espesor de la placa.

	Es un coeficiente que se estima mediante:
	$k_1 = \frac{1}{4 \left[\frac{1}{z_2^2} + \frac{p^{*2}}{z_3^2 + (z_4 \cdot p^*)^2} \right]^{0.5}}$
k_1	donde $z_2 = 24 \cdot \lambda \left[0.0447 + 0.0803 \left(1 - e^{\left(-1.17 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1.073} \right)} \right) \right]$ $\lambda = \frac{a}{b}, \quad b > a$ $p^* = \left(\frac{A}{4h^2} \right)^2 \frac{F_d}{E} \quad \text{carga adimensional}$ $z_3 = 4.5 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^2 + 4.5$ $z_4 = 0.585 - 0.05 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)$
F_d	es el valor de diseño de la combinación de acciones: Para obtener la acción de diseño F_d se tiene que hacer uso de las siguientes dos expresiones: Estado límite último $F_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \gamma_Q \sum_i \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$ Estado límite de servicio $F_d = G + \psi_1 \cdot Q_{k,1} + \gamma_Q \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
	donde,
G	es el valor de las acciones permanentes (peso propio y equipo permanente).
$Q_{k,1}$	es el valor característico de la acción variable (principalmente viento y nieve).
$Q_{k,i}$	es el valor característico de la acción variable acompañada (viento o nieve).
$\psi_{0,i}$	son factores de combinación para la acción variable acompañada.
ψ_1	es el factor para valor frecuente de una acción variable.
$\psi_{2,i}$	es el factor para cuasi-permanente valor de una acción variable.

γ_G	es el factor parcial para acciones permanentes.
γ_Q	es el factor parcial para acciones variables.

Los valores de cada uno de los factores son definidos en las Tablas 3.15 y 3.16.

Tabla 3.15 Factores parciales de carga (norma prEn 13474-3).

Tipo de elemento a diseñar	γ_Q	$\gamma_G^{(3)}$	
		Favorable	Desfavorable
Estructura principal ⁽¹⁾	Ver Eurocódigos	Ver Eurocódigos	Ver Eurocódigos
Estructura secundaria ⁽¹⁾	1.3	1.0	1.2
Panel ⁽²⁾	1.1	1.0	1.1

Notas.

- (1) Construcción estructural cubierta por Eurocódigos
- (2) Elemento no estructural no cubierto por Eurocódigos
- (3) El valor más bajo es usado cuando la acción permanente tiene un efecto favorable en combinación con otras acciones. El valor más alto se utiliza cuando la acción permanente se considera acción sola o tiene un efecto desfavorable en combinación con otras cargas.

Tabla 3.16 Factores ψ (norma prEn 13474-3).

		Estructura principal ⁽¹⁾	Estructura secundaria ⁽¹⁾	Panel ⁽²⁾
viento	ψ_0	Ver Eurocódigos	0.6	0.6
	ψ_1	Ver Eurocódigos	0.9	0.9
	ψ_2	Ver Eurocódigos	0.2	0.2
Nieve	ψ_0	Ver Eurocódigos	0.6	0.6
	ψ_1	Ver Eurocódigos	1.0	1.0
	ψ_2	Ver Eurocódigos	0.2	0.2
Otra	ψ_0	Ver Eurocódigos		
	ψ_1			
	ψ_2			

Notas.

- (1) Construcción estructural incluida en el Eurocódigo
- (2) Elemento no estructural no incluida en el Eurocódigo

En la norma EN 13474-2 se presentan ejemplos del cálculo de la carga de diseño.

Como se ha podido observar hasta ahora con respecto a las normas anteriores referidas, estas definen en general la carga de diseño que debería ser calculada para el dimensionamiento del espesor de los elementos estructurales de vidrio. El modelo más completo para la determinación de la carga de diseño, corresponde a la norma europea, ya que esta trata de considerar el comportamiento de cada una de las acciones involucradas en el diseño, mediante factores que relacionan la combinación de cargas, y de factores parciales que representan el grado de variabilidad y de frecuencia de la acción considerada en el diseño. Otro aspecto sobresaliente, es la forma en que se establecen desde el inicio los estados límites de servicio y último, que son esenciales para el buen desempeño de los elemento de vidrio durante su vida útil, y que son

congruentes con las filosofías de diseño actualmente implementadas para elementos estructurales de otro tipo de materiales como el acero y el concreto reforzado

3.2.7 Método de diseño de Shen

El método de diseño de Shen surgió en el año de 1997 y se aplica únicamente a paneles de vidrio recocido o templado con apoyo lateral continuo a lo largo de todos los bordes ante carga lateral. Algunos años después, el método de Shen fue adecuado de acuerdo a la norma europea EN 1990:2002 por Wörner et al. (2001). Esta propuesta se considera como un método simplista del método de CEDyR. Con base en ello, la ecuación de diseño propuesta por Shen define que cada acción de diferente duración debe ser menor o igual a la resistencia, a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_{\max,d} \leq \frac{\sigma_k \cdot \eta_F \cdot \eta_D}{\gamma_R} \quad (3.34)$$

donde:

$\sigma_{\max,d}$	es el esfuerzo principal máximo de diseño.
σ_k	es el valor característico de la resistencia a flexión (determinada con la prueba coaxial de doble anillo, R400).
η_F	es un factor para considerar la distribución de esfuerzos y el área de la superficie (ver la Tabla 3.15).
η_D	es un factor para considerar la duración de carga (véase Tabla 3.16).
γ_R	es el factor parcial de resistencia.

Los dos coeficientes η_F y η_D que están del lado de la resistencia de la ecuación 3.34, se determinan de una forma muy simple descrita en las Tablas 3.17 y 3.18. Con respecto al factor de duración de carga, η_D , se observa que este depende del tipo de vidrio. Además, al aceptar estos coeficientes se asumen las condiciones ambientales y de superficie bajo las cuales se hicieron las pruebas de laboratorio para la determinación de la resistencia a flexión. Bajo esta consideración, se tiene:

$$\eta_D = \frac{\sigma_D}{\sigma_R} = \left(\frac{1}{n+1} \cdot \frac{t_R}{t_D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.35)$$

donde:

σ_D	es la resistencia equivalente.
σ_R	es la resistencia a la flexión resultado de las pruebas de laboratorio.
t_R	es la duración de la prueba.
t_D	es la duración de carga.
n	es el parámetro de velocidad de grieta ($n \approx 17$ para vidrio recocido y $n = 70$ para vidrio templado, el valor de $n = 70$ suele ser un valor irreal de acuerdo con los resultados presentados por Haldimann, 2006).

Tabla 3.17 Factor η_F (Haldimann, M., 2006).

Tipo de vidrio	$A = 0.5$ a 4.0 m^2	$A = 4.0$ a 10 m^2
Vidrio recocido	1.0	0.9
Vidrio templado	1.0	1.0

Tabla 3.18 Factor η_D (Haldimann, M., 2006).

Tipo de vidrio	Carga muerta (50 años)	Nieve (30 días)	Viento (10 minutos)
Vidrio recocido	0.27	0.45	0.69
Vidrio templado	0.74	0.83	1.00

El factor de duración de la prueba, t_R , se determina a partir de los valores de las pruebas de resistencia a la flexión de acuerdo con la norma DIN 1249-10:1990, estos ensayos son hechos bajo una tasa de esfuerzo (TE) de $2 \text{ MPa} / \text{s}$. Por lo que para vidrio recocido: $t_R = 45 \text{ MPa} / \text{TE} = 22.5$ segundos, y que para vidrio templado: $t_R = 120 \text{ MPa} / \text{TE} = 60$ segundos.

Shen (1997) propone un valor de $\gamma_R \approx 1.25$ considerando que el coeficiente de variación es igual a 0.1 debido a los datos de la resistencia a la flexión. Él también propone un método para combinar cargas de viento y nieve para el caso de las acciones de diseño, que no será mostrado aquí.

3.2.8 Método de diseño de Siebert

En 1999 Siebert elaboró y presentó su propio método. Mediante la modificación e inclusión de varios aspectos en los métodos de diseño descritos en los párrafos anteriores. De donde consideró apropiado establecer un concepto de campo de esfuerzos biaxial, al darse cuenta que con las pruebas coaxiales de doble anillo se podían determinar estos esfuerzos. Además, incluyó un concepto especialmente importante para los vidrios tratados térmicamente, que es tomar en cuenta su resistencia adicional del lado de las acciones, y no del lado de la resistencia. Con la incorporación de estas nuevas consideraciones Siebert desarrolló la expresión siguiente:

$$\sigma_{ges,m\acute{a}x} \cdot f_A \cdot f_{\sigma} \cdot f_{tS} \leq \frac{\theta}{f_P} \quad (3.36)$$

donde:

$\sigma_{ges, d, max}$	es el esfuerzo principal máximo en la superficie; $\sigma_{ges, d, max} = \sigma_{d, max} + \sigma_E$
$\sigma_{d, máx}$	es el esfuerzo principal máximo debido a las acciones de diseño. Se calcula de igual manera que en el método de CEDyR.
σ_E	es el esfuerzo residual o de presfuerzo en la superficie (compresión con signo negativo)
f_A	es el factor que considera las diferencias entre áreas superficiales en tensión, debidas a una muestra de ensayo y un elemento estructural real, y es igual a $\alpha(A)$ del método de diseño de CEDyR.
f_{σ}	es el factor que considera las diferencias entre las distribuciones de los esfuerzos, debidas a una muestra de ensayo y un elemento estructural real, esta depende de la acción del esfuerzo residual o de presfuerzo.
f_{tS}	es el factor que considera la duración de la carga, la combinación entre diferentes magnitudes de cargas y las condiciones ambientales. De forma similar al producto de los factores de $\alpha(t)$ y $\alpha(Sv)$ del método de diseño de CEDyR.
θ	es el parámetro de escala de la distribución de Weibull, proveniente de la estadística de los datos experimentales de resistencia a la flexión.
f_P	es el factor que considera una probabilidad de falla seleccionada y que se determina con la siguiente expresión: $f_P = \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G_a} \right) \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (3.37)$ donde: G_a, es la probabilidad objetivo, y β es el parámetro de forma de la distribución Weibull, el cual se estima de los datos experimentales.

El trabajo experimental desarrollado por Siebert corresponde al tipo de pruebas coaxiales de doble anillo, descritos en la norma europea EN 1288-2:2000. A sí mismo, el proceso estadístico de los datos obtenidos lo realizó de acuerdo a lo estipulado en la norma DIN 55303-7:1996.

3.2.9 Método de diseño de Matthias Haldimann

M. Haldimann en el año 2006 presentó el modelo de predicción de vida útil (Lifetime Prediction Model, siglas en inglés), desde luego aplicable a elementos de vidrio. Haldimann (2006) antes de presentar esta metodología tuvo que estudiar la mayor parte de los métodos más reconocidos por Heriberto Puga Juárez

el campo científico de aquellos días. Fue entonces que con la revisión de cada uno de los métodos, pudo entender la forma de ordenar la propuesta de su modelo, trabajo realizado mediante una tesis doctoral. A lo largo de la investigación se dio cuenta de que las derivaciones en los modelos no eran claras, y que algunos aspectos no eran válidos; lo que atribuyó a la combinación de los modelos físicos con enfoques empíricos y a las simplificaciones asumidas. Otro aspecto que criticó, fue la mala influencia de los parámetros en los modelos, puesto que estos no reflejaban la influencia física supuesta para el modelo, además de que dependían de la configuración adoptada en los ensayos. Más aún, Haldimann (2006) mencionó las limitaciones principales de los métodos de diseño considerados, entre las cuales se tienen:

- Se asume una sola condición de la superficie, donde los parámetros de diseño no pueden ser modificados para representar otro tipo de escenario de daño de la superficie; por ejemplo: vandalismo, impacto accidental, limpieza, etcétera.
- Inconsistencia de resultados para casos especiales y diferencias de resultados entre métodos.

Por lo que se enfocó en agregar los siguientes aspectos a su metodología de diseño estructural de elementos de vidrio con la intención de desarrollar un método más confiable:

- Debe existir coherencia y claridad en la formulación del método.
- Debe existir precisión y flexibilidad.
- Deben ser los parámetros representativos de aspectos físicos e independientes de los ensayos experimentales.
- Debe considerarse la información proveniente de las medidas del control de calidad e investigación, para así mismo, lograr que el diseño pueda ser menos conservador.

Cuando se presentó éste método fue entonces que por primera vez se contaba con un método de diseño generalizado, es decir, aplicable a cualquier tipo de elemento de vidrio, tales como: vigas, columnas y placas sin importar el tamaño, su forma y condición de carga. Sin embargo, el Método de Predicción de Vida Útil (MPVÚ) asume ciertas simplificaciones cuando se plantean las ecuaciones de diseño, con la intención de no hacer difícil su implementación en la práctica profesional. El método de MPVÚ presenta dos casos que pueden gobernar el proceso de diseño:

- Caso 1: cuando el diseño está gobernado por una fisura sobre la superficie (IFS)
- Caso 2: cuando el diseño está gobernado por varias fisuras con localización aleatoria sobre la superficie (VFAS).

De modo que para el caso 1 (IFS) las ecuaciones que permiten estimar la resistencia son:

$$\sigma_{t_0} \leq \sigma_{R,t_0} \quad (3.38)$$

$$\sigma_{R,t_0} = \left(\frac{2}{a_i^{(n-2)/2} \cdot (n-2) \cdot t_0 \cdot v_0 \cdot (Y\sqrt{\pi})^n K_{Ic}^{-n}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.39)$$

$$\sigma_{t_0} = \left(\frac{1}{t_0} \int_0^T \sigma^n(\tau) d\tau \right)^{\frac{1}{n}} \approx \left(\frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^J \sigma_{ij}^n \cdot t_j \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.40)$$

donde:

σ_{t_0}	es el esfuerzo estático equivalente t_0 .
σ_{R,t_0}	es la resistencia equivalente t_0 .
a_i	es la profundidad de grieta inicial.
n	es el parámetro de la velocidad de grieta.
t_0	se refiere al periodo de tiempo ($t_0 = 1 \text{ seg}$, $t_0 = 3 \text{ seg}$ ó $t_0 = 60 \text{ seg}$).
T	tiempo final comenzado en $t = 0$.
v_0	parámetro de velocidad de grieta lineal
Y	es un factor de corrección o factor de geometría de la fisura.
K_{Ic}	es el factor de intensidad de esfuerzo crítico

Dicho de otra forma, el modelo de 1FS, es aceptable en el diseño si no se alcanza la fisura crítica de falla durante la vida útil del elemento de vidrio.

Para el Caso 2 (VFAS) las ecuaciones propuestas son:

$$\bar{\sigma} < f_0 \quad (3.41)$$

$$f_0 = \left[-\ln(1 - P_{f,t}) \right]^{\frac{1}{\bar{m}}} \cdot \left(\frac{t_0}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right)^{-\frac{1}{n}} = f_{0, \text{inerte}}^{\frac{(n-2)}{2}} \cdot \left(\frac{U}{t_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.42)$$

f_0	se refiere a la resistencia ambiental.
$P_{f,t}$	es la probabilidad de falla objetivo. Significa probabilidad de falla de un elemento de vidrio con área de $A_0 = 1 \text{ m}^2$ que es expuesto a una distribución uniforme de esfuerzos de grieta abierta f_0 para $t_0 = 1$ segundo en condiciones ambientales.
$\bar{m}$	según sea el caso de $\bar{m} = \begin{cases} \frac{n \cdot m_0}{n-2} & \text{en condiciones ambientales} \\ m_0 & \text{en condiciones inertes} \end{cases}$
θ_0	es el parámetro de las fisuras de superficie.
n	es el parámetro de la velocidad de grieta.
$f_{0, \text{inerte}}$	es la resistencia inerte que depende de la probabilidad de falla objetivo y los parámetros de las condiciones de superficie: $f_{0, \text{inerte}} = \left[-\ln(1 - P_{f,t}) \right]^{\frac{1}{m_0}}$
t_0	se refiere al periodo de tiempo de $t_0 = 1 \text{ seg}$.
U	es el coeficiente que relaciona la mecánica de la fractura y parámetros de la velocidad de grieta (n y v_0).

Además:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma} &= \left(\frac{1}{A_0} \int_0^T \sigma_{1,t_0}^{\bar{m}} dA \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \approx \left(\frac{1}{A_0} \sum_i [A_i \cdot \sigma_{1,t_0,i}^{\bar{m}}] \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \\ \sigma_{1,t_0,i} &= \left(\frac{1}{t_0} \int_0^T \sigma_{1,i}^n d\tau \right)^{\frac{1}{n}} \approx \left(\frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^J [\sigma_{1,\tau_j,i}^n \cdot \tau_j] \right)^{\frac{1}{n}}\end{aligned}\quad (3.43)$$

$\bar{\sigma}$	es el esfuerzo de referencia ambiental
A_0	$= 1 \text{ m}^2$
$\bar{m}$	descrito en la ecuación 3.42.
n	es el parámetro de la velocidad de grieta.
t_0	se refiere al periodo de tiempo de $t_0 = 1 \text{ seg.}$
T	Tiempo final comenzado en $t = 0$.

Se puede simplificar aún más $\bar{\sigma}$ en el caso de existir proporcionalidad entre el esfuerzo principal mayor y la carga en todos los puntos de la superficie del vidrio y durante todo el historial de carga, y si el área de la superficie a tensión es constante.

$$\begin{aligned}\bar{\sigma} &= \mathbb{X}_{t_0} \left(\frac{\bar{A}}{A_0} \right)^{1/\bar{m}} \\ \bar{A} &= \int_A c(\vec{r})^{\bar{m}} dA \approx \sum_i A_i c_i^{\bar{m}} \\ \mathbb{X}_{t_0} &= \left(\frac{1}{t_0} \int_0^T \mathbb{X}^n(\tau) d\tau \right)^{\frac{1}{n}} \approx \left(\frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^J \mathbb{X}_{t_j}^n \cdot t_j \right)^{\frac{1}{n}} \\ \mathbb{X} &= \begin{cases} \bar{\sigma} & \text{para esfuerzos} \\ q & \text{para cargas} \end{cases}\end{aligned}\quad (3.44)$$

$\bar{A}$	es el área equivalente y se puede definir para condiciones ambientales o inertes.
τ	instante en el tiempo.
c	es una función de distribución de esfuerzos

La probabilidad de falla del elemento estructural durante su periodo de vida útil, se acepta como correcta para el modelo de VFAS si es menor o igual a la probabilidad de falla objetivo P_{ft} .

Las expresiones 3.38 y 3.41 son esenciales para el diseño estructural de elementos de vidrio, sin embargo, cuando se requiere de interpretar información producto de pruebas de laboratorio, se hace necesario presentar las ecuaciones de la siguiente forma.

Para el modelo de predicción de IFS la ecuación resultante es:

$$\tilde{a}_c(\tau) = \left[\left(\frac{\sigma_n(\tau) \cdot Y \sqrt{\pi}}{K_{Ic}} \right)^{n-2} + \frac{n-2}{2} \cdot v_0 \cdot K_{Ic}^{-n} (Y \sqrt{\pi})^n \cdot \int_0^\tau \sigma_n^n(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau} \right]^{\frac{2}{2-n}} \quad (3.45)$$

$\tilde{a}_c(\tau)$	es la profundidad inicial de una fisura de falla en un instante de tiempo τ , periodo donde se estuvo expuesta a una historia de esfuerzos de tensión, σ_n^n .
v_0 y n	son los parámetros de velocidad de grieta.
K_{Ic}	es el factor crítico de intensidad del esfuerzo.
Y	es un factor de corrección o factor de geometría.

Para el modelo de predicción de VFAS la ecuación generalizada a emplear es:

$$P_f(t) = 1 - e^{-\left\{ \frac{1}{A_0} \int_A \frac{2}{\pi} \int_{\varphi=0}^{\frac{\pi}{2}} \max_{\tau \in [0, t]} \left\{ \left(\frac{\sigma_n(\tau, \bar{r}, \varphi)}{\theta_0} \right)^{n-2} + \frac{\int_0^{\tau} \sigma_n^n(\tilde{\tau}, \bar{r}, \varphi) d\tilde{\tau}}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right\}^{\frac{1}{n-2}} \right\}^{m_0} dAd\varphi \right\}} \quad (3.46)$$

donde:

P_f	es la probabilidad de falla para elementos de vidrio: el fenómeno de crecimiento subcrítico de grieta, un campo de esfuerzos biaxiales no homogéneos que varían en el tiempo, arbitraria geometría y arbitraria historia de esfuerzos son considerados.
A_0	es la superficie unitaria ($A_0=1 \text{ m}^2$)
A	es el área superficial del elemento de vidrio (considerando ambas caras)
t	instante en el tiempo.
$\sigma_n(\tau, \bar{r}, \varphi)$	es la componente normal de esfuerzos para una grieta de orientación φ en el punto $\vec{r}(x, y)$ en la superficie y en el tiempo τ .
θ_0 y m_0	Son los parámetros de las condiciones de superficie, determinados experimentalmente. θ_0 tiene unidades de esfuerzo y m_0 es adimensional.
U	es el coeficiente que relaciona la mecánica de la fractura y el crecimiento subcrítico de grieta: $U = \frac{2K_{Ic}^2}{(n-2) \cdot v_0 \cdot Y^2 \pi} \quad (\text{unidades: esfuerzo}^2 \cdot \text{tiempo})$
K_{Ic}	es el factor crítico de intensidad del esfuerzo.
Y	es un factor de corrección o factor de geometría.
v_0 y n	son los parámetros de velocidad de grieta.

Si se desea conocer más detalles tanto del método como de la derivación de la ecuación 3.46, se puede consultar el Capítulo 5 de la referencia de Haldimann, M., 2006.

Modelo de Predicción de Vida Útil

4.1 Fisuras o defectos de una superficie de vidrio

Los métodos que actualmente se utilizan para estimar la resistencia del vidrio se fundamentan en la mecánica de la fractura; por ejemplo, las ecuaciones presentadas en la sección 4.2 de este capítulo son la base de los métodos propuestos por Griffith (1920), Irwin (1957), Porter (2001), Khorasani (2004), Haldimann (2006) y Lindqvist (2013). En estos métodos las ecuaciones empleadas para definir el comportamiento de las fisuras encontradas en la superficie y en los bordes de un vidrio, se idealizan y se simplifican matemáticamente para evitar la gran complejidad del modelado; sin embargo, en investigaciones recientes se ha logrado obtener imágenes microscópicas detalladas de las características reales de las condiciones que presenta el vidrio, en donde nos podemos dar cuenta inmediatamente de la dificultad de la idealización de una fisura, y aún más para medir sus características geométricas (Figura 4.1).

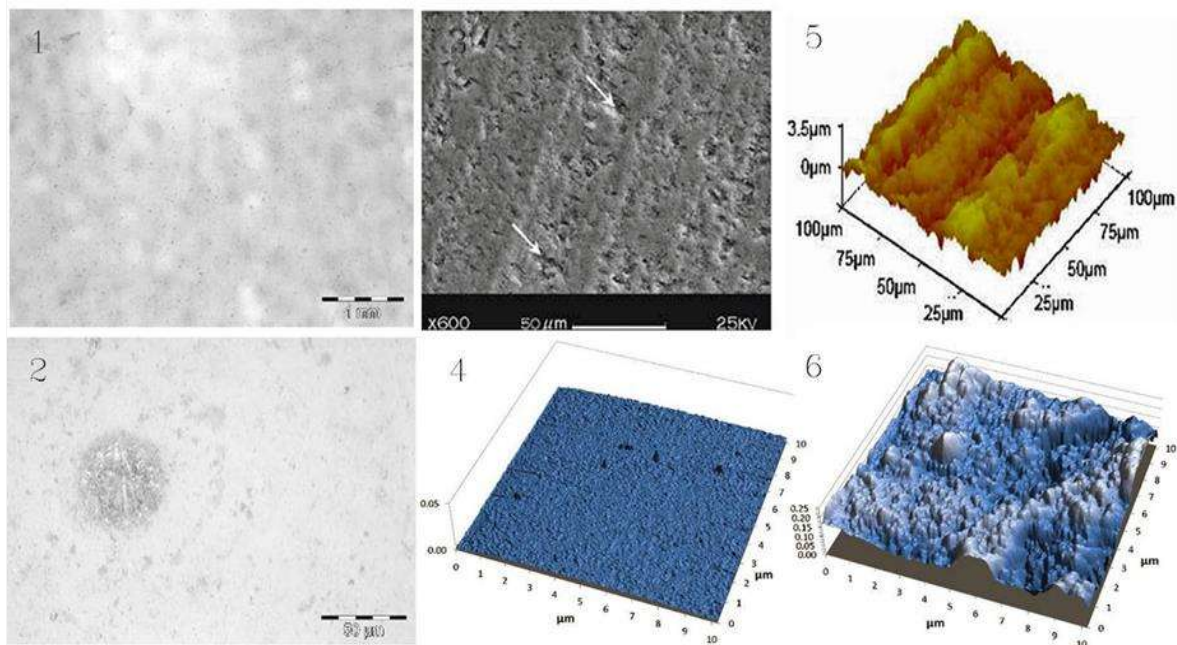


Figura 4.1 Observaciones microscópicas de distintas superficies del vidrio:

1-2) Imágenes en el de microscopio óptico de una superficie externa de un vidrio intemperizado. ++

3 y 5) Imágenes de la morfología de la superficie de un vidrio bañado con arena. +

4 y 6) Vista 3D de vidrio intemperizado, con superficie interna (4) y externa (6). ++

+ (Imagen tomada de Nie, X. y Chen, W. W., 2009).

++ (Imágenes tomadas de Zammit, K. y Overend, M., 2009).

Las fisuras microscópicas mostradas en la Figura 4.1 tienen una influencia importante en la resistencia de un elemento de vidrio, por lo tanto estas se idealizan para estudiar su

comportamiento mediante la mecánica de la fractura, y otras veces para considerarlas dentro de un modelo probabilístico, ya que los parámetros geométricos que caracterizan a las fisuras que se encuentran en un vidrio son muy difíciles de determinar, quedando estas en muchas ocasiones imperceptibles al ojo humano, obligando a que la profundidad, longitud, orientación y número de grietas sean tratadas como variables aleatorias, este tema se discutirá con mayor detalle en la Sección 4.5.

4.2 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura elástica (MFE) es una rama de la mecánica de sólidos deformables. Esta área suele ser la respuesta idónea para el estudio del comportamiento de fisuras que se presentan en un elemento de vidrio, así como para la modelación de su resistencia. Sin embargo, se deben complementar otras disciplinas de la ingeniería con los estudios de la mecánica de la fractura y de la ciencia de los materiales para tratar de predecir la resistencia del vidrio ante diferentes estados de esfuerzo. Varios de estos aspectos se comentan a lo largo de este capítulo.

Comencemos por entender que el valor de la resistencia a la fractura de un elemento depende originalmente de aquella fisura que inicia la fractura, a este concepto se le conoce como fisura crítica.

Griffith (1920) fue uno de los primeros investigadores quien tuvo que lidiar con el problema de fragilidad del vidrio, con base a la fisura crítica, Griffith formuló una ecuación (4.1) que permite estimar el esfuerzo que lleva está a condición de falla crítica, su trabajo se fundamenta en un concepto del balance energético.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a_c}} \quad (4.1)$$

donde,

σ_f es el esfuerzo de falla.

a_c es la longitud de la grieta o fisura crítica.

E es el módulo de elasticidad.

γ Es la energía de la superficie fracturada, $\gamma = 3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$.

Posteriormente en 1957, Irwin modifica la ecuación 4.1, en su propuesta incluyó el concepto del factor de intensidad de esfuerzo K_I , el cual representa el esfuerzo en la punta de la fisura para el modo de falla I, apertura de la fisura debido a esfuerzos de tensión como se puede observar en la Figura 4.2a. Los otros dos modos de falla no son tratados en este trabajo, y corresponden a las Figuras 4.2b y 4.2c, para detalles de estos se recomienda consultar el trabajo de Wang (1996). El comportamiento de K_I se describe mediante la siguiente ecuación:

$$K_I = Y\sigma_n\sqrt{a\pi} \quad (4.2)$$

donde,

σ_n es el esfuerzo de tensión nominal normal al plano de la grieta.

Capítulo 4 Modelo de Predicción de Vida Útil

Y	es el factor de geometría de la fisura, $Y = 1.12$ para una fisura contenida en un cuerpo semi-infinito, véase Figura 4.2d.
a	Es un parámetro que puede ser la profundidad o un medio de la longitud de la fisura. En nuestro caso nos referiremos a que este término corresponde a la profundidad de una grieta.

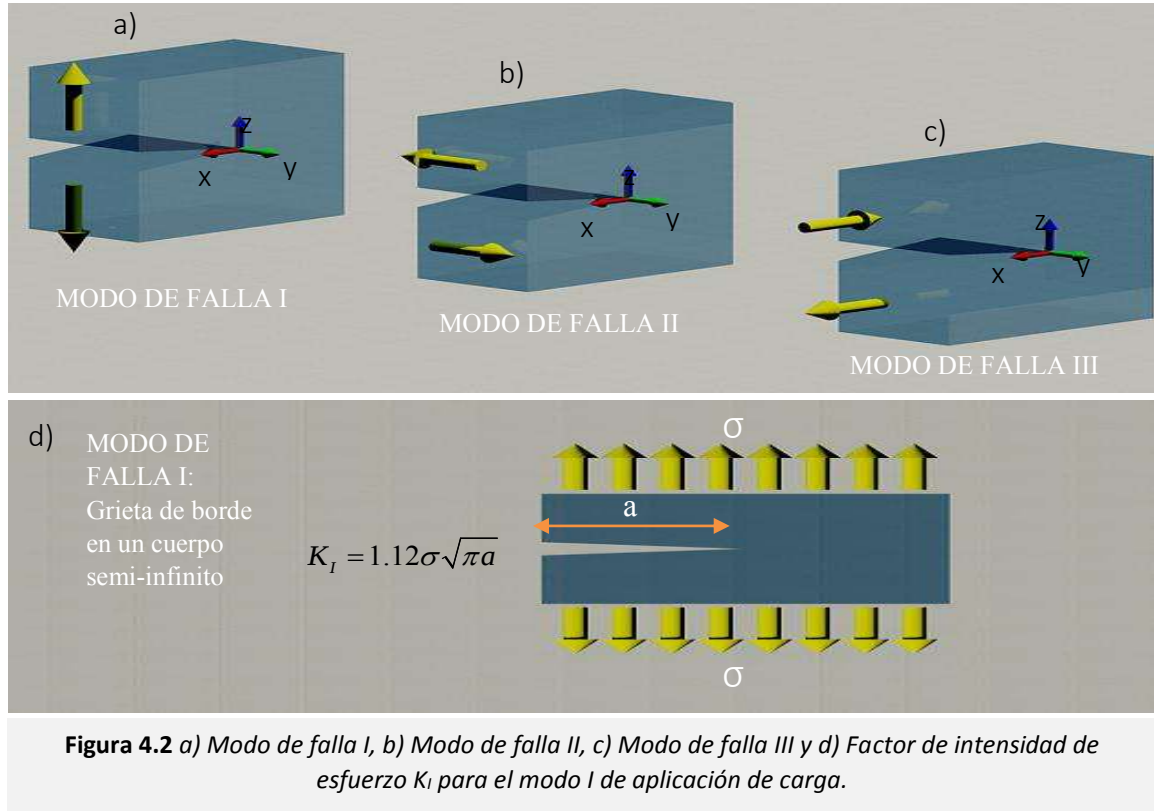


Figura 4.2 a) Modo de falla I, b) Modo de falla II, c) Modo de falla III y d) Factor de intensidad de esfuerzo K_I para el modo I de aplicación de carga.

Con el factor de intensidad de esfuerzo elástico K_I , se puede establecer bajo un criterio de falla más claro y capaz de precisar el instante de la falla de un elemento de vidrio. Esto ya se sabía de antemano por una simple comparación entre un esfuerzo de tensión ocurrido en la punta de una fisura, K_I , y el esfuerzo crítico K_{IC} , de esta forma el criterio de falla se establece como:

$$K_I \geq K_{IC} \quad (4.3)$$

El lado derecho de la ecuación 4.3 simboliza la resistencia a la fractura del material, la cual es una propiedad del vidrio que depende del módulo de elasticidad, de las condiciones ambientales y de la velocidad con que se presenta la carga. Este factor (K_{IC}) se considera como una constante de los materiales. Un valor recomendado en la literatura para uso práctico es un valor de $0.75 \text{ MPa-m}^{0.5}$ (ó $23.72 \text{ Mpa-mm}^{0.5}$). En la Tabla 4.1 se presentan valores de K_{IC} que se han usado por varios autores.

Tabla 4.1 Factor de intensidad de esfuerzo K_{IC} para vidrios sodocálcicos de sílice
(Tabla modificada de Haldimann, M., 2006).

Referencia	K_{IC} (Mpa m ^{0.5})
Wiederhorn (1967)	0.82
Atkins and Mai (1988)	0.78
Gerhke et. al (1990)	0.78
Mencík (1992)	0.72-0.82
Ullner (1993)	0.76
Porter, M. (2001)	0.75
Haldimann, M (2006)	0.75
Lindqvist, M. (2013)	0.75

Al sustituir la ecuación 4.2 en la ecuación 4.3 se establece una nueva ecuación que permite obtener la resistencia y conocer el estado de una fisura en el vidrio ante una intensidad de esfuerzo determinado:

$$Y\sigma_n\sqrt{a\pi} \geq K_{IC} \quad (4.4)$$

Por lo que el esfuerzo normal crítico para una profundidad de grieta conocida en el vidrio, se define con la expresión:

$$\sigma_c(t) = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{\pi \cdot a(t)}} \quad (4.5)$$

O si se prefiere despejar la profundidad de grieta crítica bajo un esfuerzo normal como:

$$a_c(t) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_n(t)} \right)^2 \quad (4.6)$$

La ecuación 4.6 representa la variación de la resistencia del vidrio como función de la profundidad de la grieta, ésta relación nos permite observar el comportamiento del vidrio ante diferentes condiciones, por lo cual se grafica y se muestra en la Figura 4.3.

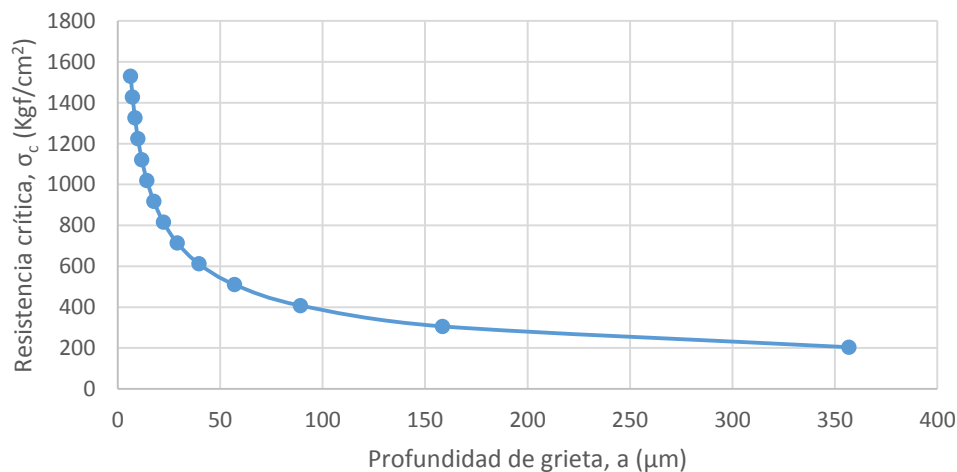


Figura 4.3 Resistencia para una elemento de vidrio con una fisura como función de la profundidad de grieta y con $Y = 1.12$ y $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$.

En la Figura 4.3 observamos la relación parabólica que existe entre la resistencia crítica y la profundidad crítica de una fisura. Esta gráfica es importante para entender que un daño muy pequeño sobre el vidrio no influirá sobre la resistencia; sin embargo, un daño de moderado a grande puede mermar de manera significativa la capacidad de la resistencia de un elemento. Como se observa la reducción en la resistencia es muy importante hasta una profundidad de grieta de 150 μm , para valores mayores la reducción tiende a un ser muy pequeña con respecto de este valor.

La variable del tiempo se introdujo en las ecuaciones 4.5 y 4.6 debido al efecto importante que tiene esta variable con respecto al crecimiento de grieta a lo largo del tiempo, y por lo tanto, su relación con la intensidad del esfuerzo (véase la sección 4.2.2 de este capítulo).

4.2.1 Crecimiento subcrítico de grieta

El crecimiento de grieta se origina por efecto de una reacción química, la cual se manifiesta como un esfuerzo de corrosión generado por condiciones de humedad sobre la punta de una fisura de la superficie del vidrio, donde momentáneamente, el nivel de este esfuerzo es aún menor que el correspondiente a la resistencia crítica; sin embargo, este valor puede alcanzarse después de un periodo de tiempo si la fisura llega a tener el tamaño crítico para favorecer la falla del elemento de vidrio. Por lo que la resistencia de un elemento de vidrio depende del tiempo. Este concepto lo descubrió Grenet en 1899. Por lo que el crecimiento de grieta depende además de las propiedades del vidrio y de las características geométricas de la fisura, del grado de exposición de las fisuras ante historias de esfuerzos o de cargas y de la relación entre los parámetros de intensidad de esfuerzos y de velocidad de grieta (Haldimann, 2006).

4.2.2 Relación entre velocidad de grieta e intensidad de esfuerzo

En un número importante de investigaciones realizadas sobre las relaciones que guardan los parámetros de intensidad de esfuerzo y de velocidad de grieta, se ha concluido que la mejor relación que existe entre estos parámetros se puede definir dentro de tres regiones, que se muestran en la Figura 4.4 para el caso del vidrio sodo-cálcico de sílice.

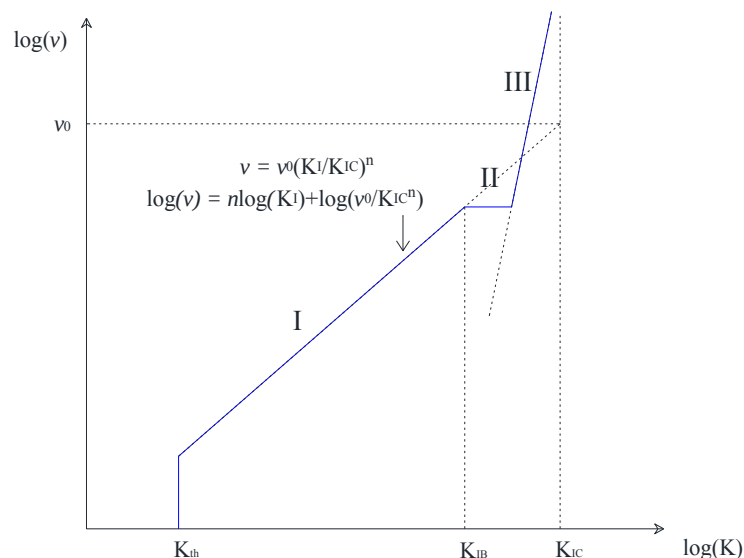


Figura 4.4 Idealización de velocidad de propagación de grieta contra intensidad de esfuerzos.

De las tres regiones mostradas en la Figura 4.4, la que resulta de mayor interés en la ingeniería estructural es la región I, ya que en esa zona es donde se desarrollan las velocidades de grieta más lentas, debido al crecimiento de grieta ante agentes corrosivos como el agua, en contraste con los de las regiones II y III donde se generan las propagaciones de grieta más rápidas. La región I está formada por una línea recta con una pendiente definida por la Ecuación 4.7, la cual depende de las condiciones ambientales. La región III también se representa por una línea recta pero con una pendiente más pronunciada que es característica de los especímenes de vidrio con una propagación de grieta al vacío. La región II es una región transitiva entre las regiones I y III, y que depende de las condiciones ambientales.

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

$$\log(v) = n \cdot \log(K_I) + \log\left(\frac{v_0}{K_{IC}^n}\right) \quad (4.7)$$

La Figura 4.5 muestra los resultados de especímenes probados en agua y en aire seco para definir la región I. Los especímenes probados en agua alcanzaron un valor mayor de la velocidad de propagación de grieta en comparación con los probados en aire seco.

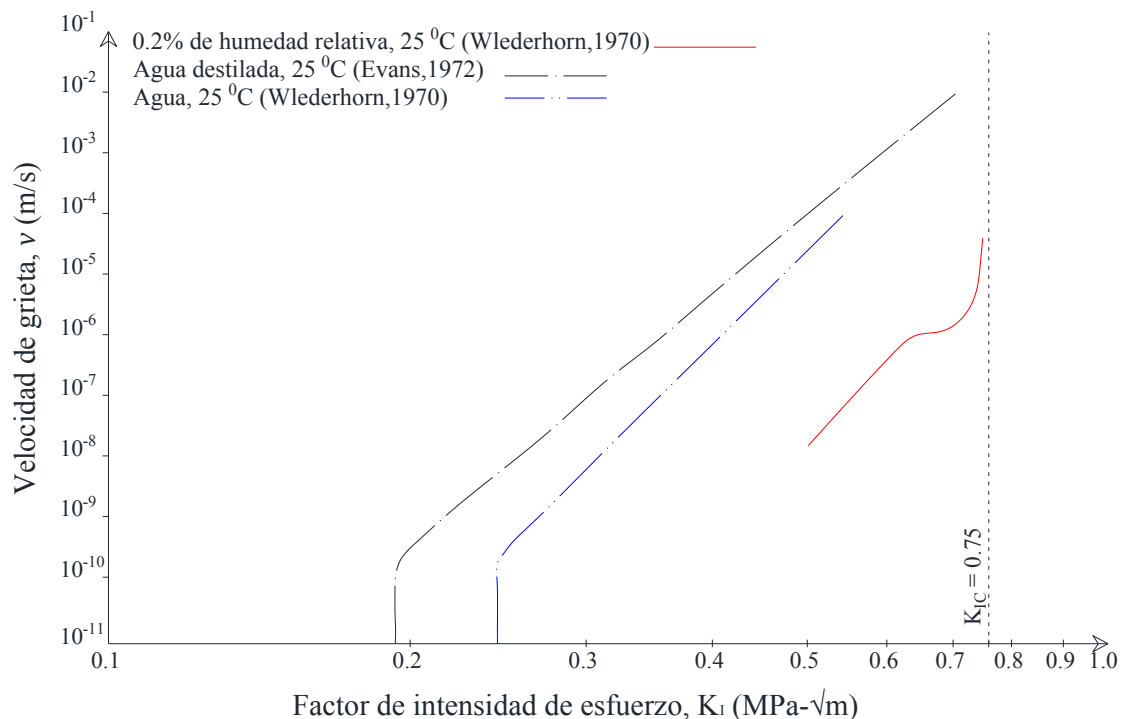


Figura 4.5 Pruebas sobre vidrio de silicato sódico para definir la región I, ambos ejes se encuentran en escala logarítmica (Imagen modificada de Porter, M., 2001).

4.2.3 Agentes participantes en la relación K_I vs. v

La relación K_I - v y sus tres regiones puede sufrir cambios importantes debido a:

Humedad

Capítulo 4 Modelo de Predicción de Vida Útil

Es un agente importante y común para aquellos vidrios estructurales expuestos a condiciones ambientales, pues este agente es el responsable del fenómeno de crecimiento de grieta antes mencionado. Su principal influencia, es aumentar los valores de propagación de fisura en cada región.

Temperatura

Es un agente presente en condiciones ambientales y ante su incremento, es capaz de aumentar las velocidades de propagación de grieta y de reducir la pendiente en cada una de las regiones (I, II y III).

Tasa de aplicación de carga

Es un aspecto importante, reconocido por Haldimann (2006), y es el generador de crecimientos de grieta lentos en la propagación región I (cerca de la condición inerte) si la aplicación de la carga se hace con suficiente rapidez. Por lo que se esperan valores pequeños de v .

Valor de pH

El valor de pH es muy importante para la generación de esfuerzos corrosivos, y con ello el crecimiento de grieta. Por lo tanto este agente corrosivo es capaz de incrementar las velocidades de la relación K_I - v . También tiene una fuerte influencia para propiciar un cambio en el valor de K_{th} .

Haldimann, Luible y Overed (2008), señalan en su trabajo tanto recomendaciones generales como valores recomendables para el diseño, entre las que destacan las siguientes:

- Generales: La velocidad de grieta en un elemento de vidrio depende de las condiciones ambientales y de la velocidad de la aplicación de carga. Existe poca información para poder determinar la predicción de la resistencia de elementos de vidrio puestos en servicio por largo tiempo.
- Diseño estructural: Los valores recomendados para la práctica estructural son de $n = 16$, que representa un valor constante. Un valor conservador de $v_0 = 6$ mm/s en condiciones ambientales y un valor de $v_0 = 30$ mm/s, es más apropiado para aquellos elementos de vidrio sumergidos en agua. En condiciones de laboratorio v_0 puede ser igual a 0.01 mm/s, Haldimann (2006) y Vandebroek, M., Belis, J., Louter, C. y Tendeloo, G. V. (2012).
- Manejo de experimentos: Para la determinación del parámetro de velocidad de grieta en condiciones de crecimiento subcrítico, se recomiendan las pruebas ambientales a pesar de que suele ser muy difícil su determinación ya que el comportamiento se ve afectado directamente por la preparación de un espécimen en condición inerte. Este procedimiento fue implementado por Haldimann en el año de 2006 para tratar de aislar sus especímenes de condiciones ambientales encontradas en el laboratorio, y con esto precisar el valor de v_0 sin incrementar la dispersión de los resultados. Por lo que bajo esta condición se puede considerar el valor de v_0 como determinista, al existir poca incertidumbre en su determinación. Más recientemente, Watson, Nielsen y Overend (2013) estimaron que el valor de v_0 fuese igual a 0.035 mm/s para condiciones de laboratorio ($T_{aire} = 21 \pm 1$ °C y $H_{relativa} = 50 \pm 5\%$).

4.3 Desarrollo del modelo de predicción de vida útil

Porter (2001), Khorasani (2004), Haldimann (2006) y Lindqvist (2013) desarrollaron recientemente modelos para predecir la resistencia del vidrio mediante la idealización de una fisura sobre su superficie e implementando la mecánica de la fractura. Con estos aspectos, el modelo de predicción correspondiente a la propuesta de Haldimann (2006), su Modelo de Predicción de Vida Útil (MPVÚ) se describe a continuación con el objetivo principal de entender sus fundamentos, y posteriormente aplicarlo a nuestro caso de estudio. La deducción inicia con el planteamiento de la ecuación diferencial ordinaria del crecimiento de grieta en un vidrio:

$$v = \frac{da}{dt} = v_0 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (4.8)$$

La solución de ésta ecuación diferencial es mediante la técnica de separación de variables, y la sustitución de la ecuación 4.2 en ecuación 4.8, de donde se obtiene:

$$\frac{da}{dt} = v_0 \left(\frac{Y \sigma_n \sqrt{a \pi}}{K_{IC}} \right)^n \quad (4.9)$$

$$\int_{a_i}^{a_f(t)} a^{-\frac{n}{2}} da = \int_{t=0}^t \frac{v_0 (Y \sqrt{\pi})^n}{K_{IC}^n} \cdot \sigma_n^n(t) dt \quad (4.10)$$

Integramos primero el lado izquierdo de la ecuación 4.10:

$$\frac{n}{2-n} \left(a_f^{\frac{2-n}{2}} - a_i^{\frac{2-n}{2}} \right) = \frac{v_0 (Y \sqrt{\pi})^n}{K_{IC}^n} \int_{t=0}^t \sigma_n^n(t) \cdot dt \quad (4.11)$$

resultado que puede expresarse en función del tamaño de grieta asumiendo $a_i(t=0)$:

$$a(t) = \left[a_i^{\frac{2-n}{2}} + \frac{v_0 (2-n)}{2} \left(\frac{Y \sqrt{\pi}}{K_{IC}} \right)^n \int_{t=0}^t \sigma_n^n(t) \cdot dt \right]^{\frac{2}{2-n}} \quad (4.12)$$

si se prefiere, se puede expresar la ecuación 4.12 en términos de la integral de riesgo, donde se describe directamente el daño acumulado en el vidrio:

$$\int_{t=0}^t \sigma_n^n(t) \cdot dt = \frac{2}{(2-n)v_0} \left(\frac{K_{IC}}{Y \sqrt{\pi}} \right)^n \left(a_f^{\frac{2-n}{2}} - a_i^{\frac{2-n}{2}} \right) \quad (4.13)$$

De la ecuación anterior, podemos conocer la profundidad de grieta a_f en un tiempo $t = t_f$, a través de la ecuación 4.6:

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y \sigma_n(t_f)} \right)^2 \quad (4.14)$$

La ecuación 4.14 puede ser despejada a través del esfuerzo normal para establecer la condición de resistencia inerte de una grieta, es decir, el crecimiento subcrítico de una grieta no prevalece. Por lo tanto, se sustituye este valor de a_f en la Ecuación 4.13 e integramos asumiendo un esfuerzo constante σ_n , obtenemos:

$$t_f = \frac{2}{v_0(2-n)} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_n\sqrt{\pi}} \right)^n \left[\left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_n\sqrt{\pi}} \right)^{2-n} - a_i^{\frac{2-n}{2}} \right] \quad (4.15)$$

La ecuación 4.15 nos permite ahora expresar la resistencia de una grieta en la superficie de un vidrio en un tiempo determinado de carga como función de una profundidad de grieta inicial. En la Figura 4.6 se gráfica la Ecuación 3.15 para mostrar el comportamiento del tiempo en que se presenta la falla ante un esfuerzo constante para diferentes profundidades de grieta iniciales.

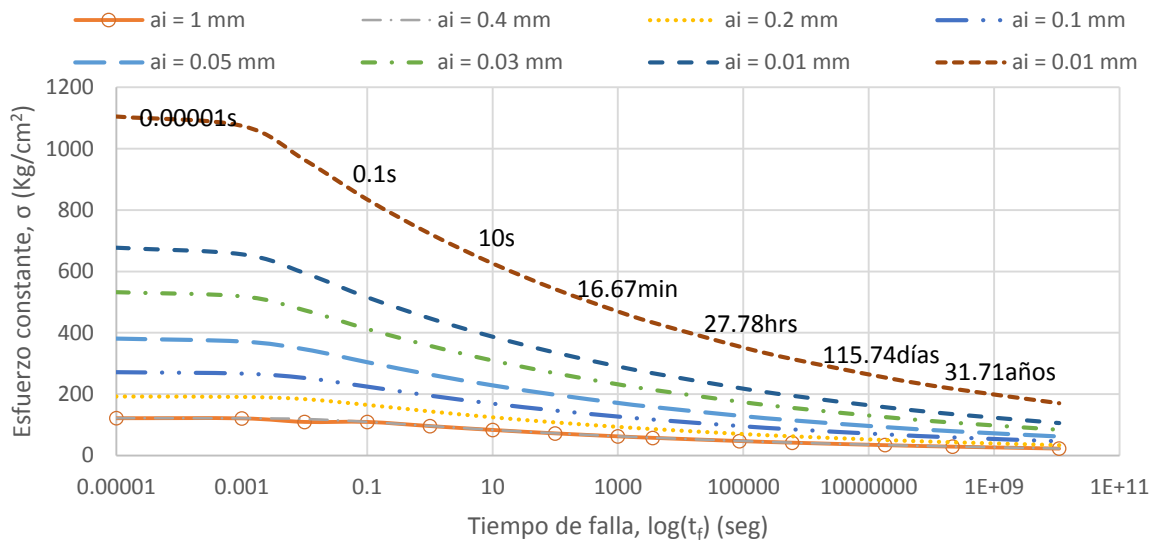


Figura 4.6 Resistencia de una fisura en función de la profundidad de grieta inicial a_i y el tiempo de carga. Además, $Y = 1.12$, $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, $n = 16$ y $v_0 = 6 \text{ mm/seg}$.

En la Figura 4.6 podemos observar que la resistencia de una fisura depende en gran medida de la profundidad de grieta inicial y del tiempo. Y en términos generales la resistencia también disminuye a medida que la duración de la carga se incrementa.

La Ecuación 4.15 se simplificaría si consideramos el caso en que $a_f \gg a_i$, con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$t_f = \frac{2}{v_0(n-2)} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_n\sqrt{\pi}} \right)^n \left\{ a_i^{\frac{2-n}{2}} \right\} \quad (4.16)$$

Sin embargo, debemos tener presente que, esta ecuación carece de validez en el caso donde se aplique carga de corta duración, ya que ante la condición de una alta tasa de carga se presenta la resistencia inerte de la fisura ($a_i \approx a_f$), la cual no debe conducir a un valor inferior de la resistencia estimada mediante la ecuación 4.16, donde el valor de la resistencia tiene una tendencia exponencial (ecuación 4.15). En términos generales, la ecuación 4.16 subestima los valores de la resistencia para velocidades altas de la acción de la carga, tal como se muestra en la Figura 4.7.

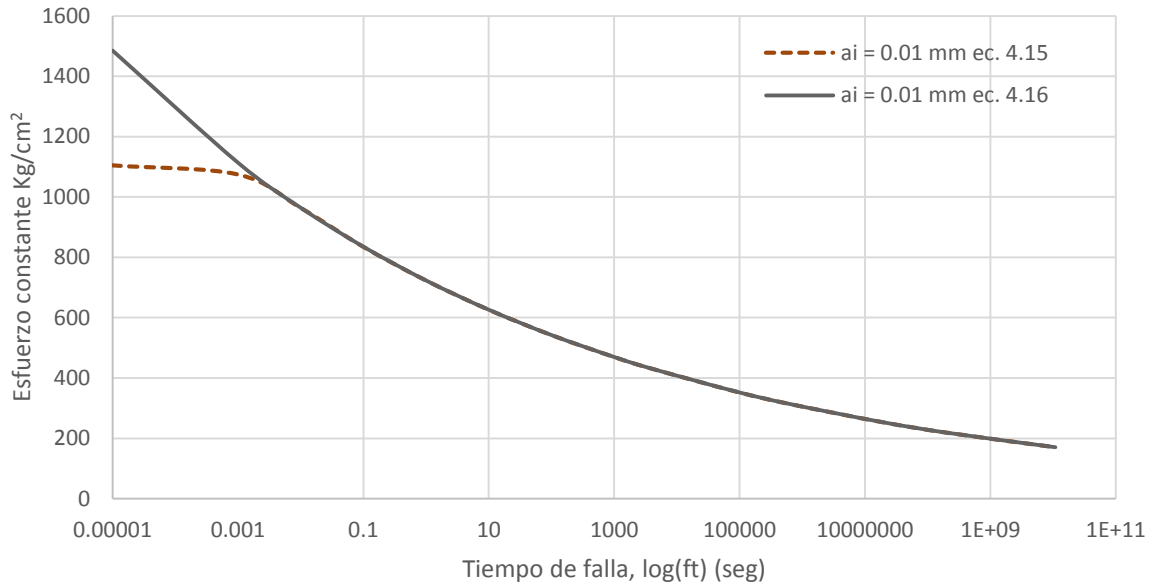


Figura 4.7 Resistencia de una fisura en función de la profundidad de grieta inicial, ecuaciones 4.15 y 4.16. Para $Y = 1.12$, $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa-m}^{0.5}$, $n = 16$ y $v_0 = 6 \text{ mm/seg}$.

A partir de las ecuaciones 4.12 y 4.14 se obtiene una nueva ecuación para la interpretación de resultados de pruebas de laboratorio, esta forma de expresar el problema puede considerarse muy útil,

$$a_i(t) = \left[\left(\frac{\sigma_n(t) Y \sqrt{\pi}}{K_{IC}} \right)^{n-2} + \frac{v_0(n-2)}{2} \left(\frac{Y \sqrt{\pi}}{K_{IC}} \right)^n \int_{t=0}^t \sigma_n^n(t) \cdot dt \right]^{\frac{2}{2-n}} \quad (4.17)$$

La ecuación 4.17 queda como función de la profundidad de la fisura inicial que origina la falla de una fisura o elemento en un instante de tiempo del intervalo $[0, T]$ de la historia de esfuerzos.

4.4 Esfuerzo estático equivalente y esfuerzo resistente

El esfuerzo estático equivalente es un arreglo matemático, o expresión simplificada, que intenta reproducir el efecto del crecimiento de una grieta en un vidrio como efecto de la acción de una historia de esfuerzos. Esta simplificación la propuso Haldimann (2006) para establecer un criterio de falla en el proceso de diseño de un elemento de vidrio. La expresión que define el esfuerzo estático se definió en el capítulo anterior (ecuación 3.38), y la reescribimos a continuación:

$$\sigma_{t_0} \leq \sigma_{R,t_0}$$

donde:

σ_{t_0} es el esfuerzo estático equivalente t_0 .

σ_{R,t_0} es la resistencia equivalente t_0 .

Capítulo 4 Modelo de Predicción de Vida Útil

La validez de este concepto se fundamenta en el hecho de que el parámetro de velocidad de grieta, n , es una constante para toda la historia de esfuerzos, de tal forma que nos permita igualar dos historias de esfuerzos de la siguiente forma:

$$\int_0^{t_1} \sigma_{(1)}^n(t) dt = \int_0^{t_2} \sigma_{(2)}^n(t) dt \quad (4.18)$$

Las integrales de la ecuación 4.18 se solucionan en forma general bajo la consideración de un esfuerzo constante en cada incremento de tiempo, lo cual se puede expresar como:

$$\int_0^t \sigma^n(t) dt = \sigma_t^n \cdot t \quad (4.19)$$

Por lo que al despejar el esfuerzo del miembro derecho de la ecuación 4.19, se puede obtener un esfuerzo equivalente σ_{t_0} con periodo de tiempo t_0 , el cual puede causar el mismo crecimiento de grieta que el generado por una historia de esfuerzos real, y con esto se obtiene de nuevo la ecuación 3.40:

$$\sigma_{t_0} = \left(\frac{1}{t_0} \int_0^T \sigma^n(\tau) d\tau \right)^{\frac{1}{n}}$$

Incluso, la integral que se presenta en la ecuación 3.40 puede resolverse de forma aproximada mediante métodos de integración numérica, al discretizar la historia de esfuerzo en J periodos de tiempo con pasos de tiempo t_j , y para el esfuerzo constante $\sigma_{t_j}^n$:

$$\sigma_{t_0} \approx \left(\frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^J \sigma_{t_j}^n \cdot t_j \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.20)$$

El concepto de esfuerzo estático equivalente se puede extender para la resistencia de una grieta determinada mediante la definición del tiempo equivalente t_0 , numerada en el capítulo tres como la ecuación 3.39:

$$\sigma_{R,t_0} = \left(\frac{1}{t_0} \frac{2}{a_i^{(n-2)/2} \cdot (n-2) \cdot v_0 \cdot (Y\sqrt{\pi})^n K_{Ic}^{-n}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

La ecuación 3.39 expresa la capacidad de resistencia de una fisura para un lapso de tiempo equivalente. Además, la ecuación 3.39 depende de los parámetros de profundidad de grieta inicial (a_i), el factor de geometría (Y), condiciones ambientales (n, v_0) y del material (K_{Ic}). Sin embargo, hay que recordar que esta ecuación se encuentra bajo la suposición de que $a_f \gg a_i$. A continuación se muestra en la Figura 4.8 la resistencia equivalente obtenida con la Ec. 3.39 para valores utilizados comúnmente en las normas ($t_0 = 1$ s, 3 s y/o 60 s).

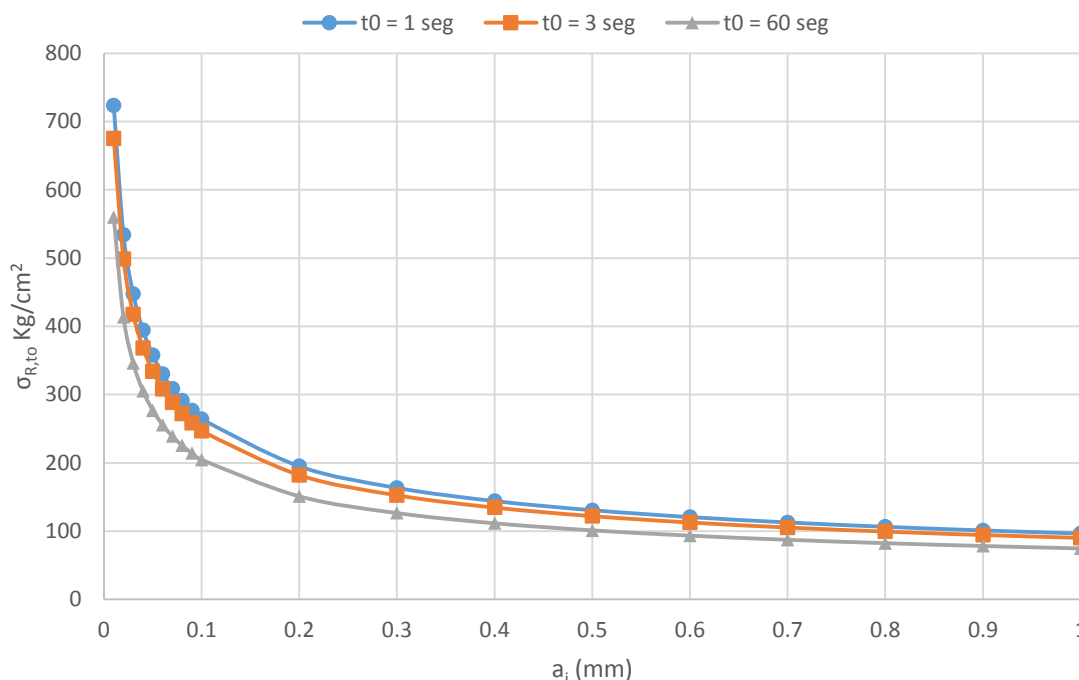


Figura 4.8 Resistencia equivalente para $t_0 = 1, 3$ y 60 s.

Si quisiéramos establecer una solución de la resistencia equivalente- g, t_0 generalizada a través de la ecuación 4.15 se obtendría la siguiente expresión:

$$\sigma_{g,t_0} = \left\{ \frac{1}{t_0} \frac{2}{v_0 (2-n)} \left(\frac{K_{IC}}{Y \sqrt{\pi}} \right)^n \left[\left(\frac{K_{IC}}{Y \sigma_{g,t_0} \sqrt{\pi}} \right)^{2-n} - a_i^{\frac{2-n}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.21)$$

Sin embargo, ésta ecuación 4.21 queda expresada en función del mismo esfuerzo y no se gana más precisión que la que se obtiene con la ecuación 3.39, por lo que esta última se considera como suficiente para implementarse en el proceso del diseño estructural.

Las ecuaciones 3.39 y 4.21 son esenciales para cuando el diseño de un elemento de vidrio está gobernado por una sola grieta de diseño.

4.5 Extensión del modelo de una fisura sobre el vidrio a un modelo probabilístico simplificado

La extensión del modelo previamente descrito en este capítulo, específicamente las ecuaciones 4.15 o 4.16 que definen la capacidad de resistencia de una fisura, surge de la necesidad de predecir la resistencia del vidrio ante un nuevo escenario de falla correspondiente a un conjunto de fisuras cuya localización es aleatoria, como se pudo observar en la Figura 4.1, que ocultan la fisura crítica que pudiera ser la causa de la falla del elemento cuando este se encuentra en servicio. El modelo que describe este escenario ya fue desarrollado por Haldimann (2006), sin embargo en esta sección se habla de las hipótesis en que se basa el desarrollo de su modelo, conocido con el nombre de modelo de predicción de falla de varias fisuras en la superficie de un vidrio, y que algunas de sus ecuaciones ya se presentaron en la sección 3.2.9 del capítulo 3. El objetivo principal de este trabajo de investigación es aplicar esta propuesta, con el fin de explorar su posible aplicación en futuros

códigos de diseño de vidrio en México. El hecho de reproducir los trabajos de Haldimann (2006) nos permitirá dar validez a las recomendaciones de diseño presentadas en este trabajo.

Las hipótesis de su modelo son de carácter probabilístico, y se justifican con base en una serie de aspectos que intervienen en la determinación de la resistencia, entre los que se encuentran la capacidad de los instrumentos de medición implementados en un problema de carácter microscópico, y los tiempos de medición que pueden ser considerados interminables. Por lo que se justifica un modelo probabilístico donde la incertidumbre acompaña a varios de los parámetros que caracterizan la resistencia del vidrio. A continuación se mencionan las principales hipótesis en las que se fundamenta la ecuación 3.46:

- La superficie del vidrio se compone de un número aleatorio de fisuras de profundidad variable.
- La profundidad de grieta que tiene un carácter variable, se representa por una función de densidad de probabilidad de Pareto.
- Las fisuras se comportan de manera independiente ante fisuras vecinas.
- La orientación y ubicación de cada fisura tienen la misma probabilidad de ocurrencia en toda la superficie del vidrio, esto quiere decir que se modela con una función de densidad de probabilidad Uniforme.
- Se considera que el modo I de falla de la mecánica de la fractura elástica es suficientemente preciso, en contraste de un comportamiento de falla real multimodal.
- La probabilidad de falla se desarrolla únicamente bajo esfuerzos de tensión.

A partir de estas hipótesis se desarrolló el modelo de predicción de vida útil para una población de fisuras sobre el vidrio, hipótesis que incluyen en sí mismas otro conjunto de variables aleatorias que deben definirse ya sea en términos probabilistas o deterministas, para las cuales fue necesario plantear ecuaciones que incluyen diversos temas como los que se comentan a continuación:

- Planteamiento de la probabilidad de falla ante esfuerzo constante, esfuerzo uniforme y esfuerzo uniaxial
- Extensión para esfuerzo no uniforme y campo de esfuerzos biaxial.
- Extensión para carga dependiente del tiempo.
- Consideración del crecimiento de grieta subcrítico.

Como se puede apreciar la consideración de todos estos aspectos dentro del MPVÚ da lugar a un modelo complejo y difícil de implementar en la práctica del diseño estructural por el ingeniero de la práctica profesional. Por estas razones Haldimann (2006) se dio a la tarea de simplificar su modelo con base en tres aspectos conservadores, sin que se perdiera precisión en el modelo desde luego, así que para la mayoría de los casos de la práctica estructural del vidrio es posible:

1. Establecer una probabilidad de falla con base en la integral de riesgo (asumiendo, $a_i \ll a_f$).
2. Despreciar la influencia del crecimiento de grieta en el límite, K_{th} .
3. Asumir un campo de esfuerzos equibiaxial sobre el elemento.

Debido a estos tres puntos el MPVÚ expresado con la ec. 3.46 se simplifica a:

$$P_f(t) = 1 - e^{\left\{ -\frac{1}{A_0} \left(\frac{t_0}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right)^{\frac{m_0}{n-2}} \int_A [\sigma_{1,t_0}(t, \vec{r})]^{\frac{n \cdot m_0}{n-2}} \right\}} \quad (4.22)$$

Esta ecuación representa la probabilidad de falla, que ahora depende del esfuerzo principal mayor en un tiempo de referencia t_0 , $\sigma_{1,t_0}(t, \vec{r})$, que es función del tiempo t y del vector de posición $\vec{r}$, el cual se define como:

$$\sigma_{1,t_0}(t, \vec{r}) = \left(\frac{1}{t_0} \int_0^t \sigma_1^n(\tau, \vec{r}) d\tau \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.23)$$

Si este esfuerzo se asocia con un esfuerzo equivalente distribuido uniformemente sobre un área A , $\sigma_{1eq,t_0}(t, \vec{r})$ que asemeje el mismo efecto de un esfuerzo distribuido real se obtiene:

$$\sigma_{1eq,t_0} = \left(\frac{1}{A} \int_A \sigma_{1,t_0}^{\bar{m}} dA \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \quad (4.24)$$

Si generalizamos aún más la expresión 4.24 para tener el mismo efecto cuando actúa sobre una superficie de área unitaria $A_0 = 1 \text{ m}^2$ en lugar de toda el área de la superficie A , debemos despejar al $\sigma_{1eq,t_0}(t, \vec{r})$ de dicha relación para obtener lo que se conoce como esfuerzo uniforme equivalente de tiempo de referencia t_0 sobre el área de superficie unitaria; el cual refiere Haldimann (2006) como esfuerzo de referencia equivalente y se expresa como:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{1eq,t_0,A_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \sigma_{1eq,t_0} = \left(\frac{1}{A_0} \int_A \sigma_{1,t_0}^{\bar{m}} dA \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \quad (4.25)$$

La historia de esfuerzos como una acción puede evaluarse con la ec. 4.25, y su solución aproximada se representa mediante la ecuación:

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{1}{A_0} \sum_i A_i \sigma_{1,t_0,i}^{\bar{m}} \right)^{\frac{1}{\bar{m}}} \quad (4.26)$$

La expresión 4.26 es muy útil para cuando se tiene acceso a los resultados de la distribución de esfuerzos mediante análisis desarrollados con el método de elementos finitos, donde se subdivide al elemento en A_i elementos de área, para que el esfuerzo distribuido no uniforme en su defecto pueda considerarse como un esfuerzo uniforme.

La ec. 4.25 se sustituye dentro de la ec. 4.22 para obtener la siguiente forma de la ecuación:

$$P_f(t) = 1 - e^{\left\{ -\bar{k} \cdot \bar{\sigma}^{\bar{m}} \right\}} \quad (4.27)$$

donde $\bar{m}$ y $\bar{k}$ se estiman mediante:

$$\bar{m} = \frac{n \cdot m_0}{(n-2)} \quad \bar{k} = \left(\frac{t_0}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right)^{\frac{m_0}{n-2}} \quad (4.28)$$

Si ahora se propone una probabilidad de falla objetivo ($P_{f,t}$) para estimar la resistencia de referencia ambiental, $f_0(P_{f,t})$ de un elemento de vidrio, utilizando la ec. 4.27 obtenemos la ec. 3.42:

$$f_0(P_{f,t}) = \left[-\ln(1 - P_{f,t}) \right]^{\frac{1}{\bar{m}}} \cdot \left(\frac{t_0}{U \cdot \theta_0^{n-2}} \right)^{-\frac{1}{n}} = f_{0, \text{inerte}}^{\frac{(n-2)}{n}} \cdot \left(\frac{U}{t_0} \right)^{\frac{1}{n}}$$

donde la resistencia inerte de referencia se define como:

$$f_{0, \text{inerte}} = \theta_0 \left[-\ln(1 - P_{f,t}) \right]^{\frac{1}{m_0}} \quad (4.29)$$

y,

$$U = \frac{2K_{IC}^2}{(n-2) \cdot v_0 \cdot Y^2 \pi}$$

Establecido lo anterior, se concluye que es evidente que el criterio general de falla de acciones contra resistencia de elementos estructurales de vidrio está definido con la ecuación 3.41:

$$\bar{\sigma} < f_0(P_{f,t})$$

Aclaraciones sobre los conceptos antes descritos:

La probabilidad objetivo, $P_{f,t}$, es la probabilidad de falla en condiciones ambientales de un elemento estructural de vidrio con área unitaria bajo la acción de un esfuerzo de tensión uniformemente distribuido en un tiempo de referencia $t_0 = 1$ seg.

Haldimann nos dice que hay que tener en mente los siguientes aspectos:

- “El esfuerzo de referencia equivalente $\bar{\sigma}$, es una función de la historia de carga, la resistencia residual σ_r , el área de superficie del elemento A, el parámetro de velocidad de grieta n y el parámetro referente a la condición de la superficie m_0 ”.
- “La resistencia inerte de referencia $f_{0, \text{inerte}}$ es función de la probabilidad de falla objetivo $P_{f,t}$ y de los parámetros de las condiciones de superficie θ_0 y m_0 ”.
- “La resistencia ambiental de referencia f_0 , depende adicionalmente de los parámetros de velocidad de grieta v_0 y n . Sin embargo, esta es independiente de la historia de carga, el área de la superficie A y el esfuerzo residual σ_r ”.

Detalles de discusión y simplificación del modelo se pueden obtener del capítulo 5 de la disertación de Haldimann (2006).

A continuación se presentan gráficamente los resultados que se obtienen al aplicar las ecuaciones 3.42 y 4.29. Para estimar los resultados que muestran en las Figuras 4.9 a 4.11 se emplearon los siguiente parámetros: $K_{IC} = 0.75$ MPa-m^{0.5}, $Y = 1.12$, $n = 16$, $v_0 = 6$ mm/s, $t_0 = 1$ seg y $\theta_0 = 65$.

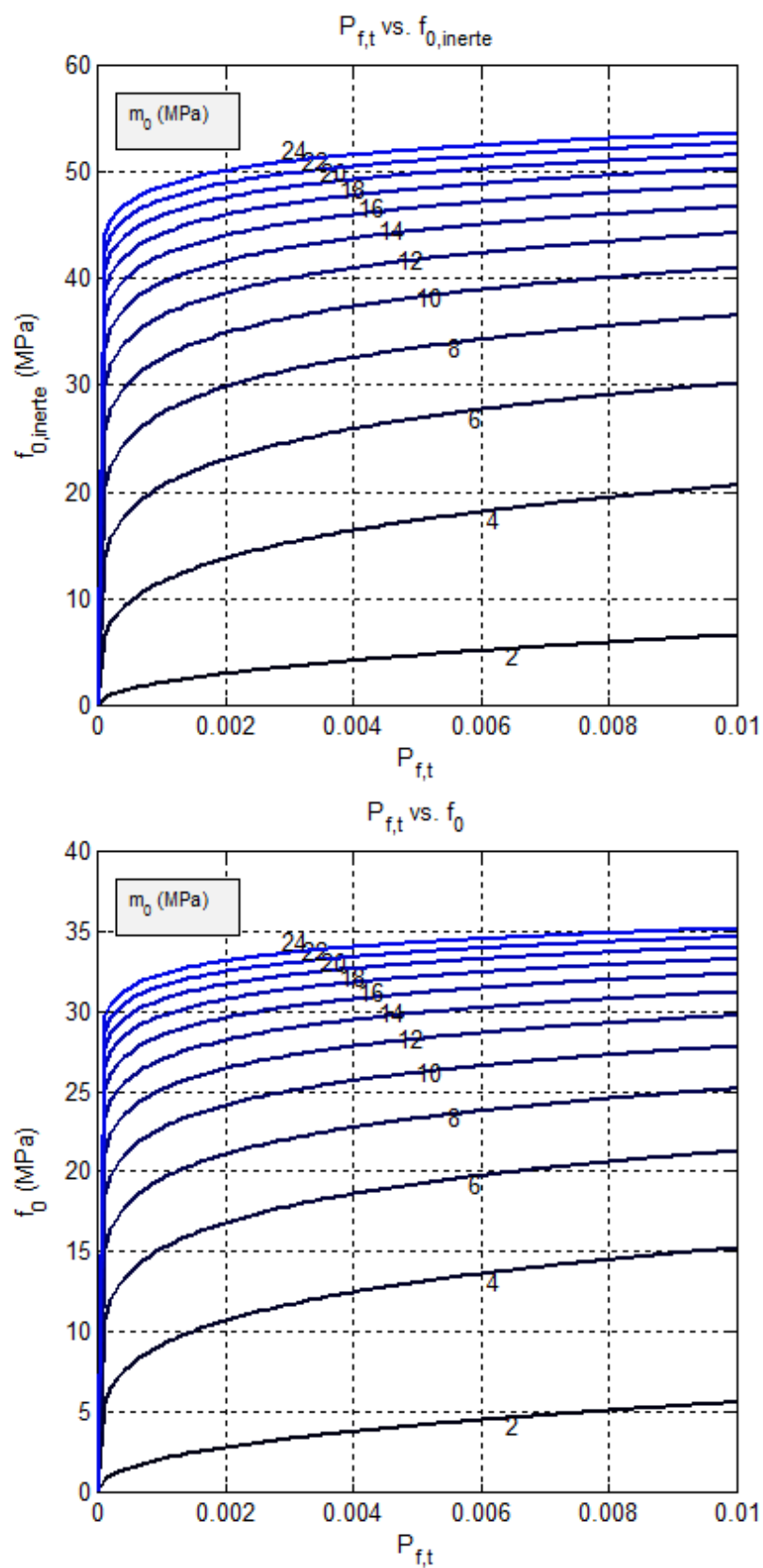


Figura 4.9 Representación gráfica de las ecuaciones que definen $f_{0,inerte}$ (arriba) y f_0 (abajo) para un conjunto de probabilidades de falla objetivo (P_{ft}).

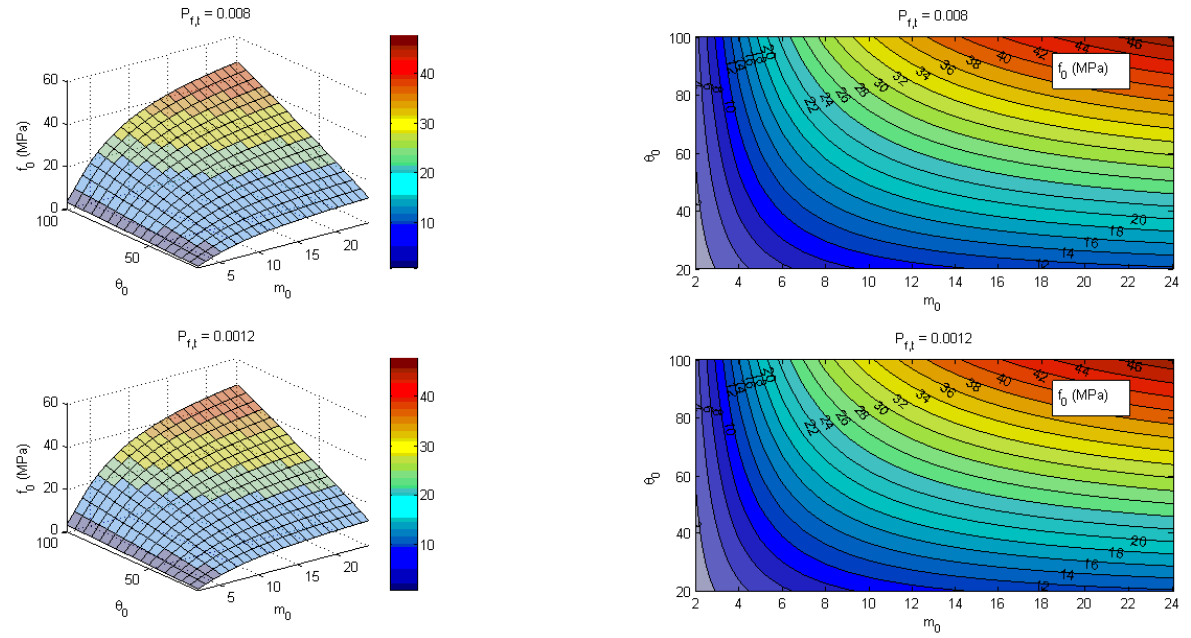


Figura 4.10. Resistencia de referencia ambiental f_0 contra θ_0 y m_0 : para una $P_{r,t} = 0.008$ (arriba) y $P_{r,t} = 0.0012$.

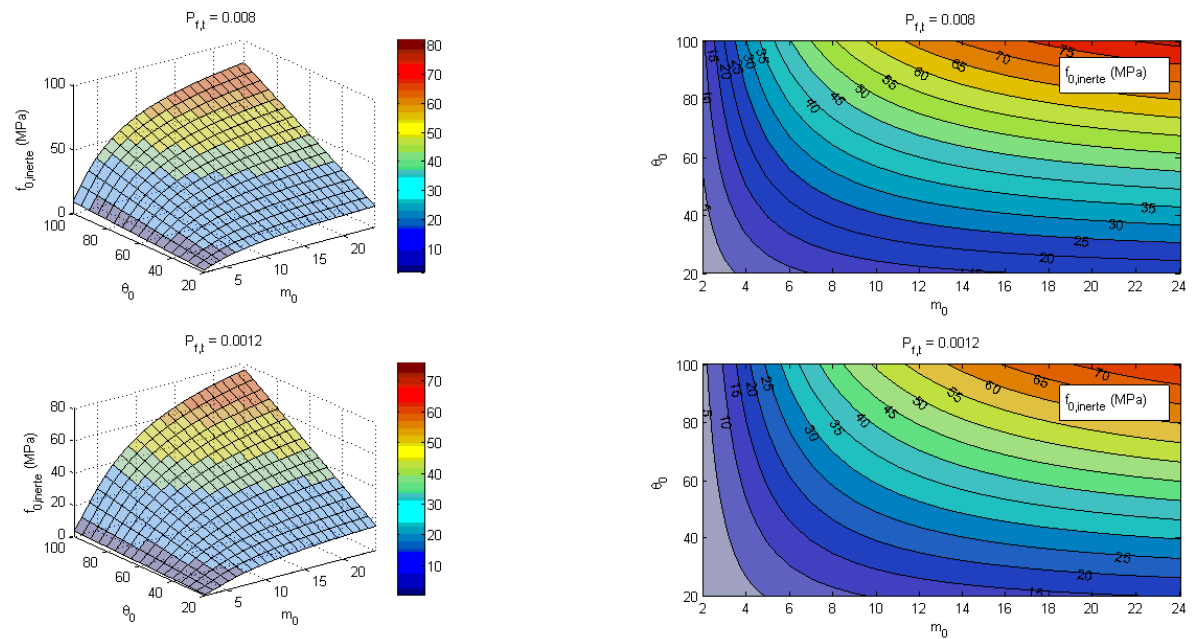


Figura 4.11. Resistencia inerte de referencia $f_{0,inerte}$ contra θ_0 y m_0 : para una $P_{r,t} = 0.008$ (arriba) y $P_{r,t} = 0.0012$ (abajo).

Análisis de Parámetros del Modelo

5.1 Introducción

Para un mejor entendimiento de los temas que se desarrollan en los siguientes capítulos que están relacionados con la parte experimental de este trabajo y con la eficacia del MPVÚ, debemos conocer el comportamiento de los parámetros y el intervalo de aplicación de los factores que influyen en la determinación de la resistencia de los vidrios, lo cual se logra por medio del análisis de los resultados reportados en la literatura por varios investigadores para diferentes condiciones y configuraciones de paneles de vidrio considerados (Beason, 1980; Haldimann, 2006; Lindqvist, 2013 y otros). Con base en esta información se establece la configuración de prueba más apropiada para representar al MPVÚ. Una parte importante en el desarrollo de resultados de un modelo está en la correcta determinación de sus parámetros. En la Tabla 5.1 se describen los parámetros esenciales para el MPVÚ que definen la resistencia estructural de un elemento de vidrio. Algunos de estos parámetros se describieron en la sección 4.2, y serán referidos nuevamente por su importancia, como es el caso del factor de intensidad de esfuerzo crítico K_{IC} , que es una constante propia del material, el umbral del crecimiento de grieta K_{th} , y los parámetros de velocidad de grieta n y v_0 ; mientras que otros parámetros como el factor de geometría Y y los parámetros de condición de superficie, θ_0 y m_0 , tendrán la principal atención en el desarrollo de este capítulo.

Tabla 5.1 Influencias principal que tienen los parámetros en la implementación del MPVÚ de un elemento de vidrio (Tabla modificada de Haldimann, H., Luible, A. y Overed, M., 2008)

Parámetro (s)	Principal Influencia
Factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC})	Constante del material
Umbral del crecimiento de grieta (K_{th})	Condiciones ambientales
Factor de geometría de la fisura (Y)	Geometría de la fisura y del elemento, campo de esfuerzos
Parámetros de velocidad de grieta (v_0 , n)	Condiciones ambientales, tasa de esfuerzos
Parámetros de condición de superficie (θ_0 , m_0)	Condición de la superficie del vidrio
Profundidad inicial de una fisura de superficie (a_i)	Escenario de riesgo, tipo de vidrio

5.1.1 Factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC})

Es conocido como una constante propia del material con valor de $0.75 \text{ MPa}\times\text{m}^{0.5}$ (para un $E = 74000 \text{ Mpa}$) y algunos de sus valores más representativos se presentan en la Tabla 4.1. Sin embargo, veremos que el comportamiento de este parámetro ante el módulo de elasticidad es de mucha importancia, para demostrarlo, debemos igualar las ecuaciones 4.1 y 4.5 y por medio de sus equivalencias de cálculo, obtenemos:

$$K_{IC} = \sqrt{2E\gamma Y^2} \quad (5.1)$$

La Tabla 5.2 muestra el cálculo de K_{IC} para distintos valores de módulo de elasticidad. Donde para valores pequeños del módulo de elasticidad, el vidrio es más susceptible a fallar.

Tabla 5.2 Factor de intensidad de esfuerzo crítico en función del módulo de elasticidad.

E (Mpa)	K_{IC} (Mpa·m ^{0.5})
10000	0.27
20000	0.39
30000	0.47
40000	0.55
50000	0.61
60000	0.67
74000*	0.75
80000	0.78
90000	0.82
100000	0.87

*Valor recomendado por la norma prEN 13474

5.1.2 Umbral del crecimiento de grieta (K_{th})

Dentro de las tres simplificaciones mencionadas en la sección 4.5 sobre el MPVÚ para el diseño estructural de elementos de vidrio, se encontró que los efectos del parámetro umbral de crecimiento de fisura K_{th} pueden ser despreciables, como se observó en resultados experimentales (Sección 5.1 de Haldimann, 2006). Sin embargo, en la Tabla 5.3 se presentan algunos valores reportados en la literatura.

Tabla 5.3 Limite de esfuerzo de corrosión K_{th} para vidrio de sodocálcico de sílice para diferentes condiciones ambientales (Haldimann, M., 2006).

Autor	K_{th} (MPa·m ^{0.5})	Ambiente
Wiederhorn and Bolz en 1970	0.2	En agua, 25°C
Simmons and Freiman en 1981	0.27	
Gehrke et al. En 1990	0.26	En agua, 23°C
Sglavo and Bertoldi 2004	0.21	En agua Ionizada

5.1.3 Factor de geometría de la fisura (Y)

El factor de geometría Y de una fisura es un parámetro esencial para el diseño, y por ello es importante conocer como determinarlo. Algunos de sus valores obtenidos mediante cálculos analíticos y experimentales se resumen en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Valores del factor de geometría Y de fisuras de superficie determinados analíticamente y experimentalmente (Tabla modificada de Haldimann, M., Luible, A. y Overed, M., 2008)

Tipo de fisura	Factor de geometría Y
Vidrio rayado	0.564
Endentado de Vickers	0.666
Grieta en forma de medio círculo en un cuerpo semi-infinito	0.637-0.713
Fisura de cuarto de círculo sobre borde de vidrio	0.722
Rayado con papel lija	0.999
Grieta de borde de vidrio en un cuerpo semi-infinito	1.12

Para la determinación de Y se recomienda usar el método de Lindqvist, M. (2013), valor que se determina mediante las ecuaciones 3.39 y 4.15, el valor del parámetro corresponde al valor mínimo obtenido de las siguientes dos expresiones:

$$Y_{calc} = \min \left\{ \begin{array}{l} Y(\sigma, a) = \frac{K_{IC}}{\sigma \sqrt{\pi \cdot a}} \\ Y(\sigma, a, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{\sigma^n \cdot t \cdot (n-2) v_0 K_{IC}^{-\frac{n}{2}} a^{\frac{n-2}{2}}} \right)^{\frac{1}{n}} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

donde,

es el esfuerzo de falla equivalente propuesto en 1992 por Mencik:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{1}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} \sigma_f$$

donde, σ_f es el esfuerzo de falla, que en el caso del método de Lindqvist, M. (2013) se obtiene mediante pruebas de F4P para diferentes condiciones de acabado o terminados en borde, considerándose el parámetro de velocidad de grieta n igual a 16.

a es la profundidad de grieta medida experimentalmente antes de someter el espécimen a carga.

$K_{IC} = 0.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$.

$v_0 = 0.01 \text{ mm/s}$ para el método de Lindqvist, M. (2013).

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados experimentales de la determinación del parámetro de geometría para fisuras en el vidrio (ecuación 5.1). Los valores promedio para $Y(\sigma, a, t)$ y $Y(\sigma, a)$ son 0.8828 y 1.0206, respectivamente.

Tabla 5.5 Factor de geometría, Y. Borde cortado por fabricante. Probado en pruebas de F4P a tasa alta de carga y con tasa de deformación controlada de 0.133 mm/s (Lindqvist, M., 2013).				
Especimen	Profundidad de fisura (μm)	Esfuerzo de falla (Mpa)	Y(σ,a,t) cal	Y(σ,a) cal
1	50	81.9	0.771	0.870
2	70	86.2	0.633	0.699
3	65	63.9	0.881	0.978
4	25	71.0	1.205	1.419
5	45	72.5	0.912	1.036
6	50	81.1	0.779	0.879
7	10	91.2	1.401	1.747
8	60	69.6	0.838	0.935
9	60	74.5	0.783	0.873
10	25	87.9	0.973	1.146
11	50	93.7	0.674	0.760
12	10	92.4	1.382	1.724
13	30	87.0	0.908	1.057
14	50	91.9	0.687	0.775
15	30	90.9	0.869	1.012
16	30	106.1	0.745	0.867
17	25	110.7	0.773	0.910
18	55	87.6	0.692	0.776
19	70	83.0	0.657	0.726
20	50	57.8	1.093	1.223

Para visualizar la influencia que presenta este parámetro en la resistencia de una grieta, se grafica la ecuación 5.6 para tres valores de Y (1.12, 1.0206 y 0.8828) en la Figura 5.1, los valores son representativos de la media de los resultados reportados en la Tabla 5.5. La resistencia inerte entre curvas no muestra una variación significativa para profundidades de grieta que tienden a 0 μm , sin embargo cuando la resistencia inerte entre curvas cae debido a profundidades de grieta mayores, la influencia de Y se hace más importante, es decir para Y grandes, la resistencia inerte decae ante profundidades de grietas menores.

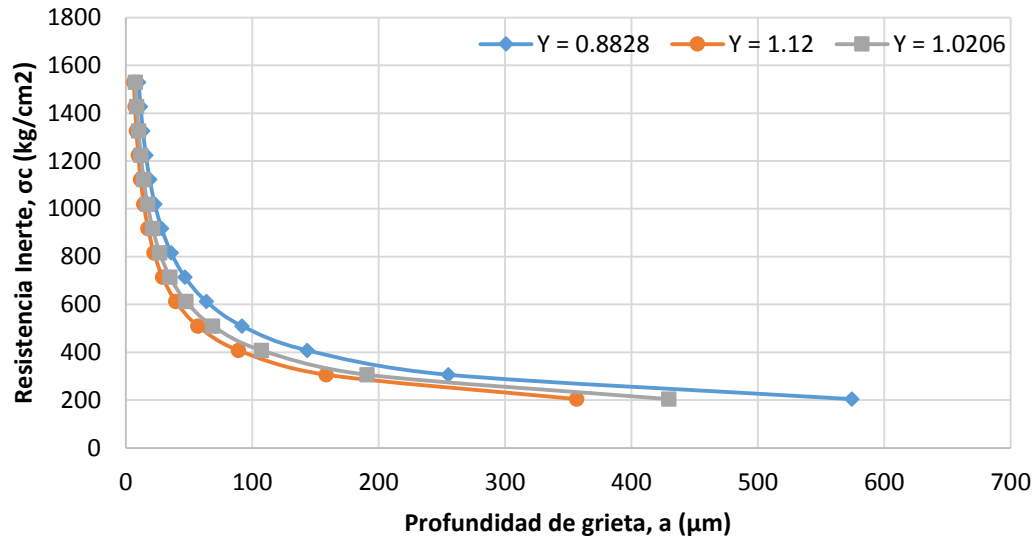


Figura 5.1 Influencia del factor de geometría en la resistencia de una fisura (con $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$).

5.1.4 Parámetros de velocidad de grieta (v_0, n)

Los parámetros de velocidad de grieta v_0 y n , son quizás los parámetros que mayor influencia tienen en la predicción de la resistencia del vidrio; sin embargo, la forma de estimarlos se ha aceptado con base con una gran cantidad de trabajos experimentales, que dependen de las condiciones ambientales a que estén sujetas las pruebas de laboratorio. Detalles referentes a la determinación de estos parámetros se presentan en la Tabla 5.6 (Kerkhof et al., 1981), los cuales se estiman mediante la relación empírica 5.3, la cual es equivalente a la ecuación 4.8.

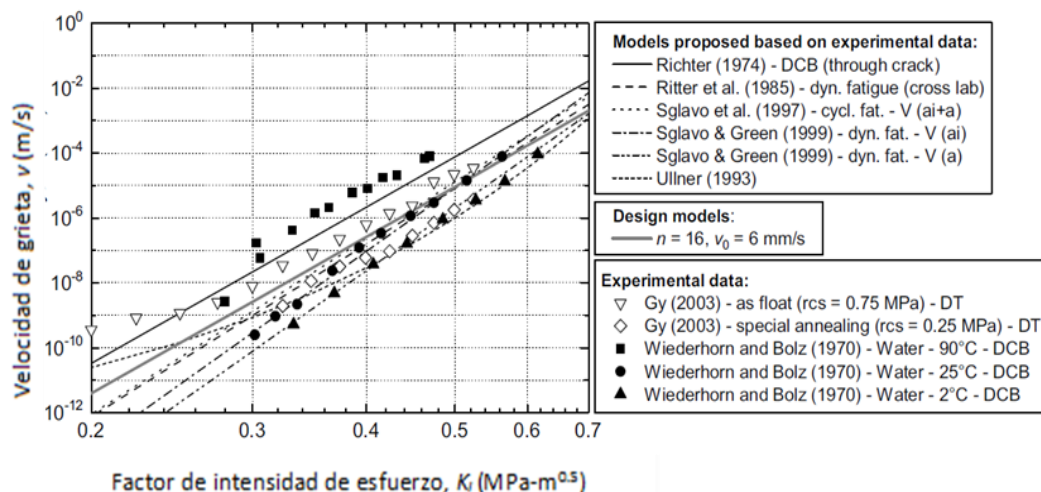
$$v_0 = S \cdot K_{IC}^n \quad (5.3)$$

donde S corresponde al mismo valor que $v \cdot (K_I)^{-n}$. Para estimar un primer caso, con $n = 16.0$ y $S = 5 \text{ (m/s)} \cdot (\text{Mpa}\cdot\text{m}^{0.5})^{-n}$, y asumiendo $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, se obtiene que el parámetro de velocidad v_0 es:

$$v_0 = 5(\text{m/s})(\text{Mpa}\cdot\text{m}^{0.5})^{-16} 0.75^{16} (\text{Mpa}\cdot\text{m}^{0.5}) = 0.05 \text{ m/s}$$

Tabla 5.6 Parámetros de velocidad de grieta (Tabla modificada de Haldimann, M., Luible, A. y Overed, M., 2008).

Autor	Ambiente	n (adimensional)	v_0 (mm/s)	Tipo de Prueba
Kerkhof et al. 1981	agua	16.0	50.1	Basado sobre datos experimentales de Richter en 1974
	Aire, 50 % de humedad relativa	18.1	2.47	
Sglavo and Bertoldi, 2004	Agua	26 ± 7	$3.7 \cdot 10^7$	Pruebas de fatiga dinámica
Dwivedi and Green, 1995	Ambiente	19.7 – 21.2	0.2 – 0.4	Medición directa ópticamente
		21.8	2.6	Prueba de fatiga dinámica de F4P

**Figura 5.2** Crecimiento de grieta en la región I de velocidad de grieta contra K_I .

Abreviaciones en inglés: V = endentado de Vickers, ai = endentado, a = recocido, DT = prueba de doble torsión DCB = prueba de viga con doble voladizo, dyn. fat. = fatiga dinámica, rcs = núcleo de esfuerzo residual (gráfica tomada de Haldimann, M., 2006).

La forma más sencilla de visualizar estos parámetros es en la región I, graficando la velocidad de propagación de grieta (v) contra el factor de intensidad (K_I). Donde, v_0 representa el punto de intersección con el eje de las ordenadas o eje de la velocidad, cuando $K_I = K_{IC}$. Y el parámetro n es la pendiente de una línea recta que ajusta los diversos valores de cada grupo de experimentos. También se puede establecer un modelo de diseño (Haldimann, 2006) con $v_0 = 6$ mm/s y $n = 16$ como se muestra en la Figura 5.2.

En conclusión, para un diseño estructural de elementos de vidrio bajo condiciones ambientales se considera suficiente asumir un valor de n igual a 16, mientras que para el diseño de dos condiciones distintas se puede asumir:

- Para elementos de vidrio expuestos al ambiente exterior $v_0 = 6$ mm/s (valor considerablemente conservador de acuerdo con la Figura 5.2)
- Para elementos de vidrio sumergidos en agua $v_0 = 30$ mm/s.

Para condiciones controladas en laboratorio, los valores de v_0 van de 0.01 mm/s a 0.035 mm/s.

5.1.5 Parámetros de condición de superficie (θ_0 , m_0)

Estos parámetros son los encargados de representar en forma global la condición superficial del vidrio y su capacidad de resistencia ambiental. Específicamente, estos parámetros, m_0 y θ_0 , son empleados en la predicción de la resistencia de un vidrio gobernado por un número variable de fisuras sobre su superficie (VFAS), modelo explicado en las secciones 3.2.9 y 4.5. La Tabla 5.7 fue elaborada por Haldimann (2006) con datos experimentales de pruebas. El objetivo de su trabajo consistió en demostrar la aplicabilidad de su modelo para la estimación de estos parámetros ante diferentes condiciones de superficie de vidrio (nuevo, intemperizado y daño inducido artificialmente), así como para establecer relaciones entre los diversos tipos de pruebas (F4P y CDA). Algunos de los valores utilizados para estimar los parámetros de m_0 y θ_0 , corresponden a $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, $n = 16$, $Y = 1.12$ y $v_0 = 0.01 \text{ mm/s}$, este último no es función de m_0 .

Tabla 5.7 Parámetros de condición de superficie de pruebas de laboratorio en condiciones ambientales [n = 16, v₀ = 0.01 mm/s] (Tabla modificada de M. Haldimann, Andreas Luble y Mauro Overed, 2008).			
	A (cm ²)	θ_0 (Mpa)	m_0 (adimensional)
Vidrio nuevo			
DIN 1249-10:1990	2400	62.89	4.94
Brown		70.21	6.39
Beason and Morgan		60.27	7.88
Fink	23.8	61.20	6.30
Haldimann de datos de Ontario Research Foundation (ORF).		62.95	8.09
Haldimann de pruebas inertes	20.4	67.57	7.19
Ventanas de vidrio intemperizado			
Beason		27.65	5.25
ASTM E 1300-04		40.93	6.13
Fink	23.8	20.82	3.76
Vidrio con daño artificial inducido homogéneamente en la superficie			
DELR/prEN 1374	2400	28.30	20.59
Blank	2400	35.37	33.19
Blank	2.54	33.29	23.53

5.1.6 Profundidad inicial de una fisura de superficie (a_i)

El parámetro de profundidad de grieta inicial, es un parámetro físico real de un vidrio que es difícil de detectar y de medir a simple vista; sin embargo, asombrosamente se ha logrado medir en el origen de la falla (Figura 5.3). Esto lo logró Lindqvist, M. en el año 2013, al medir la profundidad de grieta que iniciaba la falla del elemento de vidrio al asociarse con el esfuerzo de rotura bajo pruebas de flexión de 4 puntos.

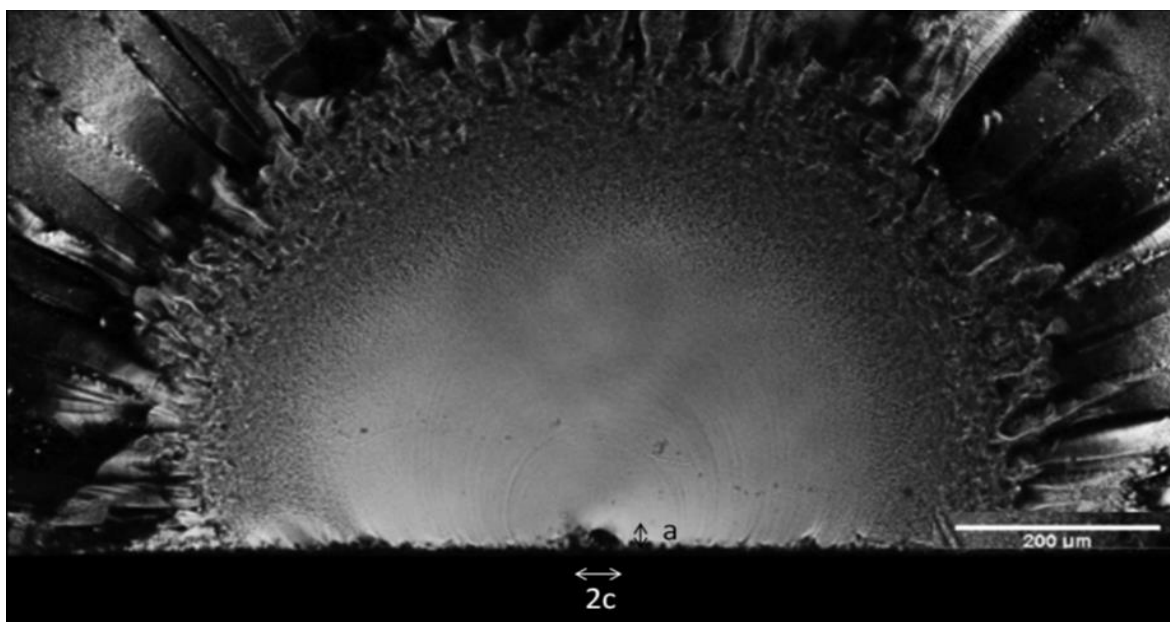


Figura 5.3 Ilustra la profundidad de grieta a y la longitud de grieta $2c$ en el origen de la fractura (Lindqvist, M., 2013).

5.1.7 Resistencia residual en el vidrio (σ_r)

Como sabemos, la resistencia residual σ_r es una propiedad que presentan únicamente los vidrios tratados térmicamente (termo-endurecido y templado), ya que para vidrio recocido este valor es aproximadamente cero ($\sigma_r \approx 0$). La resistencia residual es considerablemente mayor que la resistencia inherente de un vidrio, por lo que beneficia mucho la práctica del diseño estructural, ya que además el esfuerzo residual es independiente del esfuerzo aplicado, de las condiciones de superficie y de las condiciones ambientales. Una forma correcta de verificar que la resistencia residual se encuentra por encima de la resistencia inherente del vidrio, se obtiene a través de estadísticas de vidrios tratados térmicamente para sus diferentes espesores. En las Tablas 5.8 y 5.9 se presentan las estadísticas de 156 especímenes de vidrio termo-endurecido y de 597 especímenes de vidrio templado.

Tabla 5.8 Análisis de datos estadísticos del esfuerzo residual para vidrio termo-endurecido (Haldimann, M., 2006)

Espesor	(mm)	6	8	10	HSG
Especímenes	Núm.	20	61	75	156
Mínimo	Mpa	64.3	52.4	42.5	42.5
Máximo	Mpa	86.7	85.1	66.5	86.7
Media	Mpa	72.1	62.5	49.3	57.4
Desviación estándar	Mpa	6.12	6.13	5.36	10.15
Coefficiente de variación	%	8.49	9.81	10.89	17.69
percentil 5 de una Distribución normal	Mpa	62.1	52.4	40.4	40.7
percentil 2 de una Distribución normal	Mpa	59.6	49.9	38.2	36.5

Tabla 5.9 Análisis de datos estadísticos del esfuerzo residual para vidrio templado
(Haldimann, M., 2006).

Espesor	(mm)	6	8	10	15	FTG
Especímenes	Núm.	20	9	503	65	597
Mínimo	Mpa	109.2	98.2	93.2	93.2	93.2
Máximo	Mpa	128.5	114.5	192.1	173.6	192.1
Media	Mpa	121.8	105.1	137.0	121.3	134.3
Desviación estándar	Mpa	5.09	5.75	23.34	17.08	23.11
Coefficiente de variación	%	4.18	5.47	17.03	14.08	17.21
5 percentil de una Distribución normal	Mpa	113.4	95.6	98.6	93.2	96.3
2 percentil de una Distribución normal	Mpa	111.3	93.2	89.1	86.2	86.8

Con base en estos datos se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Los valores de los percentiles 2 y 5 pueden servir como base reglamentaria para el diseño estructural de vidrios tratados térmicamente.
- Un vidrio termo-endurecido pierde resistencia residual a medida que se incrementa su espesor.

La resistencia residual sería muy confiable ante un estricto control de calidad, lo cual depende de cada proveedor o fabricante. En referencia a los bordes de un vidrio termo-endurecido, su resistencia residual es 50% mayor que la resistencia residual de su superficie, esto se debe a la distribución de la temperatura a lo largo de los bordes durante el proceso de templado y de enfriado.

Actualmente se pueden hacer simulaciones mediante programas de cómputo comerciales del proceso térmico de templado en el vidrio, con el objetivo de conocer más acerca de la distribución y valores de la resistencia residual en borde y superficie como función de la geometría del vidrio. Sobre todo esto se vuelve indispensable en el tipo de conexiones puntuales o especiales; como ejemplo, está el trabajo de Bernard, F. y Daudeville, L., 2009.

Pruebas Experimentales

6.1 Introducción

Las pruebas de fatiga dinámica de laboratorio descritas en la sección 3.1.2, específicamente la referente a la configuración de prueba coaxial de doble anillo (CDA), se desarrolló experimentalmente en este trabajo bajo condiciones ambientales (temperatura ambiente). La condición ambiental bajo tasa de esfuerzo de más de 20 MPa/s (Haldimann, M, 2006) es la condición inerte necesaria para evitar el crecimiento subcrítico de grieta, la cual causa la dispersión de los resultados de resistencia de falla en especímenes de vidrio. Para las pruebas CDA en condiciones ambientales o no inertes se logran bajo velocidades de esfuerzo menores a 20 MPa/s, donde el crecimiento subcrítico de grieta no es evitado durante el ensayo. Para finalmente con estas condiciones de prueba estudiar los efectos que aguarden sobre las propiedades del vidrio y sobre los parámetros de condición ambiental de superficie m_0 y θ_0 , a implementar en el modelo probabilístico. A continuación se muestran los detalles particulares de las pruebas realizadas sobre diferentes espesores de vidrio recocido nuevo, y así como los resultados obtenidos en relación a esfuerzos y deformaciones de falla, su historia de carga y deflexiones, e identificación de los mecanismos de colapso.

6.2 Prueba CDA en condiciones ambientales

6.2.1 Condición inerte

Los especímenes de vidrio para una configuración de prueba CDA previamente se preparan en condiciones inertes antes de llevarlos a la condición de falla, con el objetivo de evitar el crecimiento subcrítico de grieta (Sección 4.2.1). Por lo tanto, sin un crecimiento subcrítico de grieta, los especímenes de vidrio en condiciones inertes pueden alcanzar el estado de resistencia inerte o la falla inerte. Este estado de resistencia es considerado como el más confiable por la poca dispersión que hay en los resultados obtenidos. Por lo que, la condición inerte resulta ser muy sencilla, rápida y económicamente viable de reproducir si simplemente se aplica una tasa de carga de más de 20 MPa/s, en caso contrario se puede recurrir a las siguientes acciones:

1. Pruebas en condiciones de vacío, ambiente completamente seco o de baja temperatura.
2. Pruebas ambientales de los especímenes con un recubrimiento hermético.

Estas opciones que se tienen para conseguir las condiciones inertes en un espécimen de vidrio presentan cada una los siguientes inconvenientes:

- El mantener una temperatura constante durante toda la prueba resulta ser difícil y costoso.
- El material hermético de cada espécimen requiere investigación para descartar una posible influencia en los resultados.
- Dificultad para disponer de una cámara de vacío especialmente para pruebas CDA.

6.2.1 Condición no inerte

Son las pruebas CDA en condiciones ambientales a baja velocidad de esfuerzo. La velocidad de esfuerzo generalmente no supera los 20 MPa/s y la determinación de los esfuerzos de falla esperados por esta condición se afectan por el crecimiento subcrítico de grieta.

Las secciones siguientes plantean los experimentos bajo estas dos condiciones antes mencionadas, pero antes se describe el equipo usado para las pruebas coaxiales de doble anillo.

6.3 Descripción del material de prueba

La configuración de prueba CDA sobre los especímenes se hizo con anillos idénticos a las pruebas que fueron realizadas por Haldimann (2006), Overed (2002) y Dalglish y Taylor (1990). Los resultados reportados en los trabajos antes mencionados conforman una base estadística de un número importante de resultados experimentales desarrollados mediante la prueba CDA. Las dimensiones de los diámetros de estos anillos son: para el anillo de carga de 51 mm de diámetro y para el anillo de reacción de 127 mm diámetro. En la Figura 6.1 se muestra una fotografía de los anillos utilizados en nuestro trabajo experimental.



Figura. 6.1 Vista de anillos de reacción (izquierda) y de carga (derecha).

De acuerdo con estas dimensiones, los anillos cumplen con algunas de las recomendaciones de la norma ASTM C 1499-05 para determinar monotónicamente la resistencia a flexión equibiaxial de cerámicos avanzados (vidrio) a temperatura ambiente. Sus recomendaciones están definidas por una serie de ecuaciones, donde la primera de ellas está dada por una relación entre los anillos de carga y de apoyo que debe encontrarse dentro del intervalo definido por la siguiente expresión de desigualdad:

$$0.2 \leq D_L / D_S \leq 0.5 \quad (6.1)$$

donde, D_L es el diámetro del anillo de carga y D_S corresponde al diámetro del anillo de apoyo. Entonces la relación de nuestros anillos es $51 \text{ mm} / 163 \text{ mm} = 0.31$. Sin embargo, la norma C 1499-05 recomienda que para muestras con $E < 100 \text{ GPa}$ y $\sigma_f > 1 \text{ Mpa}$, la relación D_L/D_S sea igual a 0.2.

La segunda recomendación está definida con base en el radio de curvatura (r) que deben tener los anillos, el cual debe encontrarse dentro del intervalo:

$$h / 2 \leq r \leq 3h / 2 \quad (6.2)$$

donde, h es el espesor de la muestra. Como esta relación depende del espesor de la muestra, muchas veces se dificulta contar con los anillos correspondientes para cada una de las muestras construidas con diferente espesor.

Una tercera recomendación corresponde a la adecuación del espesor de las muestras:

$$\frac{D_s}{10} \geq h \geq \sqrt{2\sigma_f D_s / 3E} \quad (6.3)$$

donde, recordemos que E es el módulo de elasticidad. El término a la derecha de la desigualdad 6.3 es difícil de evaluar, ya que se requiere del conocimiento previo de los valores esperados del esfuerzo de falla para un material frágil como es el caso del vidrio.

La cuarta y última recomendación es para la selección de la muestra y del diámetro del anillo de apoyo, tal que la diferencia entre diámetros ($D - D_s$) se encuentre en el intervalo:

$$2 \leq \frac{D - D_s}{h} \leq 12 \quad (6.4)$$

donde, D es el diámetro de un espécimen con sección circular. En el caso de muestras rectangulares se estima un diámetro equivalente, D , definido con la siguiente expresión:

$$D = \frac{l}{0.90961 + 0.12652 \frac{h}{D_s} + 0.00168 \ln \frac{l - D_s}{h}} \quad (6.5)$$

donde, $l = 0.5(l_1 + l_2)$, l_1 y l_2 son las dimensiones de los lados que forman las muestras rectangulares. Las unidades para evaluar estos parámetros tienen que ser consistentes, por ejemplo, MPa y mm.

Si se sigue adecuadamente la mayoría de las cuatro recomendaciones mencionadas anteriormente, se podrían emplear perfectamente las ecuaciones que se presentan a continuación, estas se fundamentan en la teoría elástica lineal de los materiales (deflexiones no mayores a un cuarto de h) para la determinación del esfuerzo de falla, la deflexión e incluso el módulo de elasticidad de las muestras; que depende de las deflexiones y cargas de falla para su determinación.

Para el cálculo de la resistencia (C 1499-05):

$$\sigma_f = \frac{3F}{2\pi h^2} \left[(1 - \mu) \frac{D_s^2 - D_L^2}{2D^2} + (1 + \mu) \ln \frac{D_s}{D_L} \right] \quad (6.6)$$

Para el cálculo de la deflexión o para el módulo de elasticidad (C 1499-05):

$$\delta = \frac{3F(1 - \mu^2) D_L^2}{8\pi E h^3} \left(\frac{D_s^2}{D_L^2} \left[1 + \frac{(1 - \mu)(D_s^2 - D_L^2)}{2(1 + \mu) D^2} \right] - \left(1 + \ln \frac{D_s}{D_L} \right) \right) \quad (6.7)$$

donde, F es la carga máxima de rotura de una muestra de vidrio (en Newton), μ es la relación de Poisson y el resto de los parámetros ya se definieron en las ecuaciones 6.1 y 6.4.

Entre otros aspectos a considerar, en la norma C 1499-05 se recomienda un análisis posterior de los resultados para su validación, a través de la determinación del origen y patrón de grietas que se presenta en las muestras. En la Figura 6.2 se observa esquemáticamente los mecanismos de falla que se pueden presentar en los especímenes. De acuerdo con la Figura 6.2

Capítulo 6 Pruebas Experimentales

existen casos para los cuales deben ser invalidados los resultados de las pruebas, correspondientes a los siguientes aspectos: cuando la falla inicia en el borde de la muestra o cuando el origen de la falla se presenta fuera del anillo de carga, generalmente en estos dos casos la resistencia de falla es baja y las muestras presentan un número pequeño de grietas.

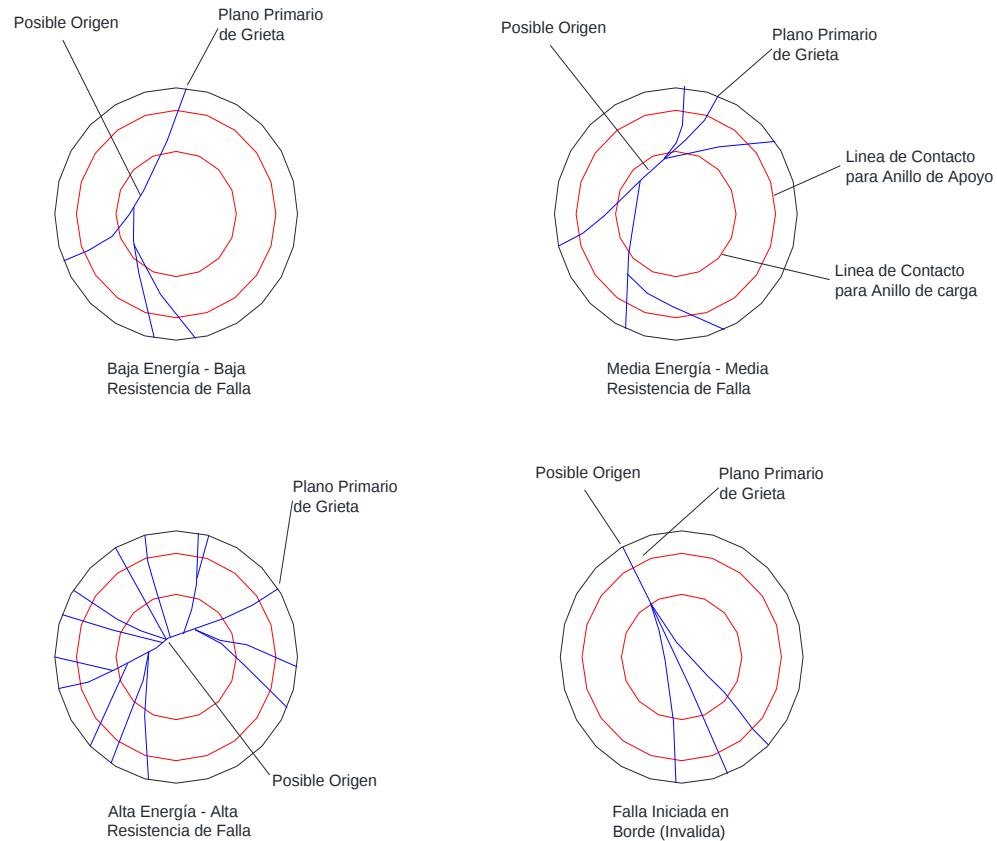


Figura 6.2 Mecanismo de agrietamiento de muestras de vidrio.

Cuando resulta difícil cumplir en la totalidad los lineamientos de las ecuaciones 6.1 a 6.4, como fue el caso de algunos de nuestros especímenes, se puede desarrollar un modelo analítico para evaluar los resultados de estas expresiones o mediante la medición y comprobación de los esfuerzos y deformaciones medidos con galgas extensiométricas y máquina Instron.

Las dimensiones de nuestros anillos difieren de los valores correspondientes a la norma Europa para pruebas CDA descrita en la sección 3.1.2. En la Tabla 6.1 se presentan las dimensiones de cada uno de los anillos y de las muestras implementadas en nuestro caso, así como los valores recomendados por la norma Europea. Finalmente, la Figura 6.3 ilustra los detalles de la geometría de los anillos.

Tabla 6.1 Configuración de pruebas CDA.

Configuración de prueba	Radio de anillo de carga (mm)	Radio de anillo de reacción (mm)	Área de prueba (mm ²)	Longitud de lado de espécimen (mm)
Nuestro estudio	25.5	63.5	2043	200 x 200
EN 1288-2:2000	300	400	282,743.3	1000 x 1000
EN 1288-5:2000	9	45	254.5	100 x 100

Las dimensiones de anillos y especímenes utilizados en nuestro trabajo tienen las siguientes ventajas con respecto a las sugeridas por las normas Europeas:

- Se evita escalamiento excesivo de los resultados por efecto de un tamaño muy reducido de muestras, con respecto a la norma EN 1288-5:2000.
- Se puede trabajar frente a un microscopio para identificar el origen y tamaño de la grieta de falla, con respecto a la norma EN 1288-2:2000.

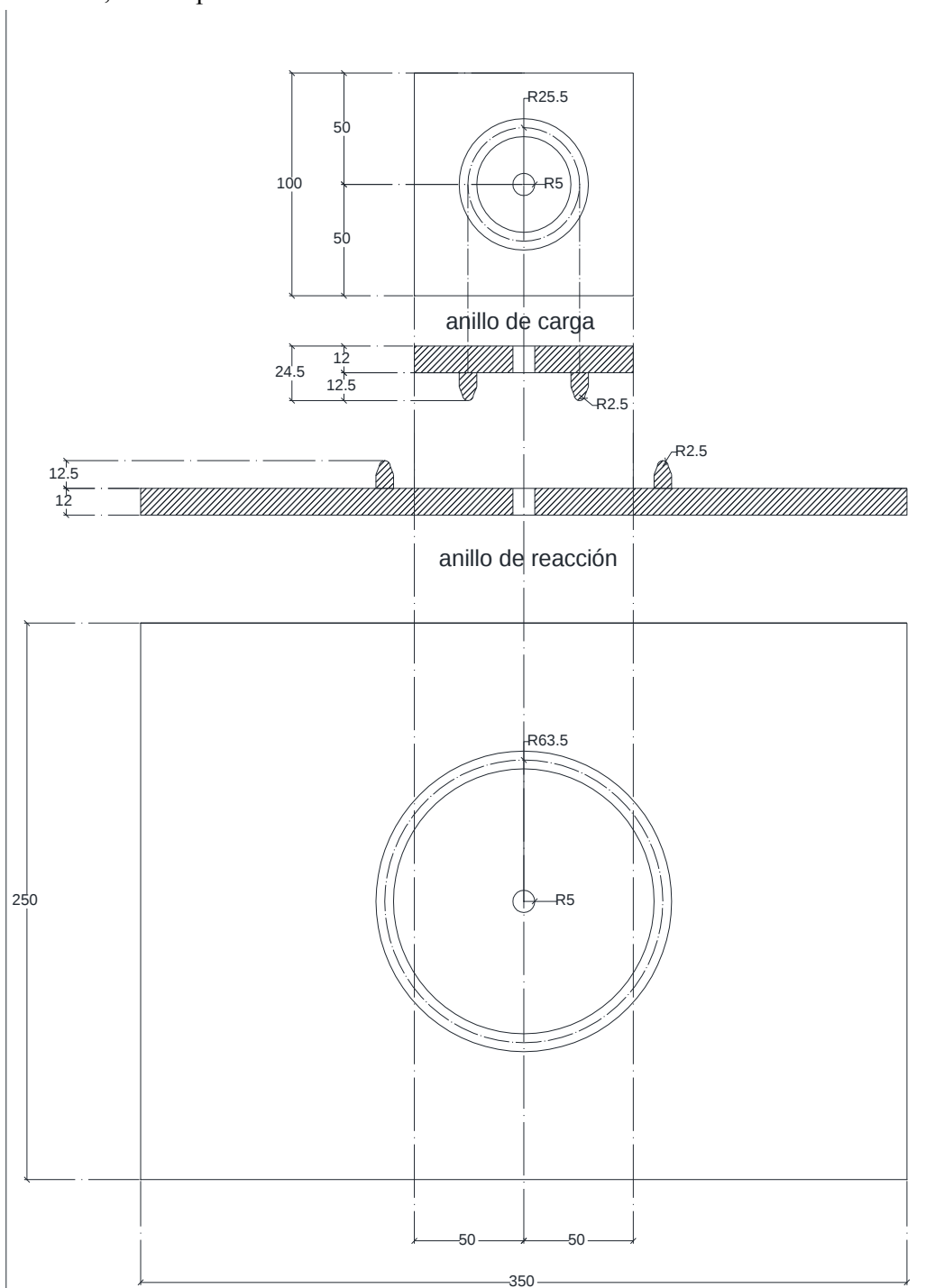


Figura 6.3 Esquema de equipo construido en acero para la prueba coaxial de doble anillo (Escala: 1: 3 y acotación: mm).

6.4 Pruebas experimentales con vidrio recocido nuevo

Las pruebas CDA y los correspondientes esfuerzos de falla son esenciales para estimar los parámetros de escala y de forma: θ y β , respectivamente, que definen la función de densidad de probabilidad Weibull. Por lo que es necesario conducir una serie de experimentos sobre especímenes que sean representativos de los diferentes espesores de vidrio implementados en el campo de la construcción. Para este trabajo se condujeron un total de 79 pruebas correspondientes a especímenes cuadrados de 200 x 200 mm y de varios espesores, en donde algunos de estos incluyeron galgas extensiométricas para medir la historia de deformaciones, lo cual se describe en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Especímenes de vidrio recocido nuevo para prueba CDA bajo tasa de carga de 79 kN.			
Espesor nominal (mm)	Núm. de muestras sin galgas	Núm. de muestras con galgas	Total
3	8	2	10
4	6	3	9
5	9	1	10
6	8	2	10
8	7	3	10
10	7	3	10
12	7	3	10
19	7	3	10

Las pruebas experimentales del tipo CDA fueron realizadas en el laboratorio de Ensayos Mecánicos del Instituto Tecnológico de Morelia, para ello, todos los especímenes fueron de forma cuadrada de un tamaño de 20 cm por lado, como se describió previamente y bajo una tasa de carga de 79 kN para reproducir diferentes tasas de esfuerzo sobre las muestras. Los principales parámetros fueron registrados en todos los ensayos con la ayuda de la máquina universal Instron-5500R (Figura 6.4), que tiene una capacidad de carga de 10 Ton; estos parámetros corresponden a la deflexión en el espécimen justamente debajo del anillo de carga, valor que es aproximadamente igual a la deflexión máxima vertical del centro de la muestra, a la duración de la falla y a la fuerza o esfuerzo de falla (σ_f). Para algunas de las muestras se midieron las deformaciones que se presentaron directamente sobre la superficie del vidrio en tensión con la incorporación de dos galgas extensiométricas (strain gages en inglés) uniaxiales del tipo KFG-2mm-120 Ω -C1 colocadas a 90° una de la otra, como se puede ver en la Figura 6.5. La adquisición de datos de las deformaciones registradas por las galgas extensiométricas se realizó mediante el equipo de National Instruments NI9219, y de un programa desarrollado en el software comercial Labview.

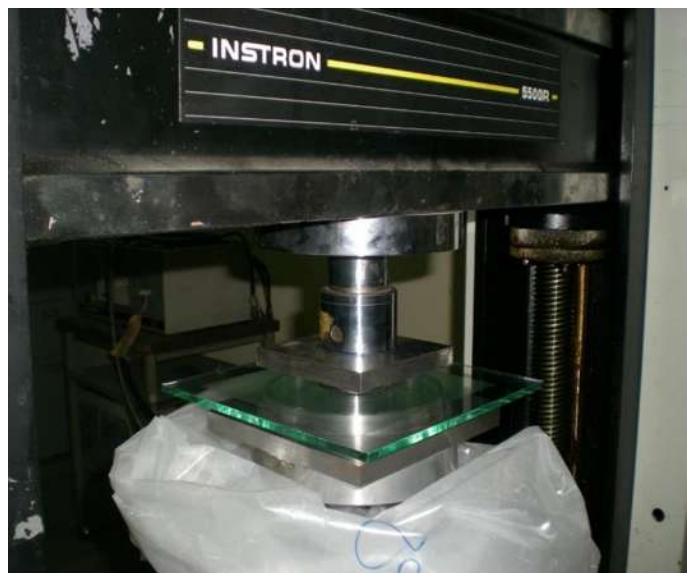


Figura. 6.4 Vista de la máquina universal Instron-5500R.

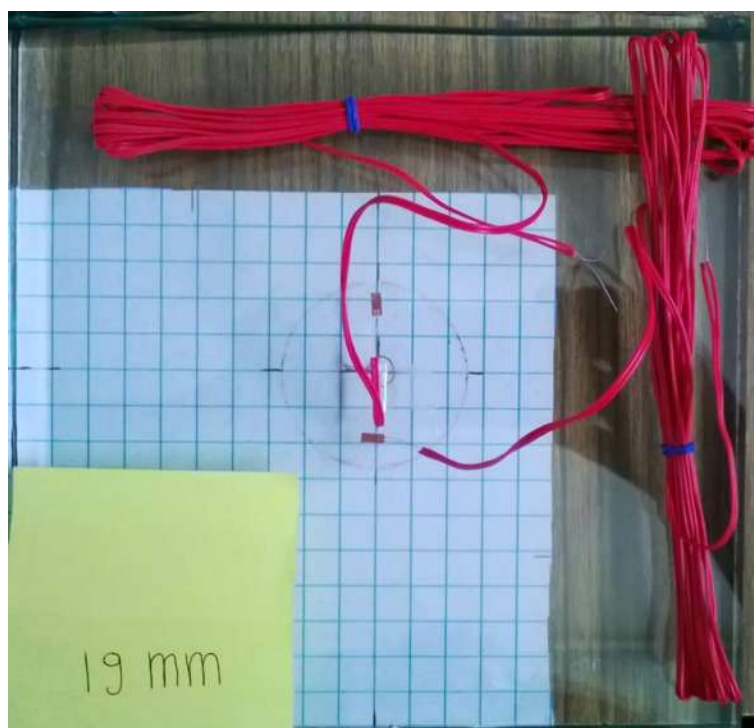


Figura. 6.5 Localización de las galgas extensiométricas sobre la superficie de una muestra de 19 mm de espesor (galgas colocadas perpendicularmente entre sí).

6.4.1 Descripción de los resultados obtenidos

Todos los resultados que corresponden a las muestras indicadas en la Tabla 6.2 se obtuvieron por medio de la máquina universal Instron y fueron registrados en archivos con extensión tipo *raw*, todos los archivos correspondientes a cada espécimen de muestra se anexaron al disco compacto que acompaña a este trabajo de tesis. En estos archivos podemos encontrar la historia de cargas y de deflexiones, como las que se muestran en las Figuras 6.6 y 6.7.

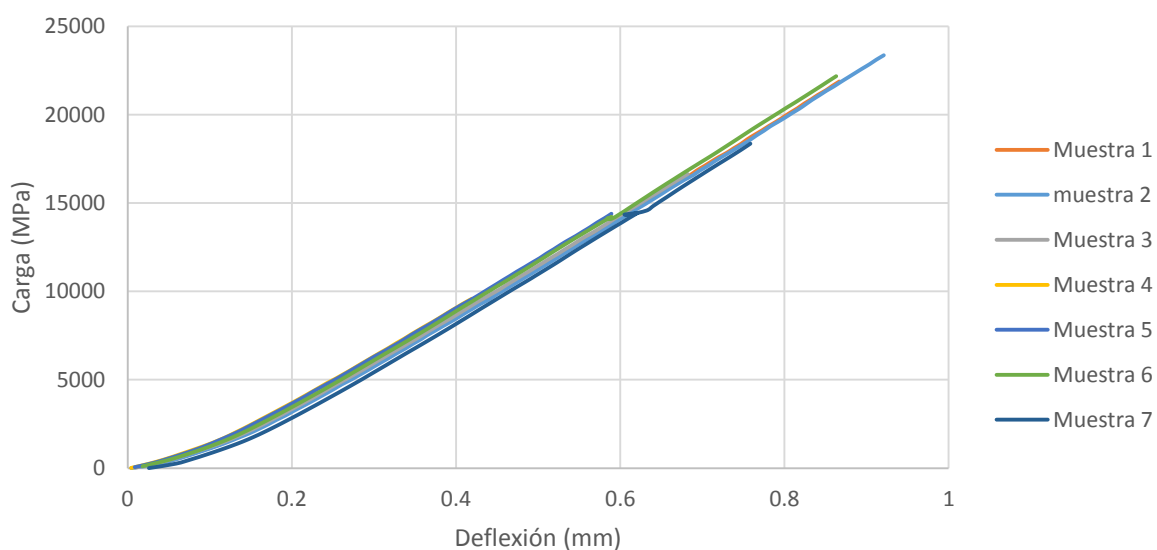


Figura 6.6 Carga vs. deflexión de varias muestras de vidrio recocido nuevo de 6 mm de espesor.

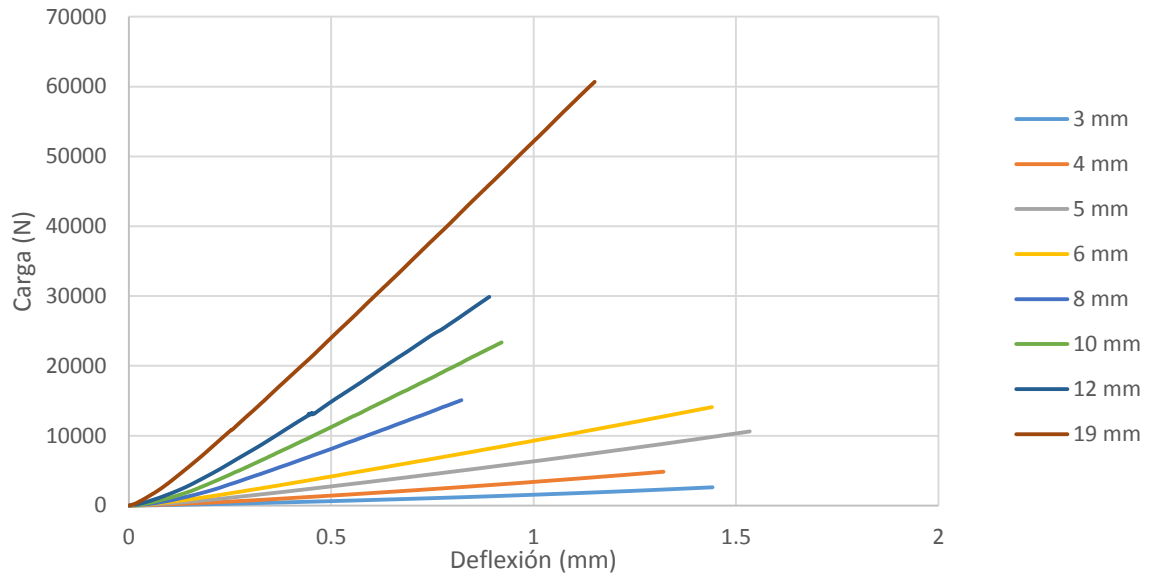


Figura 6.7 Carga vs. Deflexión de muestras de vidrio para diferentes espesores.

Como se observa en las gráficas anteriores, los especímenes de vidrio presentan un comportamiento frágil, por lo que repentinamente colapsa el vidrio en cientos de fragmentos agudos, esto lo podemos observar a través de la Figura 6.8.

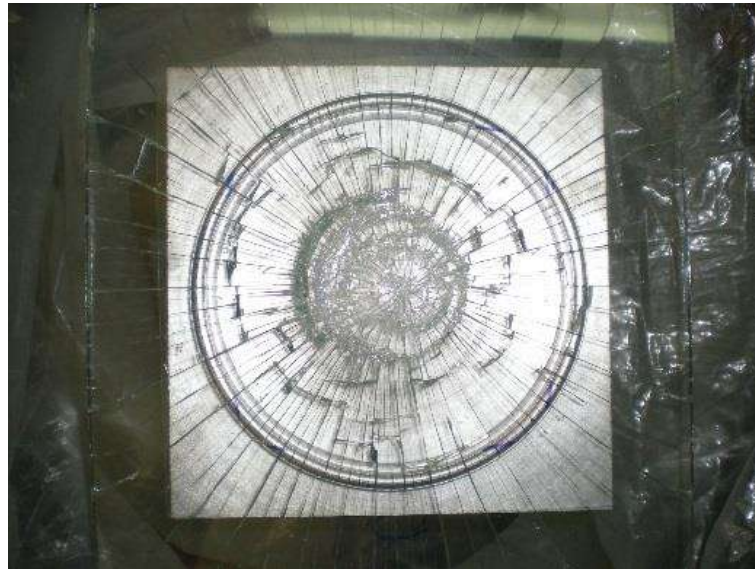


Figura 6.8 Comportamiento de falla frágil para una muestra de 5 mm de espesor.

El comportamiento de falla de todas las muestras fue similar a la fotografía que se presenta en la Figura 6.8. Sin embargo, hubo muestras que fueron invalidadas, debido a que los anillos no fueron coaxiales entre si sobre la muestra, por la baja energía de falla con un número pequeño de grietas o porque el origen de falla se ubicaba fuera del anillo de carga, estas fueron algunas de las principales razones por las que se tuvieron que invalidar los resultados de las pruebas (de acuerdo a la norma C 1499-05), es decir, los resultados obtenidos de estas pruebas no se utilizaron para la definición de la condición de la superficie del vidrio. Algunos ejemplos de las muestras invalidadas

se presentan en la Figura 6.9. Un total de 9 muestras de vidrio fueron invalidadas. En el Apéndice B de este trabajo se presentan fotografías con los patrones de falla de alguna de las muestras.

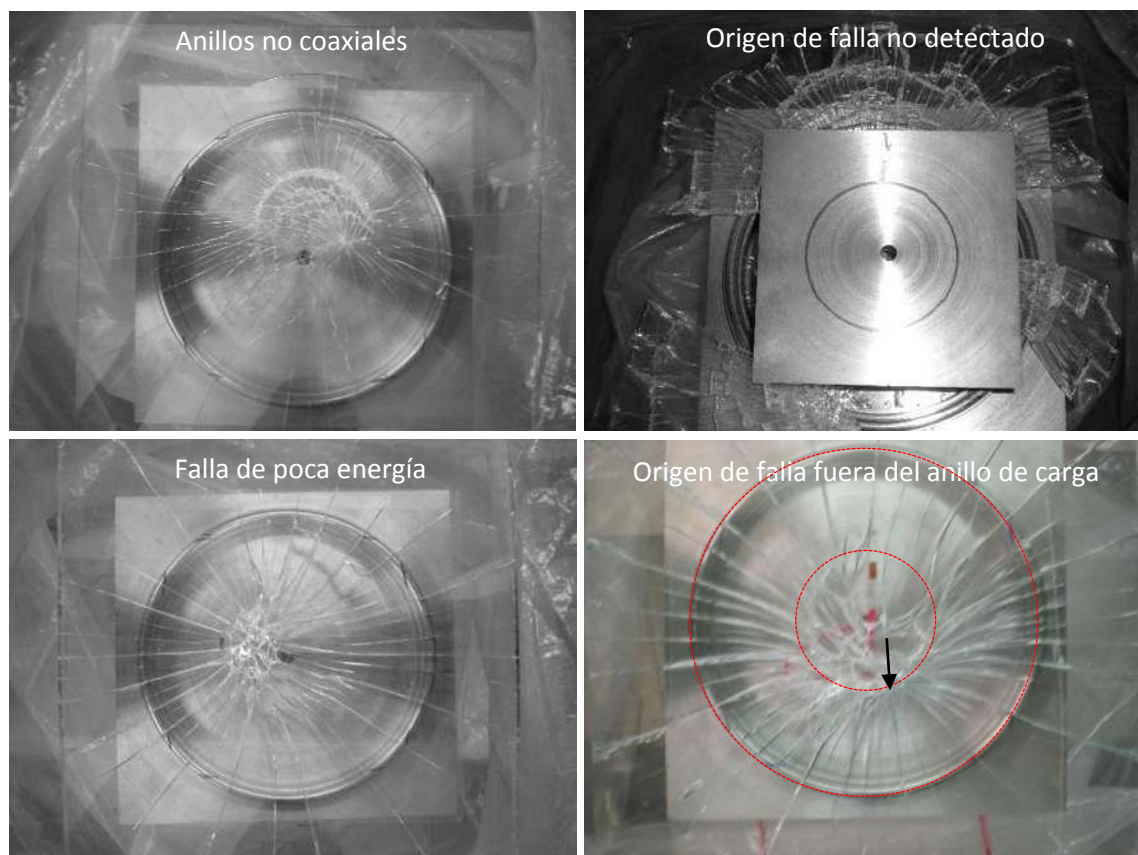


Figura 6.9 Conjunto de muestras de vidrio invalidadas.

Toda la información correspondiente a la falla de cada una de las muestras de vidrio recocido nuevo, obtenida con la máquina universal, se incorporó como una base de datos dentro del Apéndice A. En la Tabla 6.3 solamente se mostraran algunos de los datos contenidos en esta base de datos, los cuales están asociados al esfuerzo de falla de cada una de las muestras de vidrio recocido nuevo, además acompañados con la estimación de los parámetros que definen la densidad de probabilidad Weibull, que representan la condición del material.

Tabla 6.3 Resultados de falla de muestras de vidrio recocido nuevo.					
Clave	Espesor (mm)	Fuerza de falla (N)	Esfuerzo de falla (MPa)	β	θ (MPa)
M_1_3mm***	3.06	-1488.36	93.65	6.79 ^ψ	162.19 ^ψ
M_2_3mm***	2.96	-1838.80	123.25		
M_3_3mm	3.00	-2867.87	187.13		
M_4_3mm	2.99	-2379.94	156.86		
M_5_3mm	2.97	-1931.99	128.62		
M_6_3mm	2.9	-1408.43	98.35		
M_7_3mm	2.945	-2361.06	159.87		
M_8_3mm	2.9	-2617.03	182.74		
M_9_3mm	2.88	-1935.50	137.04		
M_10_3mm	2.895	-2259.13	158.30		

Continuación de Tabla 6.3 Resultados de falla de muestras de vidrio recocido nuevo					
Clave	Espesor (mm)	Fuerza de falla (N)	Esfuerzo de falla (MPa)	β	θ (Mpa)
M_1_4mm	3.97	-5133.56	191.28	3.41 ^ψ	140.64 ^ψ
M_2_4mm	3.95	-2250.55	84.71		
M_3_4mm	3.98	-2576.91	95.77		
M_4_4mm	3.94	-4846.17	183.80		
M_5_4mm	3.96	-3576.76	133.94		
M_6_4mm	3.92	-2647.08	101.16		
M_7_4mm	3.88	-3465.38	135.18		
M_8_4mm	3.925	-2166.33	82.58		
M_9_4mm*	4.09	-1367.91	44.20		
M_1_5mm	5.06	-8588.08	197.37	4.35 ^ψ	150.11 ^ψ
M_2_5mm	5.06	-4306.24	98.77		
M_4_5mm**	4.94	-10618.20	255.52		
M_5_5mm	5.00	-6416.69	150.73		
M_6_5mm	4.94	-5201.96	125.44		
M_7_5mm	4.95	-7336.90	175.84		
M_8_5mm	4.97	-5136.87	122.13		
M_9_5mm	4.98	-3914.90	92.70		
M_10_5mm	4.95	-5460.59	130.87		
M_1_6mm	5.85	-6629.80	113.96	5.06 ^ψ	187.57 ^ψ
M_2_6mm	5.85	-7072.81	121.58		
M_3_6mm	5.75	-11142.72	198.26		
M_4_6mm	5.76	-10336.76	182.96		
M_5_6mm	5.82	-11357.51	197.25		
M_6_6mm**	5.70	-14095.87	255.23		
M_7_6mm	5.69	-7205.13	130.92		
M_8_6mm	5.70	-8544.60	154.71		
M_9_6mm	5.64	-12004.18	222.01		
M_10_6mm	5.69	-12297.18	223.45		
M_1_8mm	8.05	-15090.54	136.75	5.87 ^φ	126.15 ^φ
M_2_8mm*	7.87	-6832.50	64.87		
M_3_8mm	7.87	-8364.43	79.41		
M_4_8mm	7.84	-14121.82	135.10		
M_5_8mm	7.85	-15034.45	143.28		
M_6_8mm	8.11	-16510.58	147.42		
M_7_8mm	8.17	-10868.80	95.62		
M_8_8mm	8.25	-12185.41	105.27		
M_9_8mm	8.17	-10603.26	93.29		
M_10_8mm	8.23	-12988.21	112.75		
M_1_10mm	9.91	-21877.12	130.82	6.79 ^φ	125.39 ^φ
M_2_10mm	9.675	-23361.01	146.56		
M_3_10mm	9.71	-16640.44	103.65		
M_4_10mm*	9.645	-9585.48	61.62		
M_5_10mm	9.685	-14394.52	91.77		
M_6_10mm	9.7	-22177.57	140.95		
M_7_10mm	9.75	-18358.90	116.98		
M_8_10mm^	9.63	-11465.66	72.61		
M_9_10mm	9.63	-16973.85	107.49		
M_10_10mm	9.635	-15642.60	98.95		

Continuación de Tabla 6.3 Resultados de falla de muestras de vidrio recocido nuevo					
Clave	Espesor (mm)	Fuerza de falla (N)	Esfuerzo de falla (MPa)	β	θ (MPa)
M_1_12mm	12.16	-29664.33	117.81	8.84 ^Φ	110.98 ^Φ
M_2_12mm	11.975	-29886.38	122.39		
M_3_12mm	12.155	-21133.87	84.00		
M_4_12mm	12.055	-28184.72	115.98		
M_5_12mm	12.04	-21386.02	88.22		
M_6_12mm	12.23	-22373.20	89.45		
M_7_12mm	12.28	-23329.75	92.51		
M_8_12mm	11.965	-28121.92	115.36		
M_9_12mm*	11.96	-11322.34	46.48		
M_10_12mm	11.9	-27964.13	115.97		
M_1_19mm	18.67	-60001.09	101.09	5.01 ^Φ	93.41 ^Φ
M_2_19mm	18.555	-60684.59	103.51		
M_3_19mm	18.5	-42998.27	73.78		
M_4_19mm	18.62	-69187.69	119.33		
M_5_19mm	18.495	-46615.11	81.49		
M_6_19mm	18.71	-58845.41	98.72		
M_7_19mm	18.68	-52978.31	90.79		
M_8_19mm	18.475	-38690.34	66.57		
M_9_19mm	18.715	-33199.59	55.66		
M_10_19mm	18.55	-38577.19	65.84		
* Muestra invalidada por presentar una energía de falla muy baja, seguido por un número escaso de grietas.					
** Muestra invalidada porque su origen de falla no fue posible detectarlo, al presentar una energía de falla muy elevada (explosión de la muestra).					
*** Muestra invalidada porque los anillos no son coaxiales.					
^ Muestra invalidada debido a que el origen de falla se detectó fuera del anillo de carga.					
La muestra con clave: M_3_5mm es una muestra que no presento registro de información en la máquina universal Instron.					
Ψ Parámetros de condición inerte (con tasa de esfuerzo mayor que 20 Mpa/s), β_{inerte} y θ_{inerte} .					
Φ Parámetros de condición no inerte (tasa de esfuerzo menor que 20 Mpa/s), β_{NoI} y θ_{NoI} .					

El esfuerzo de falla predeterminado en la Tabla 6.3 se calculó con la ecuación 6.6, considerando $\mu = 0.23$ y $D = 219.86$ mm.

Los dos parámetros de la densidad de probabilidad de Weibull: β y θ fueron estimados con los esfuerzos de falla para cada uno de los grupos de especímenes de diferente espesor de acuerdo con el método de máximo verisimilitud, a través de una función predefinida por Matlab [wblfit(data), donde data = vector de esfuerzo de falla]. Donde un valor alto de β , es indicativo de poca dispersión de los datos, mientras que un valor alto de θ es indicativo de una resistencia elevada. Una vez conocidos los dos parámetros de forma y de escala para la función de probabilidad de Weibull, por cada par de estos parámetros, podríamos ajustar curvas de densidad de probabilidad acumulada Weibull, como se muestra en la Figura 6.10. Donde se observa que los esfuerzos de falla asociados a una $P_f = 1$, para las densidades acumuladas de 8, 10, 12 y 19 mm (bajo condición no inerte) son inferiores que para la misma probabilidad de falla en las densidades acumuladas de 3, 4, 5, y 6 mm (bajo condición inerte). En seguida, resta mostrar la determinación de los modelos analíticos como función del valor de módulo de elasticidad (E) obtenido de las pruebas, pero antes, veremos si fue conveniente modelar con una función de densidad Weibull.

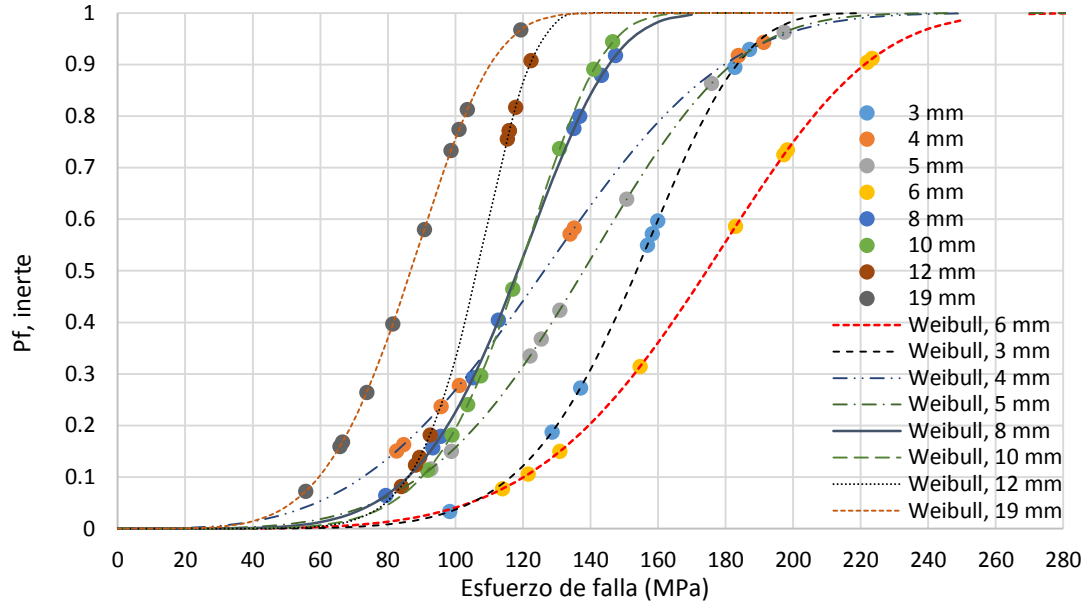


Figura 6.10 Conjunto de datos de esfuerzos de falla ajustados a la densidad de probabilidad acumulada de Weibull para la determinación de la probabilidad de falla.

6.4.1.1 Pruebas de bondad X^2 para funciones de distribución Weibull, Gamma y Lognormal

Como se observa en la Tabla 6.3, los datos de resistencia obtenidos de las pruebas de laboratorio para cada caso de espesor de vidrio se ajustaron para los parámetros que definen a la densidad de probabilidad Weibull. Sin embargo, siempre existe la duda de si la función de probabilidad asignada es la más apropiada para representar con la menor incertidumbre la variable aleatoria de esfuerzo de falla estimada con nuestros datos experimentales. Ante esta situación debimos realizar un análisis estadístico de prueba de bondad de ajuste del tipo ji-cuadrada con diferentes funciones de probabilidad. Las funciones que se consideraron para este análisis estadístico corresponden a las densidades de probabilidad Weibull, Gamma y Lognormal. En la literatura se postula que la densidad de probabilidad Weibull es la más acertada para modelar el comportamiento de materiales frágiles, a pesar de ello también se seleccionaron las funciones Gamma y Lognormal para determinar su aplicabilidad a este problema, ya que estas también se utilizan en la modelación de varios fenómenos relacionados con el comportamiento de los materiales, que son también funciones de probabilidad continuas de dos parámetros.

La prueba de bondad de ajuste ji-cuadrada (X^2) considera una muestra de n valores observados y compara las frecuencias observadas $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ en k intervalos (o de k valores) de la variable aleatoria con su correspondiente frecuencia $e_1, e_2, \dots, e_k$ de una supuesta distribución teórica, a través de la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} < c_{1-\alpha, f} \quad (6.8)$$

donde $c_{1-\alpha, f}$ es el valor de la distribución ji-cuadrada (X^2) para la probabilidad acumulada $(1-\alpha)$, la supuesta distribución teórica es un modelo aceptable, en el nivel de significancia α . En nuestro caso se consideró $\alpha = 5\%$.

A continuación se presenta un ejemplo, donde se desarrolla la prueba de bondad ji-cuadrada para los datos de resistencia de las muestras de vidrio de 3 mm de espesor de la Tabla 6.3 y la Figura 6.11 presenta su ajuste con las densidades de probabilidad Weibull, Gamma y Lognormal.

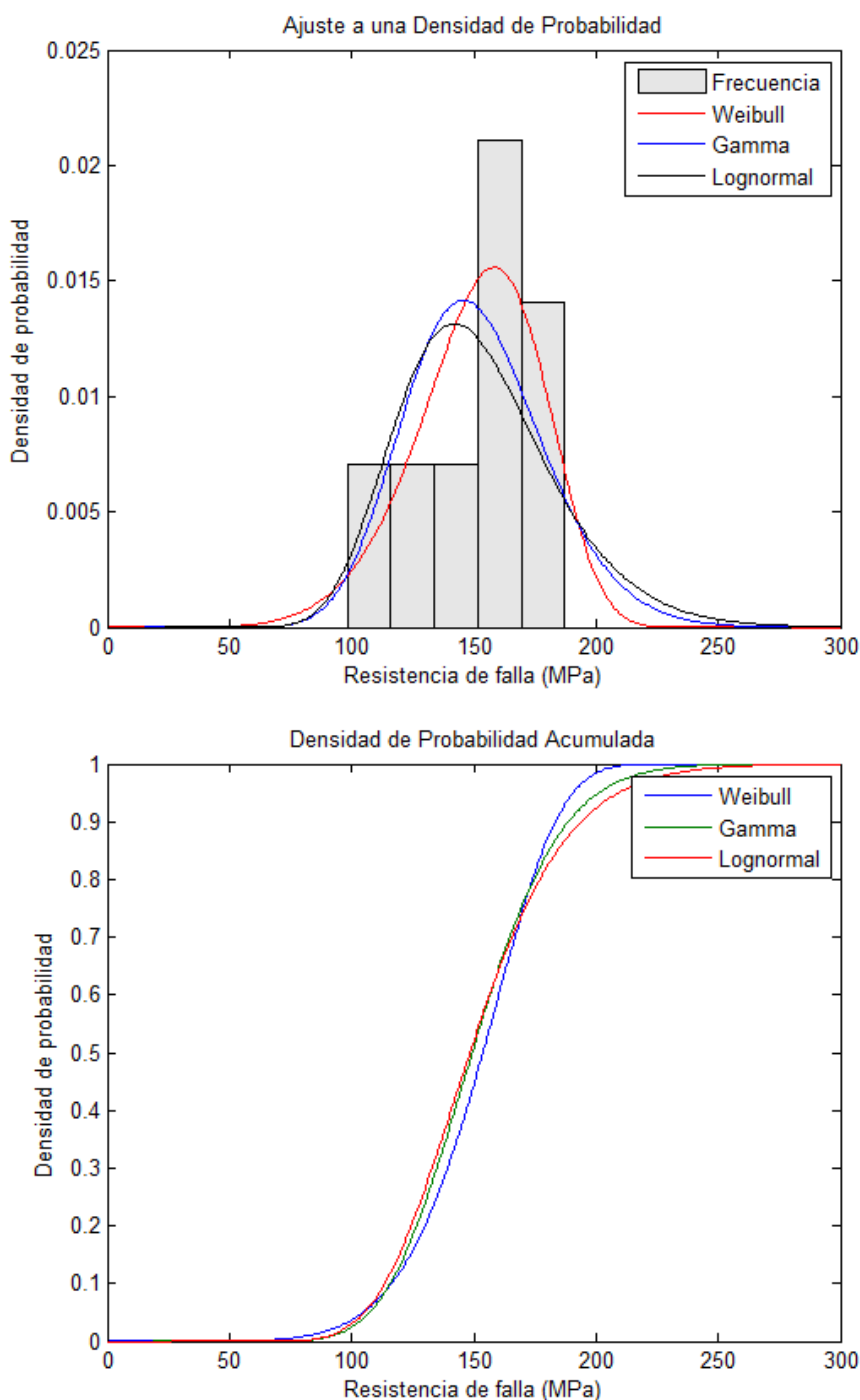


Figura 6.11 Modelos probabilísticos ajustados a las muestras de vidrio recocido de 3 mm. FDP: Weibull, Gamma y Lognormal, e histograma de frecuencias (arriba). FDA: Weibull, Gamma y Lognormal (abajo).

A continuación, en la Tabla 6.4 se muestran los dos parámetros estimados con el método de máxima verisimilitud correspondientes a los modelos Weibull, Gamma y Lognormal, en conjunto con el cálculo de su media (μ) y de su varianza (σ^2).

Tabla 6.4. Parámetros de densidad de probabilidad, media y varianza.

Nombre	Parámetro	valor	Parámetro	valor	μ (MPa)	σ^2
Weibull	$\theta =$	162.19	$\beta =$	6.79	151.48	685.08
Gamma	$k =$	27.84	$\lambda^{-1} =$	5.43	151.11	820.14
Lognormal	$\lambda =$	5.00	$\xi =$	0.21	151.69	1027.88

Tabla 6.5. Prueba de bondad ji-cuadrada para ajuste de bondad relativa.

Clase (MPa)	Frecuencia observada n_i	Frecuencia teórica e_i			$(n_i - e_i)^2 / e_i$		
		Weibull	Gamma	Lognormal	Weibull	Gamma	Lognormal
98.35-116.11	1	120.59	118.94	116.69	1.48	1.15	0.77
116.11-133.86	1	135.01	130.94	128.89	0.74	0.27	0.12
133.86-151.62	1	145.13	140.43	138.84	0.04	0.04	0.11
151.62-169.37	3	170.18	169.32	170.88	0.55	0.46	0.63
169.37-187.13	2	215.58	255.23	283.16	6.46	23.22	38.86
				$\Sigma =$	9.28	25.14	40.49

La frecuencia observada y teórica dentro de los intervalos indicados se resumen en la Tabla 6.5. En los tres casos de las distribuciones de probabilidad, el número neto de grados de libertad es $f = 5 - 1 = 4$. Con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, fue obtenido $c_{95,5} = 9.49$, con la ayuda de la función llamada en Matlab “chi2inv”. Comparando esto con los valores de $\Sigma(n_i - e_i)^2 / e_i$ calculados en la Tabla 6.5, se observa que los modelos no válidos para predecir la resistencia de especímenes de vidrio de 3 mm de espesor son las densidades Gamma y Lognormal, en cambio el modelo Weibull alcanzó el valor de $9.28 < 9.49$. En este último caso, sus parámetros tienen el nivel de confianza del 95%, el cual se presenta en la Tabla 6.4. Para los otros dos modelos debemos incrementar el tamaño de la muestra o en su defecto reconocer un nivel de confianza inferior al 95%. De esta misma forma, se realizaron las pruebas de bondad para el resto de las pruebas experimentales por espesor, el resumen de resultados se presenta en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Resumen de resultados de las Pruebas de bondad ji-cuadrada.

$\Sigma(n_i - e_i)^2 / e_i$			
Muestras	Weibull	Gamma	Lognormal
3 mm	9.28	25.14	40.49
4 mm	30.06	45.14	78.20
5 mm	17.11	27.53	46.79
6 mm	24.32	47.62	75.41
8 mm	9.77	22.00	33.91
10 mm	5.65	11.03	16.47
12 mm	5.46	11.48	15.59
19 mm	8.63	16.70	26.87

En la Tabla 6.6 se observa, que los modelos Gamma y Lognormal no son válidos para ninguno de los casos con muestras de diferente espesor y en su mayoría están lejos de acercarse al valor de 9.49. El modelo Weibull paso la prueba de bondad ji-cuadrada en cuatro ocasiones para las muestras de 3 mm, 10 mm, 12 mm y 19 mm, con 9.28, 5.65, 5.46 y 8.63, respectivamente, y otro valor cercano fue el de 9.77 perteneciente a muestras de vidrio de 8 mm de espesor. En conclusión, el modelo Weibull es el modelo apropiado para representar la probabilidad de alcanzar

un esfuerzo de falla de una placa de vidrio de acuerdo a datos de resistencia del vidrio recocido nuevo obtenidos experimentalmente.

En otro análisis, se consideró una prueba de bondad adicional, pero ahora considerando el total de las resistencias obtenidas por todas las muestras, resultados presentados en la Tabla 6.3, con el objetivo de determinar la resistencia característica del vidrio. El procedimiento es exactamente igual que para los casos previos de prueba de bondad de ji-cuadrada. En la Tabla 6.7 mostraremos los parámetros de ajuste de las funciones Weibull, Gamma y Lognormal.

Tabla 6.7. Parámetros de densidad de probabilidad, media y varianza.						
Nombre	Parámetro	valor	Parámetro	valor	μ (MPa)	σ^2
Weibull	$\theta =$	139.27	$\beta =$	3.44	125.19	1622.45
Gamma	$k =$	11.01	$\lambda^{-1} =$	11.37	125.23	1423.84
Lognormal	$\lambda =$	4.78	$\xi =$	0.31	125.32	1542.23

La Figura 6.12 muestra los ajustes de las densidades de probabilidad ante el histograma de frecuencias de todos los datos de resistencia aceptados.

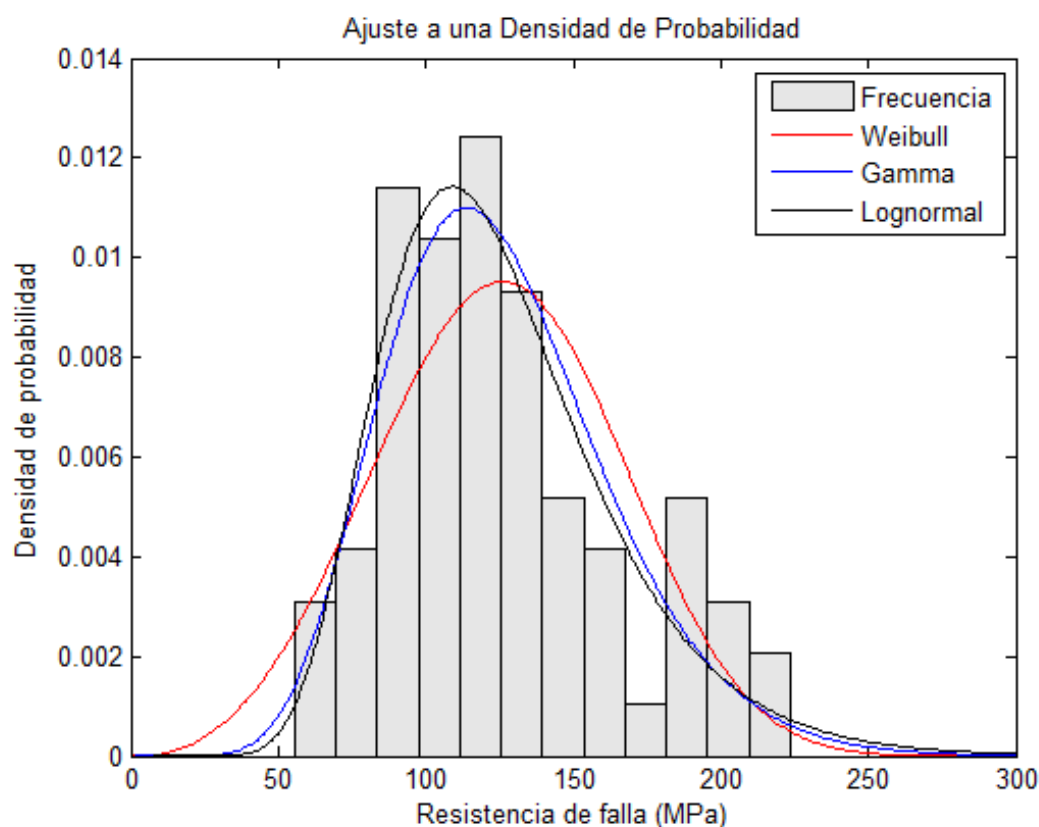


Figura 6.12 Modelos probabilísticos ajustados al conjunto de datos de la Tabla 6.3. FDP: Weibull, Gamma y Lognormal, e histograma.

Tabla 6.8. Cálculos de prueba de bondad de ajuste ji-cuadrada

Clase	Frecuencia observada	Frecuencia teórica			(n _i - e _i) ² / e _i		
		e _i					
(MPa)	n _i	Weibull	Gamma	Lognormal	Weibull	Gamma	Lognormal
55.66-69.64	3	56.28	68.57	70.82	0.72	0.51	0.94
83.62-97.60	4	72.67	80.18	80.99	0.22	0.16	0.23
97.60-111.59	11	98.32	99.24	98.30	0.60	0.75	0.60
111.59-125.57	10	115.17	112.84	111.18	0.97	0.60	0.39
125.57-139.55	12	133.60	129.07	127.18	1.69	0.85	0.58
139.55-153.53	9	148.21	143.16	141.68	1.65	0.78	0.59
153.53-167.52	5	157.50	152.76	151.88	0.76	0.25	0.19
167.52-181.50	4	166.22	162.26	162.25	0.19	0.02	0.02
181.5-195.48	1	168.68	165.04	165.34	0.20	0.54	0.51
195.48-209.46	5	184.43	183.81	186.83	0.09	0.12	0.01
209.46-223.45	3	201.22	205.93	213.64	0.01	0.06	0.58
223.45-237.43	2	244.42	274.64	307.92	3.20	12.32	27.17
Σ =	69			Σ =	10.31	16.97	31.81

Las frecuencias observada y teórica dentro de los intervalos indicados se resumen en la Tabla 6.8. En los tres casos de las distribuciones de probabilidad consideradas, el número neto de grados de libertad es $f = 12 - 1 = 11$. Con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, $c_{95,5} = 19.67$. Comparando esto con los valores de $\Sigma(n_i - e_i)^2/e_i$ calculados en la Tabla 6.8, nosotros podemos observar que el modelo no válido para la resistencia del vidrio es la Lognormal ($31.81 > 19.67$), en cambio los modelos Weibull y Gamma pasaron la prueba de bondad con los valores de 10.31 y 16.97, respectivamente, porque son menores que el valor de 19.67. Con los modelos Weibull y Gamma y sus parámetros que tienen un nivel de confianza del 95%, podemos obtener también la resistencia característica a flexión del vidrio para percentiles 5 y 0.8.

El valor característico de la resistencia a la fractura inherente de flexión dado por las pruebas coaxiales de doble anillo, estaría definido por un área de superficie en tensión de prueba de 0.00204 m^2 y una tasa de carga igual a 79 kN/s . De esta forma, los valores son: Weibull (5%) = 58.67 MPa , Weibull (0.8%) = 34.21 MPa , Gamma (5%) = 70.26 MPa y Gamma (0.8%) = 15.90 MPa . Al observar estos valores, se puede notar que la cola de la función de densidad acumulada Weibull se levanta verticalmente más pronto en comparación de la Gamma, por esta razón Weibull (0.8%) > Gamma (0.8%) y Gamma (5%) > Weibull (5%), como se observa en la Figura 6.13. Un valor característico de la resistencia del vidrio puede ser de mucha utilidad, al establecerlo de manera simplista como parámetro de esfuerzo permisible máximo. La resistencia característica del vidrio que se acaba de calcular anteriormente, con todos los datos de esfuerzo de falla de la Tabla 6.3, desde el punto de vista de diseño es conservadora, ya que incluye los resultados de las muestras bajo la condición no inerte, donde se presenta el crecimiento subcrítico de grieta.

También a continuación en la sección siguiente se determina el módulo de elasticidad (E) para el vidrio recocido nuevo de nuestros especímenes que podría estar afectado por la tasa de esfuerzo empleada y en consecuencia podría afectar el cálculo del parámetro de condición ambiental (θ_0) que se relaciona con el modelo de predicción de falla de vida útil.

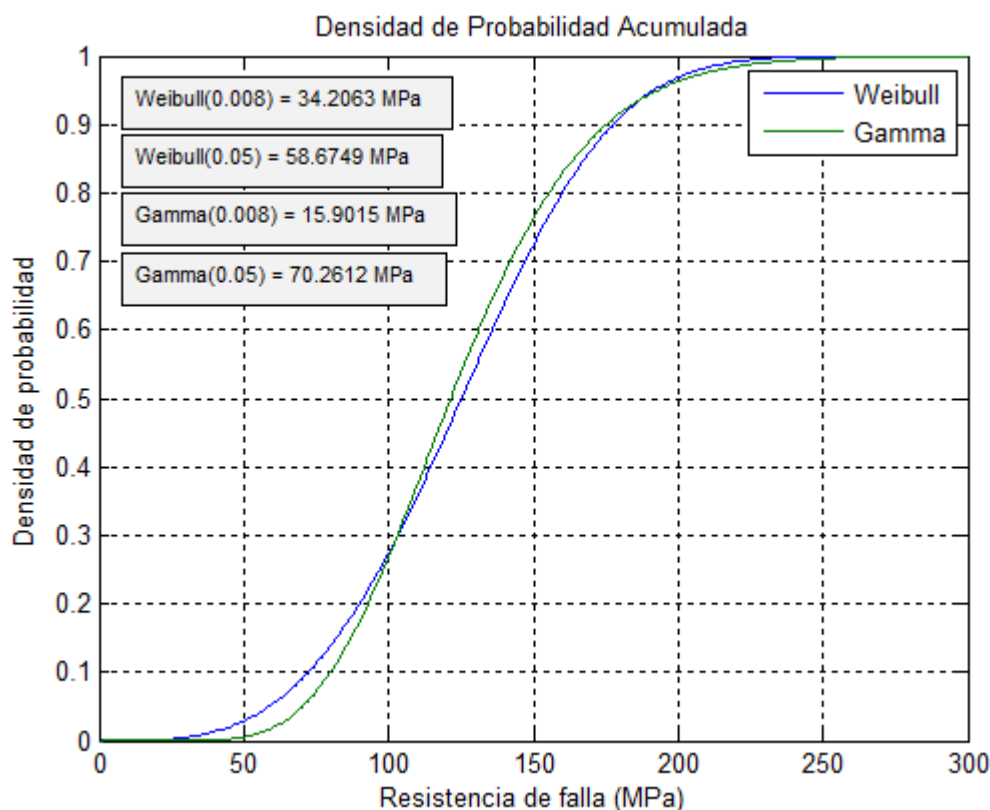


Figura 6.13. Modelos ajustados a las muestras de vidrio recocido nuevo. FDA: Weibull y Gamma. Adjuntamente están también los valores de resistencia característica de cada función.

6.4.2 Determinación del módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del vidrio recocido es considerado una constante, con valores muy similares entre 70 y 74 GPa en una gran cantidad de distintas fuentes y normas de diseño para elementos de vidrio. Sin embargo, se ha observado recientemente una considerable variación del valor del módulo de elasticidad en el vidrio cuando ocurre su falla, por ejemplo Costa y et al., 2001, autores quienes reportaron los datos que se presentan en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Datos experimentales de vidrio recocido bajo tasa de 4 mm/min (Costa y et al., 2001).			
Espesor, h (mm)	E (GPa)	σ_f (MPa)	ε_f (mm/mm)
4	60.12	83.57	0.12
6	60.70	52.56	0.08
10	57.48	79.57	0.05
19	48.44	18.28	0.03

La columna relacionada con el módulo de elasticidad de la Tabla 6.9 muestra una disminución del módulo de elasticidad conforme se incrementa el espesor del espécimen de vidrio hasta 19 mm. Por lo tanto, esta variación se debe tener presente en la determinación de la predicción de falla de elementos de vidrio. Con este antecedente, se precisó el módulo de elasticidad para nuestro conjunto de pruebas, a través de la ecuación 6.7, que fue evaluada conocidas las deflexiones y cargas para cada una de las muestras cuando ocurrió su falla, a través de los datos de la máquina universal Instron. A continuación se muestra el módulo de elasticidad promedio para cada caso,

véase Tabla 6.10 o Figura 6.14, donde se ajusta precisamente una curva exponencial de las variables tasa de esfuerzo ($\dot{\sigma}$) contra módulo de elasticidad promedio (E).

Tabla 6.10 Módulo de elasticidad para vidrio recocido.		
Espesor efectivo promedio	$\dot{\sigma}$	E promedio
mm	MPa/s	Mpa
2.95	85.97	94070.00
3.96	48.36	75108.77
4.98	30.95	68920.64
5.74	21.49	64211.32
8.04	12.09	46255.84
9.70	7.74	35993.92
12.07	5.37	25084.52
18.60	2.14	10157.00

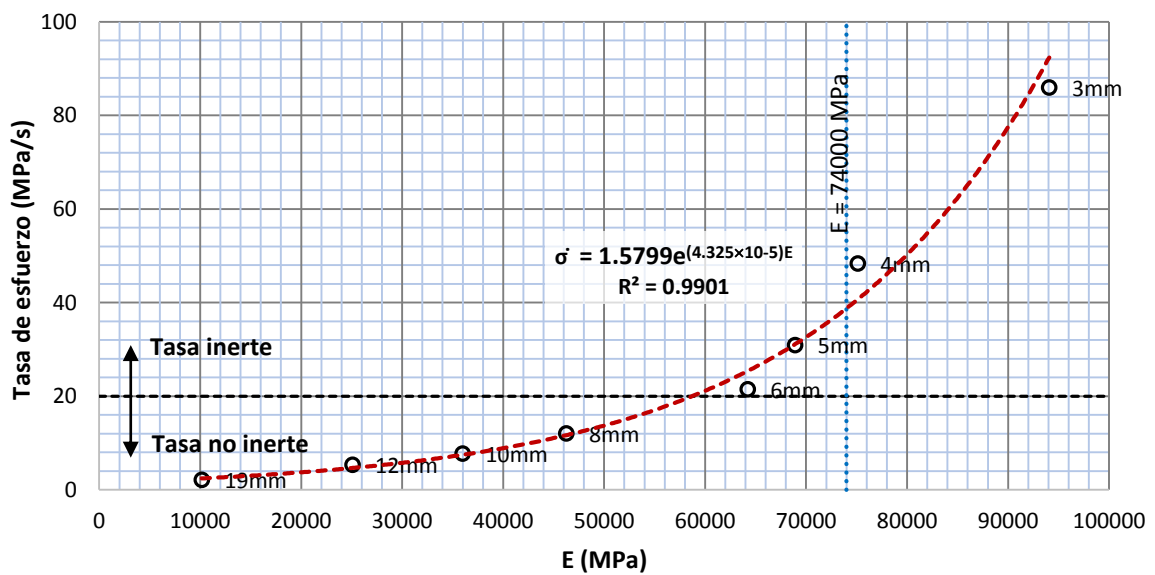


Figura 6.14 Curva exponencial ajustada a la variación del módulo de elasticidad que tiene como función de la tasa de esfuerzo empleada en cada conjunto de muestras.

Como se observa en la Figura 6.14, es claro que el módulo de elasticidad disminuye de forma exponencial a medida que la tasa de esfuerzo disminuye sobre los diferentes espesores de vidrio. Por lo tanto, se confirma que el módulo de elasticidad es afectado de acuerdo a la tasa de esfuerzo utilizada, como ocurrió en Costa et al. (2001).

El módulo de elasticidad se puede determinar de forma fiable en las pruebas CDA con una tasa de esfuerzo para la condición inerte, como se observa en la Figura 6.14, donde los espesores de 3 mm a 6 mm fueron los más próximos al valor esperado de $E = 74$ GPa. Mientras que para las muestras con los espesores de 8 mm a 19 mm bajo sus respectivas tasas de esfuerzo no inertes se alejaron totalmente con respecto del valor de $E = 74$ GPa. Por lo tanto, para acciones de corta duración, es apropiado para el diseño un valor de E de 74 GPa. Los códigos de diseño deben recomendar el valor de E dependiendo la duración de la acción. Veremos más adelante que dependiendo del valor de E adoptado para el diseño, se tiene un grado de repercusión en la determinación de la resistencia de falla de un vidrio recocido, y que en manos de un ingeniero o diseñador de la práctica, es preciso conozca las recomendaciones siguientes:

1. El módulo de elasticidad como propiedad mecánica del vidrio, se determina de forma confiable de prueba en condiciones inertes, donde el efecto de crecimiento subcrítico de grieta sobre las muestras es evitado.
2. Las normas de diseño deben precisar el cálculo del valor del módulo de elasticidad de diseño en el vidrio para evitar que se sobrestime la determinación de su resistencia ante las condiciones de carga y con esto, aminorar la posibilidad de falla y de riesgo de daño sobre las personas.
3. Como parte de un buen diseño estructural, una práctica adicional será siempre necesaria para la determinación del módulo de elasticidad en laboratorio sobre muestras representativas de vidrio para garantizar el buen desempeño estructural de los elementos de vidrio durante toda su vida útil. De lo contrario, el módulo de elasticidad en el vidrio puede ser determinado a través de un criterio ingenieril justificable o a través del empleo de alguna norma relacionada.

Es fácil imaginar que tan directa es la influencia del módulo de elasticidad, si pensamos en una placa de vidrio bajo carga lateral fuera de su plano, por ejemplo se flexionará más a medida que experimente un módulo de elasticidad bajo. En otro ejemplo, una columna de vidrio bajo carga axial de compresión puede presentar pandeo crítico mucho antes de lo esperado.

Más adelante veremos como el módulo de elasticidad también afecta la determinación de uno de los parámetros de las condiciones de superficie ambiental (θ_0).

La manera de determinar el módulo de elasticidad de la Tabla 6.10 quedará justificado una vez mostrados los resultados de los modelos analíticos en el tema siguiente.

6.5 Modelo analítico de las pruebas CDA

La razón fundamental de elaborar los modelos analíticos de las pruebas de laboratorio con el módulo de elasticidad calculado en la Tabla 6.10, es esencialmente para confirmar los esfuerzos de falla con la ecuación 6.6 presentados en la Tabla 6.3, lo mismo ocurre con las galgas extensiométricas que fueron utilizadas. También usaremos los valores de espesor efectivo promedio para cada conjunto diferente de muestras, un valor de Poisson de 0.23 y las mismas características geométricas de tamaño de las muestras y de los anillos. Por lo que, el modelo 3D considera la no linealidad geométrica de la muestra de

vidrio recocido y elementos finitos tipo placa de 4 nodos (Shell 181), todo esto a través de Ansys Workbench 14.5. Algunos detalles descriptivos acerca de este programa se presentarán en el capítulo 7 sobre el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio. También, las muestras en la

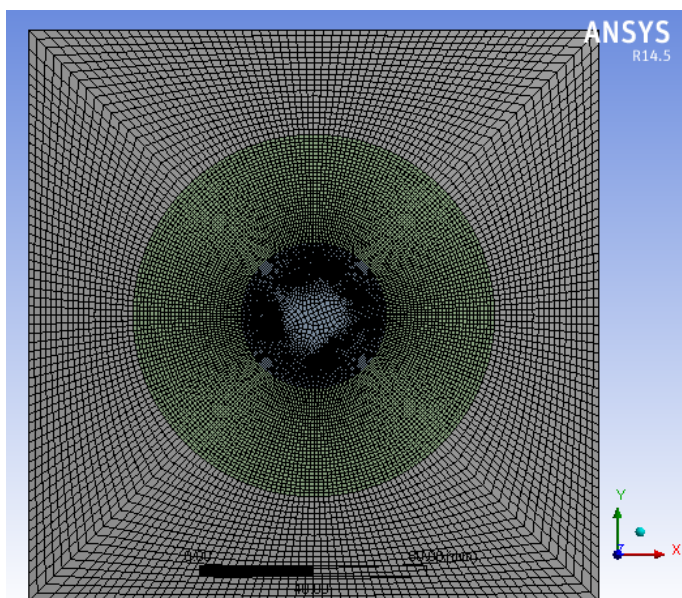


Figura 6.15 Mallado utilizado en el modelo 3D con 17251 elementos cuadriláteros tipo Shell.

Capítulo 6 Pruebas Experimentales

prueba coaxial de doble anillo fueron representadas por un mallado de 17251 elementos cuadriláteros, como se muestran en la Figura 6.15. En la Figura 6.16 se ilustran los resultados de esfuerzo y de deflexión para la muestra de vidrio de 5.74 mm de espesor ante 13200 N de carga.

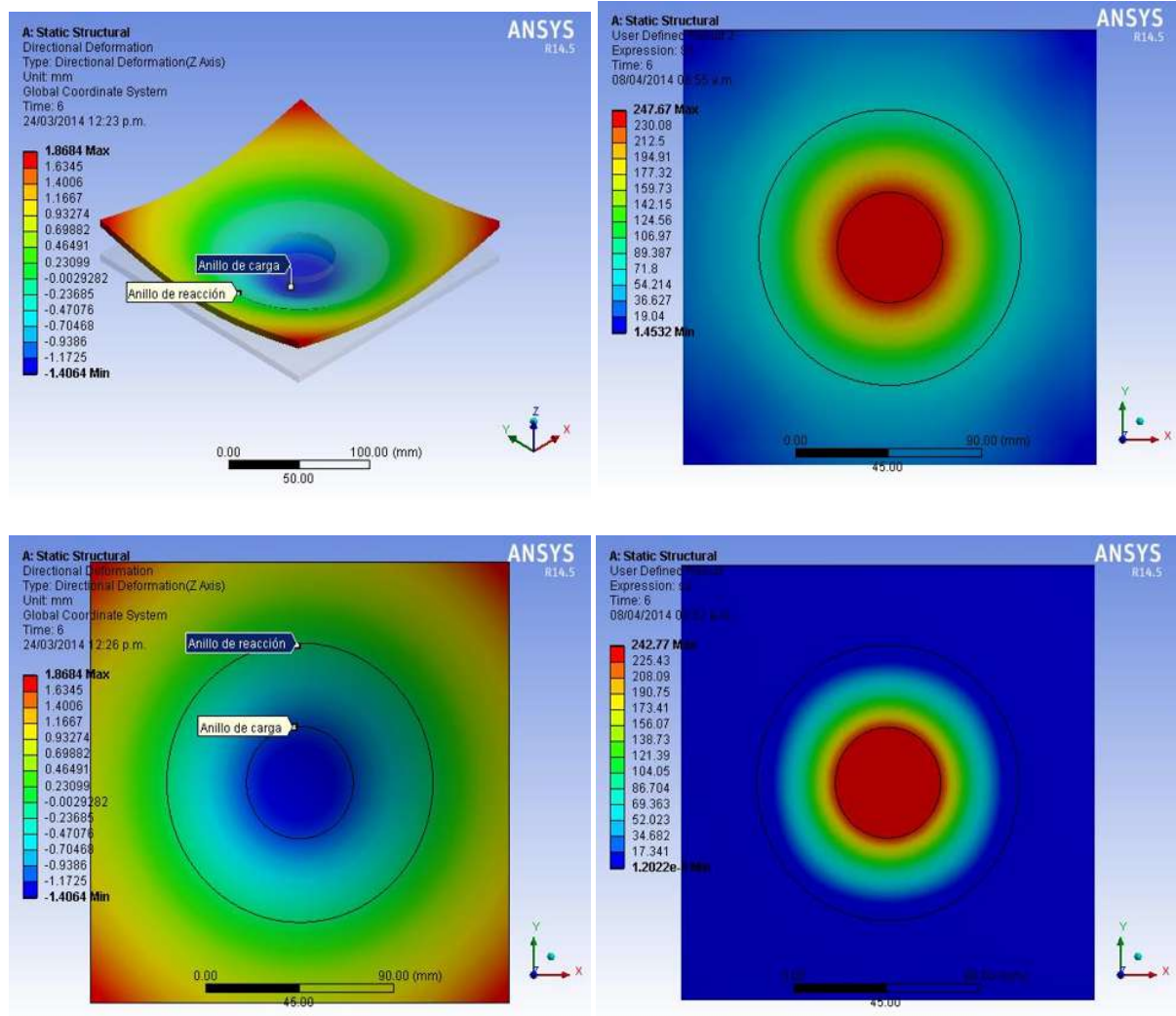


Figura 6.16 Muestra los resultados de esfuerzos y deflexión de la muestra de vidrio recocido de 200 x 200 x 5.74 mm:

- 1) Vista isométrica de deformación de la placa ante 13200 N de carga.
- 2) Gráfica de Deflexión en la muestra.
- 3) Distribución de esfuerzos principales máximo, S1, para la carga de 13200 N.
- 4) Distribución de esfuerzos principales mínima, S2, para la carga de 13200 N.

A continuación, se muestran gráficamente los resultados analíticos contras los experimentales (máquina universal Instron y galgas). Habrá un par de gráficas representando un espesor nominal (h), una primera gráfica de carga contra deflexión y otra segunda de carga contra esfuerzo principal máximo. Las gráficas vendrán acompañadas con las siguientes leyendas:

- Modelo NoLgeo: corresponde al modelo analítico no lineal geométrico hecho en Ansys.
- Laboratorio: información de la máquina universal exclusivamente.
- C1499: resultados obtenidos con las ecuaciones 6.6 (esfuerzo) y 7.7 (deflexión) según sea el caso correspondiente al gráfico mostrado.
- Galgas: información experimental obtenida con las galgas extensiométricas.

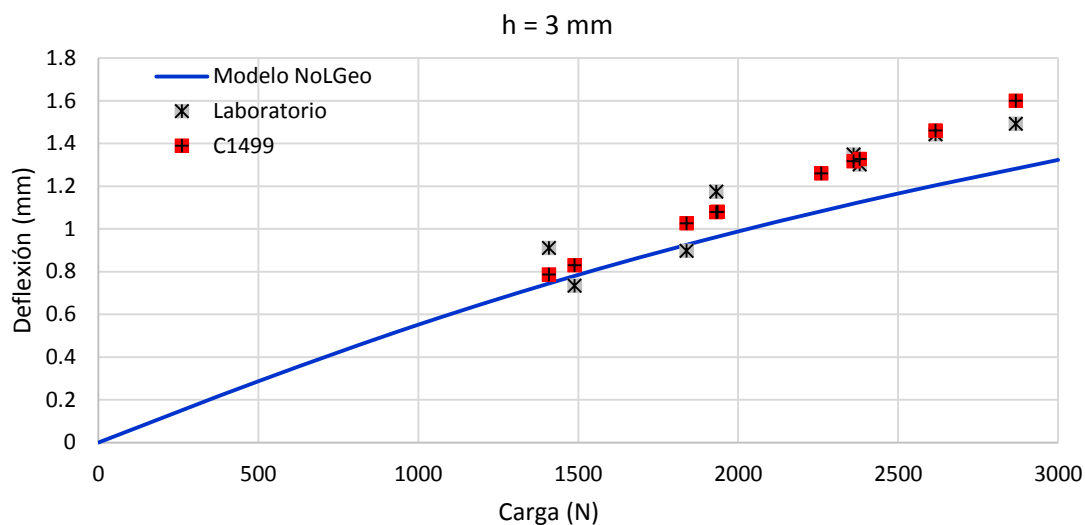


Figura 6.17 Curva Carga-deformación para especímenes de 3 mm de espesor.

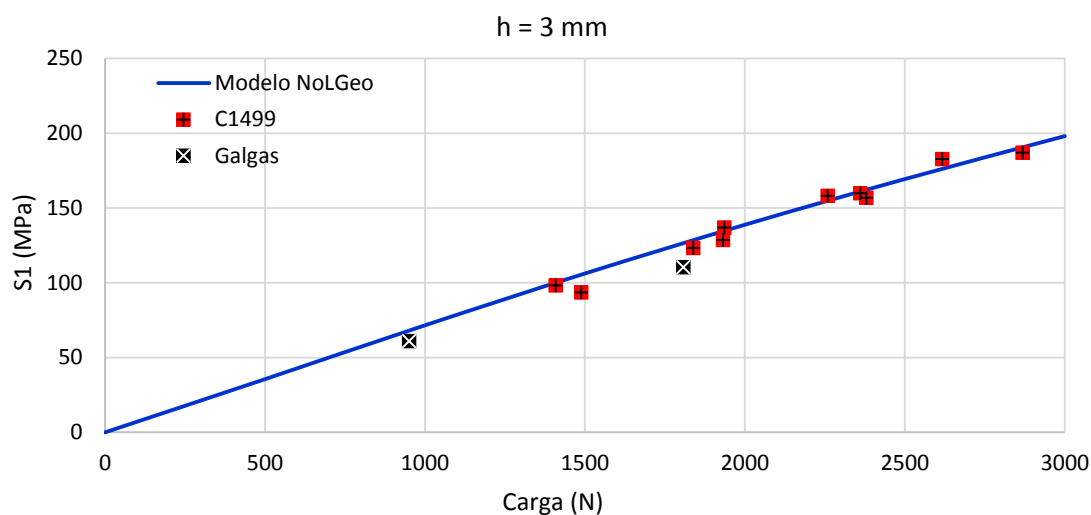


Figura 6.18 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 3 mm de espesor.

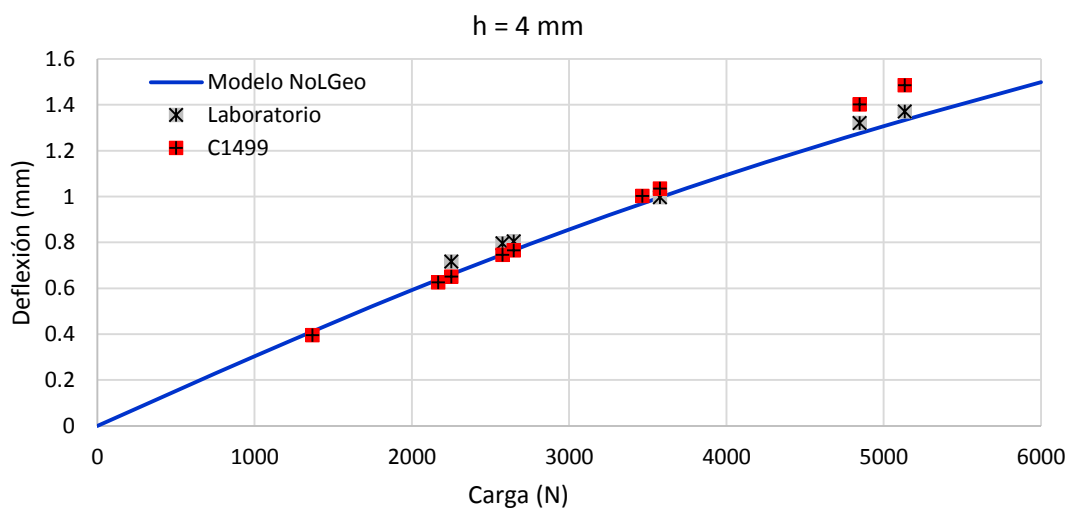


Figura 6.19 Curva Carga-deformación para especímenes de 4 mm de espesor.

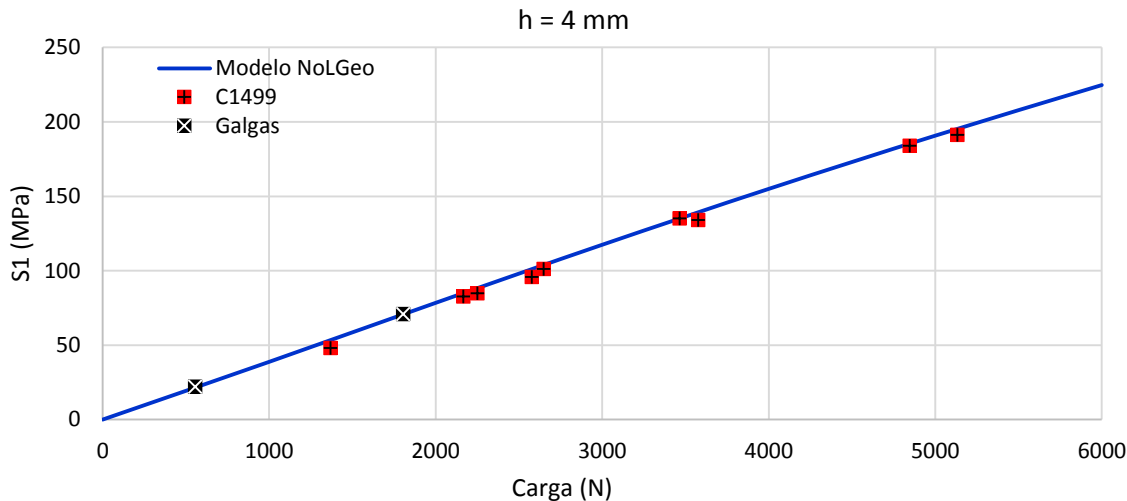


Figura 6.20 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 4 mm de espesor.

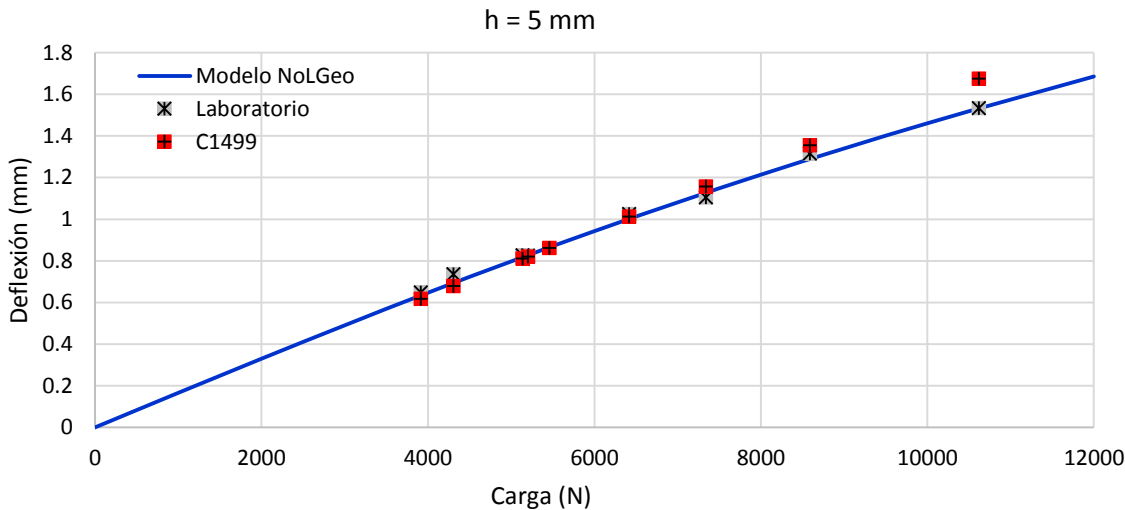


Figura 6.21 Curva Carga-deformación para especímenes de 5 mm de espesor.

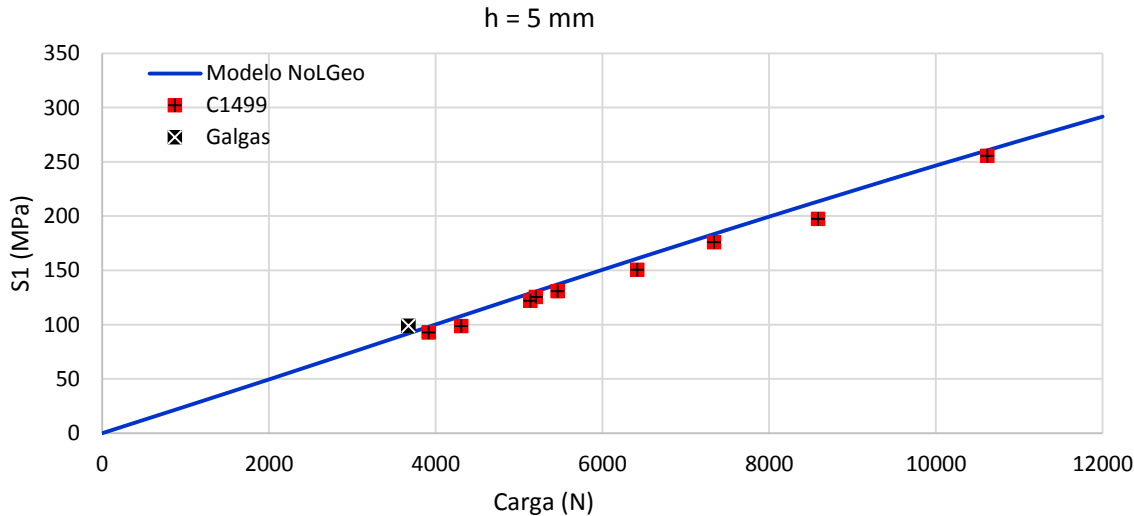


Figura 6.22 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 5 mm de espesor.

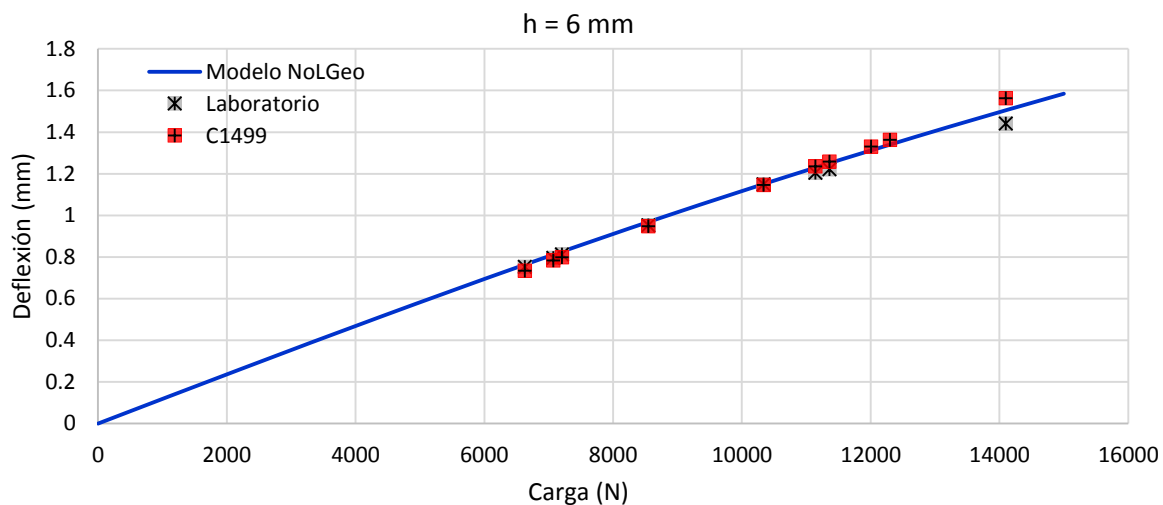


Figura 6.23 Curva Carga-deformación para especímenes de 6 mm de espesor.

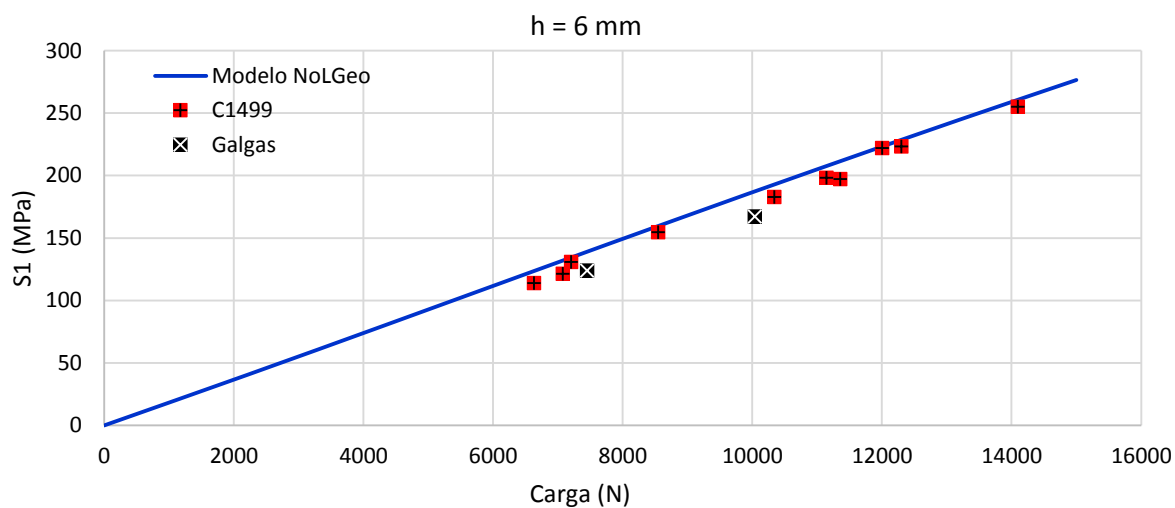


Figura 6.24 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 6 mm de espesor.

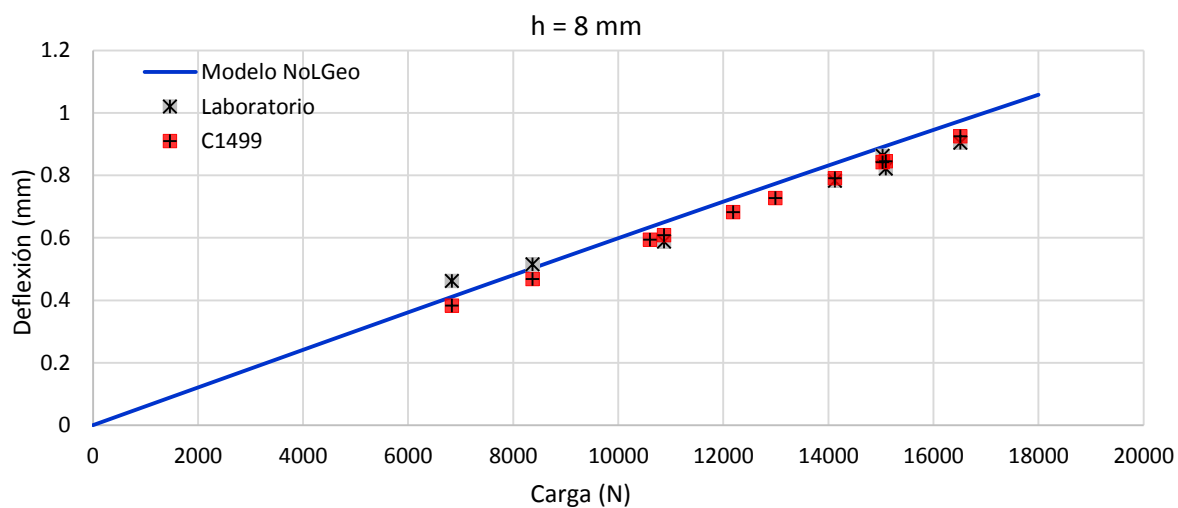


Figura 6.25 Curva Carga-deformación para especímenes de 8 mm de espesor.

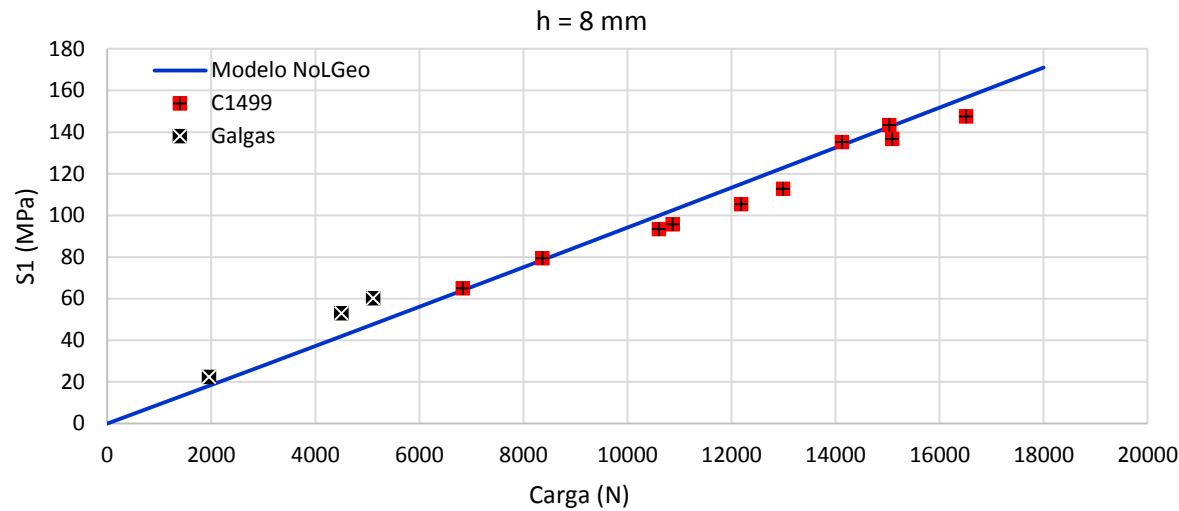


Figura 6.26 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 8 mm de espesor.

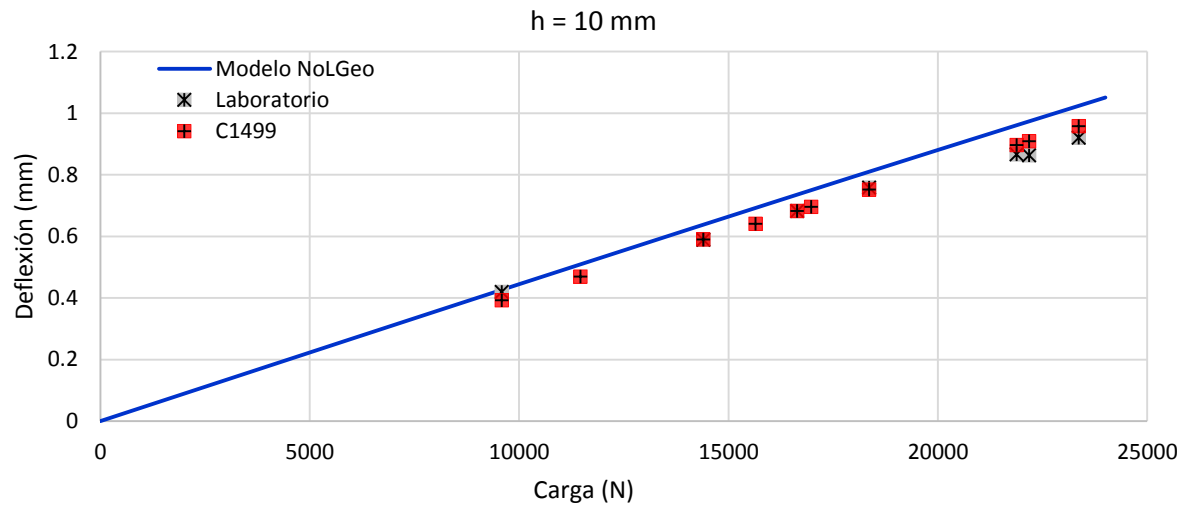


Figura 6.27 Curva Carga-deformación para especímenes de 10 mm de espesor.

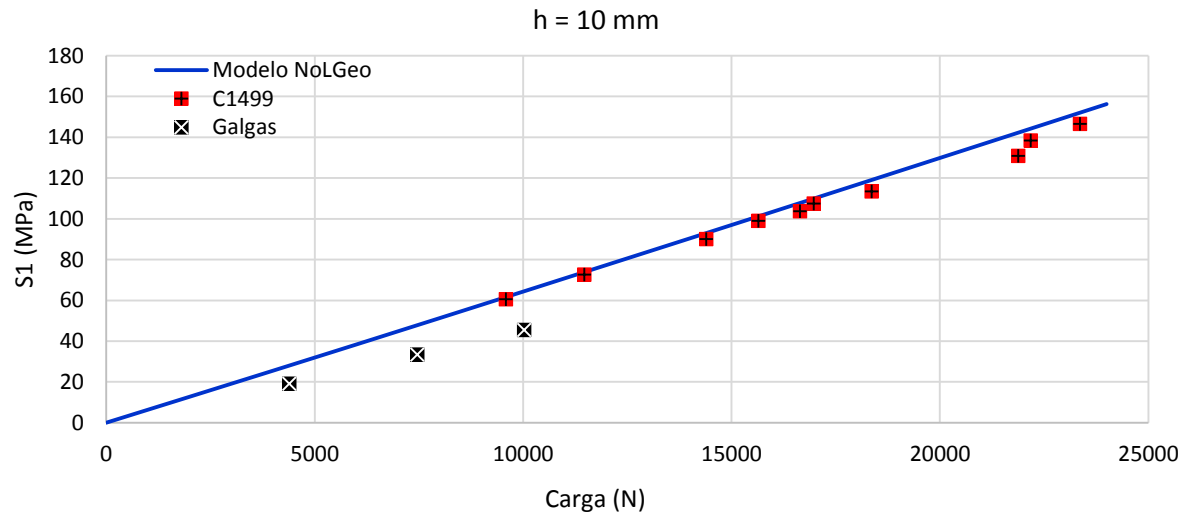


Figura 6.28 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 10 mm de espesor.

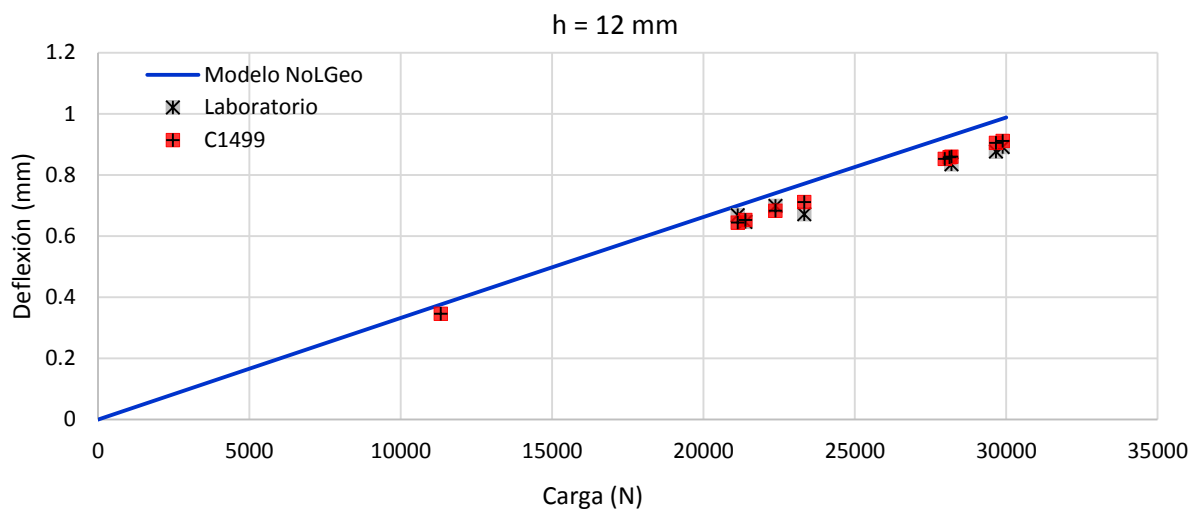


Figura 6.29 Curva Carga-deformación para especímenes de 12 mm de espesor.

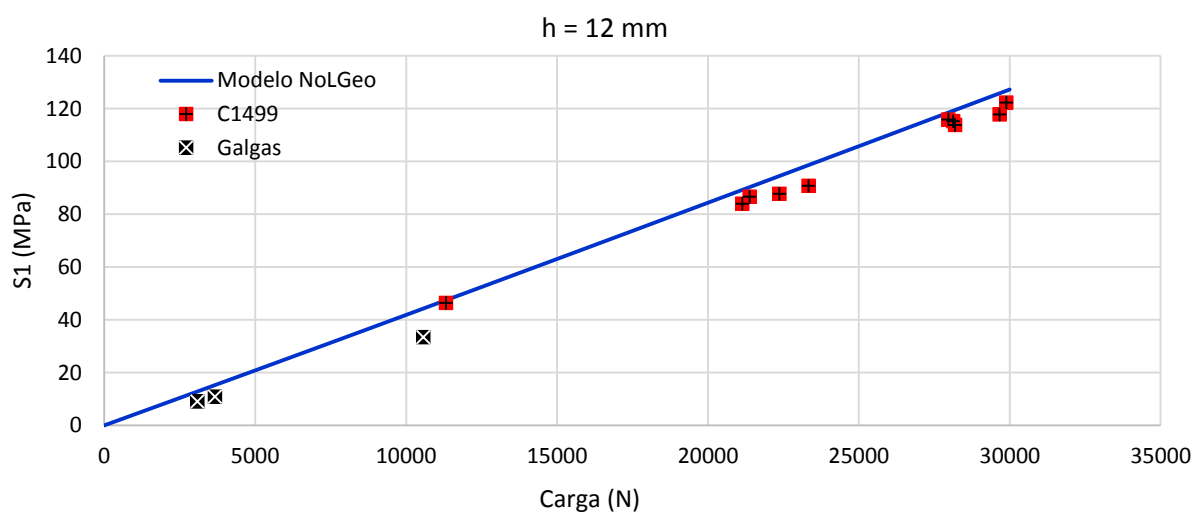


Figura 6.30 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 12 mm de espesor.

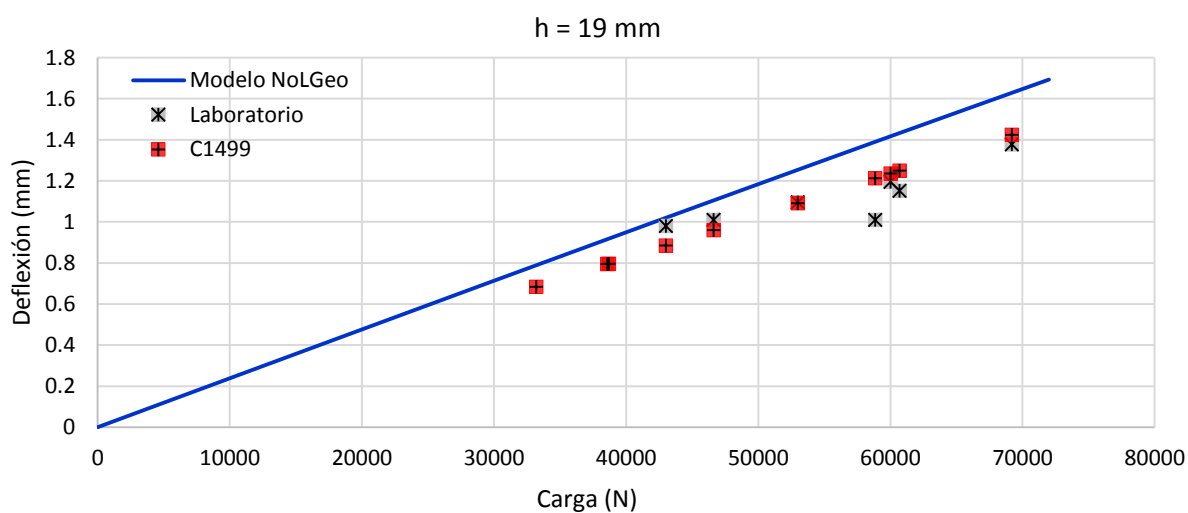


Figura 6.31 Curva Carga-deformación para especímenes de 19 mm de espesor.

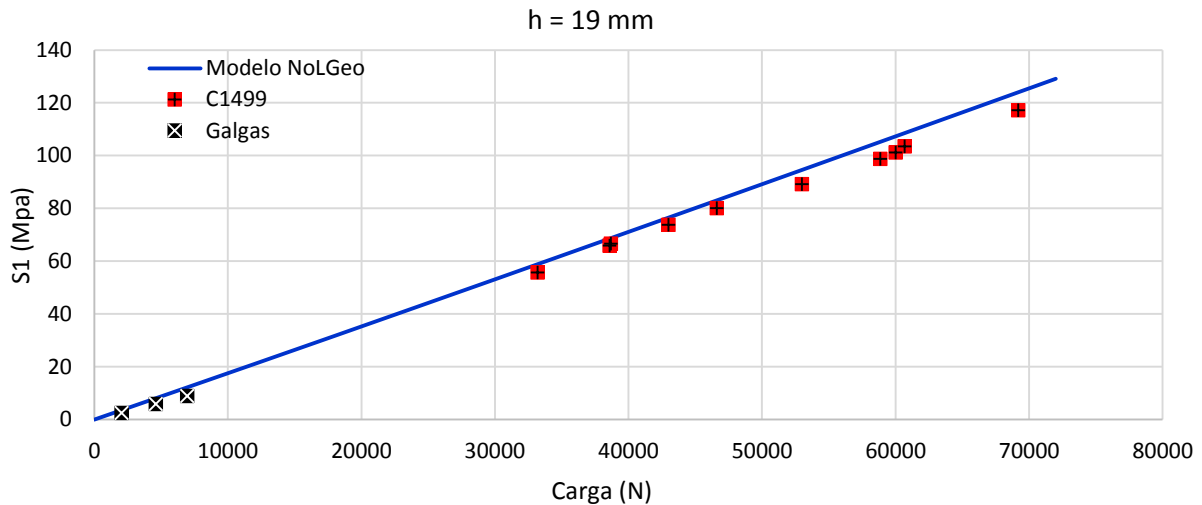


Figura 6.32 Curva Esfuerzo principal máximo-deformación para especímenes 19 mm de espesor.

Conforme a lo observado en las gráficas anteriores, Figuras 6.17 a 6.32, el comportamiento de las deflexiones del modelo no lineal geométrico (línea azul) ante las deflexiones de la máquina universal, fueron en general descritas adecuadamente. En el caso de los especímenes de 3 mm de espesor, las deflexiones fueron ligeramente subestimadas, mientras que en los casos de 10 mm a 19 mm estas fueron ligeramente sobrestimadas. En el resto de los casos el modelo analítico no lineal geométrico fue muy preciso. A diferencia de esto, la ecuación 6.7 fue capaz de mejorar la aproximación de todas las deflexiones contra las de la máquina universal.

Otra parte importante de la conclusión también es que los esfuerzos de falla en su totalidad quedaron bien representados por la ecuación 6.6 en comparación con el modelo analítico no lineal geométrico. Esto no ocurrió así con las galgas extensiométricas, que debido a un defecto, quedó incompleto el registro de la historia de esfuerzos, por lo que el esfuerzo medido, en todos los casos, fue inferior al esfuerzo de falla. A pesar de eso, los puntos graficados por las galgas extensiométricas siguieron la pendiente de la línea azul asociada al modelo analítico.

Finalmente, podemos decir con certeza, que los resultados de esfuerzos de falla, fueron bien determinados con la ecuación 6.6 en conjunto con el modelo analítico de la prueba CDA elaborada en Ansys. De esta forma, se pueden utilizar estos valores de forma confiable para determinar los parámetros de condición ambiental de la superficie (m_0 y θ_0) del vidrio en las muestras experimentalmente llevadas a cabo hasta su falla, parámetros necesarios para plantear el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio. Además, se puede concluir que el módulo de elasticidad fue correctamente estimado de acuerdo con la sección 6.4.2 y que su variación afecta la resistencia característica a flexión del vidrio discutida en la sección 6.4.1.1, al tratar de asumir que E es el mismo en todas las muestras.

6.6 Determinación de m_0 , θ_0 y m_r

Para el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio (capítulo 7) es indispensable obtener los parámetros de condición ambiental de la superficie del vidrio (m_0 , θ_0), previamente definidos, pero como se ve a continuación, su determinación implica definirlos con las expresiones siguientes:

Para condiciones inertes:

$$m_0 = \beta_{inerte}$$

$$\theta_0 = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{\frac{-1}{m_0}} n_{b,inerte}^{-1}} \quad \text{ó} \quad \theta_0 = \frac{K_{IC}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} \quad (6.10)$$

donde,

θ_0 y m_0	son los parámetros de la condición ambiental de la superficie del vidrio para el modelo de predicción de vida útil.
β_{inerte} y θ_{inerte}	son los parámetros de la condición inerte de la superficie del vidrio para una densidad de probabilidad Weibull.
A y A_0	son el área de la superficie en tensión comprendida por el anillo de carga sobre una muestra y el área unitaria (1 m ²), respectivamente.
$n_{b, inerte}$	es la relación entre esfuerzo máximo y mínimo. Para un campo de esfuerzos equibiaxial $n_{b,inerte}$ es igual a 1, como lo es en una prueba CDA.
Y	es el factor geométrico de fisura.
K_{IC}	es el factor de intensidad de esfuerzo crítico.
M_0	es el número promedio de fisuras encontradas a través de un área unitaria.
a_0	es un tamaño característico de fisura, generalmente representado por una densidad de probabilidad de Pareto.

La ecuación 6.9 está representada simplemente por una igualdad de términos, pero la ecuación 6.10 está definida por un par de ecuaciones, la del lado izquierdo es fácil de evaluar, mientras que la del lado derecho es muy difícil de abordar por los dos parámetros M_0 y a_0 . De todas formas debemos tener claro que ambas ecuaciones son siempre equivalentes. Generalmente la ecuación 6.10 de la derecha es suficiente, sin embargo, cuando se reconoce la influencia del módulo de elasticidad se debe acudir a un arreglo matemático para su modificación sobre todo si se quiere referenciar el valor de θ_0 a un nuevo valor de módulo de elasticidad en el vidrio. Será de mucha utilidad conocer esto, ya que en general se tiene variación en el módulo de elasticidad del vidrio cuando ocurre su falla, como se encontró aquí, en los resultados de nuestras pruebas experimentales sobre vidrio recocido. Resulta más indispensable cuando se propone hacer ayudas de diseño, como se verá más adelante en el Capítulo 7. El arreglo comienza con la igualación de las expresiones presentadas en la ecuación 6.10:

$$\frac{K_{IC}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

de ec. 5.1, $K_{IC} = \sqrt{2E\gamma Y^2}$ y sustituimos,

$$\frac{\sqrt{2E\gamma Y^2}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

si llamamos a E como E_1 y reescribimos:

$$\frac{\sqrt{2\gamma Y^2} \sqrt{E_1}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

se introduce un valor unitario $\left(\frac{\sqrt{E_2}}{\sqrt{E_2}}\right)$,

$$\frac{\sqrt{2\gamma Y^2} \sqrt{E_1} \frac{\sqrt{E_2}}{\sqrt{E_2}}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

y arreglamos de la forma siguiente:

$$\frac{\sqrt{2\gamma Y^2} \sqrt{E_2} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

vemos que $\frac{E_1}{E_2}$ es una relación modular, que la nombraremos como m_r ,

$$\frac{\sqrt{2\gamma Y^2} \sqrt{E_2}}{M_0^{1/m_0} Y \sqrt{\pi} \sqrt{a_0}} = \frac{\theta_{inerte}}{\sqrt{m_r} \left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}}$$

por lo que finalmente,

$$\theta_0(\theta_{inerte}, m_0, m_r) = \frac{\theta_{inerte}}{\sqrt{m_r} \left(\frac{A}{A_0}\right)^{-1/m_0} n_{b,inerte}^{-1}} \quad (6.11)$$

Como se observa, ahora, la ecuación 6.11 define el valor de θ_0 como función de m_r , θ_{inerte} y m_0 , donde el resto de los parámetros generalmente son constantes. Cuando la relación modular

m_r sea igual a uno, significa que no se ha modificado nada en θ_0 , y que sus variables independientes serán solamente θ_{inerte} y m_0 , retomando la forma de la ecuación 6.10 (del lado izquierdo).

Para condiciones no inertes:

Los parámetros de condición ambiental se definen como:

$$m_0 = \beta_{no,inerte} \left(\frac{n-2}{n+1} \right) \quad (6.12)$$

$$\theta_0 = \left[\frac{\left(\theta_{NoI} (A / A_0)^{1/\beta_{NoI}} \right)^{n+1} n_{b,inerte}^n}{U (n+1) \cdot \dot{\sigma}} \right]^{1/(n-2)} \quad (6.13)$$

Y de forma análoga a la ecuación 6.11, la ecuación 6.13 es ahora función de m_r como:

$$\theta_0 (\theta_{NoI}, \beta_{NoI}, m_r) = \left[\frac{\left(\theta_{NoI} (A / A_0)^{1/\beta_{NoI}} \right)^{n+1} n_{b,inerte}^n}{U (n+1) \cdot \dot{\sigma} \cdot m_r^{(n-2)/2}} \right]^{1/(n-2)} \quad (6.14)$$

donde,

β_{NoI} y θ_{NoI}	son los parámetros de la condición no inerte de la superficie del vidrio para una densidad de probabilidad Weibull.
$n_{b, inerte}$	es la relación entre esfuerzo máximo y mínimo. Para un campo de esfuerzos equibiaxial $n_{b,inerte}$ es igual a 1, como lo es en una prueba CDA.
$\dot{\sigma}$	es la tasa de esfuerzo menor que 20 MPa/s.
U	es el coeficiente que relaciona el crecimiento subcrítico de grieta: $U = \frac{2K_{Ic}^2}{(n-2) \cdot v_0 \cdot Y^2 \pi} \quad (\text{unidades: esfuerzo}^2 \cdot \text{tiempo})$
K_{Ic}	es el factor de intensidad del esfuerzo crítico, calcular con ec. 5.1.
Y	es un factor de corrección o factor de geometría.
v_0 y n	son los parámetros de velocidad de grieta. Para condiciones de laboratorio $v_0 = 0.01$ mm/s y $n = 16$.

A partir de este razonamiento, comenzaremos a ver un aspecto importante que tiene que ver con el comportamiento de K_{IC} , en la Figura 6.33 y de acuerdo con la ecuación 5.1, resulta que

K_{IC} tiene un comportamiento semi-parabólico como función de E , donde K_{IC} tenderá a cero rápidamente si E tiende a ser pequeño, en otras palabras la resistencia de una fisura depende mucho del módulo de elasticidad del vidrio. Por ello, siempre será preferible que un vidrio sea de mejor calidad al tener un módulo de elasticidad elevado.

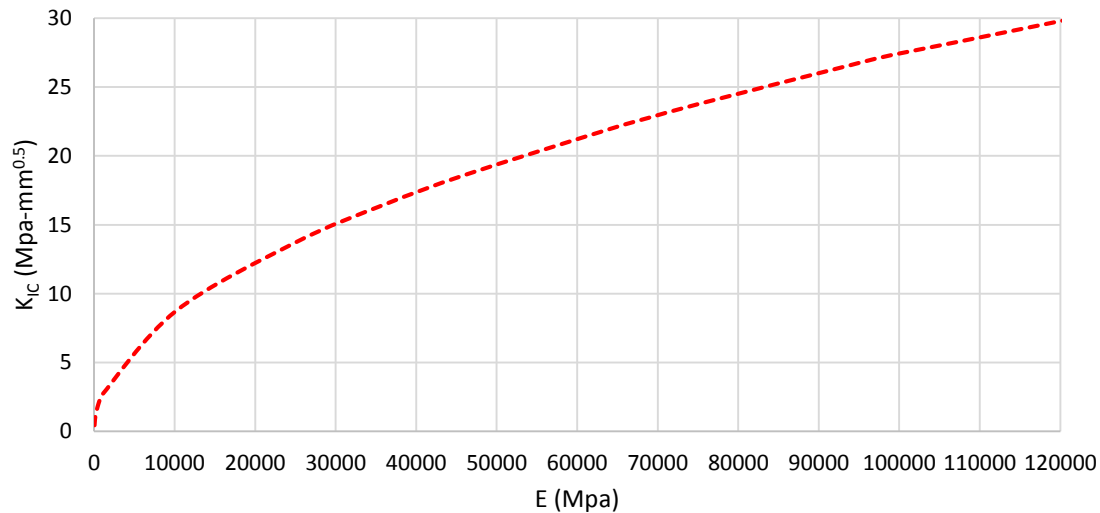


Figura 6.33 Gráfica parabólica de K_{IC} contra E , ecuación 5.1, con $Y = 1.12$ y $\gamma = 0.003 \text{ J-mm}^{-2}$.

De acuerdo con lo previamente mencionado, y antes de emplear las ecuaciones 6.11 y 6.14, se debe primero observar la influencia de m_r , como función de E_1 y E_2 , donde E_1 es igual al módulo de elasticidad experimentalmente estimado anteriormente cuando ha ocurrido la falla bajo en diferentes tasas de esfuerzo de la Tabla 6.10 y E_2 es igual a un módulo de elasticidad confiable y esperado en el diseño (ante cargas de corta duración) dentro del rango de 50000 Mpa y los 80000 Mpa, con la ayuda de la Tabla 6.11 se ve el cálculo de $\sqrt{m_r} = \sqrt{(E_1/E_2)}$.

Tabla 6.11 Contiene los valores de $\sqrt{m_r}$ como función de E_1 (Tabla 6.4) y E_2 .

E_1 (MPa) \ E_2 (MPa)	50000	60000	70000	74000	80000
94070.00	1.37	1.25	1.16	1.13	1.08
75108.77	1.23	1.12	1.04	1.01	0.97
68920.64	1.17	1.07	0.99	0.97	0.93
64211.32	1.13	1.03	0.96	0.93	0.90
46255.84	0.96	0.88	0.81	0.79	0.76
35993.92	0.85	0.77	0.72	0.70	0.67
25084.52	0.71	0.65	0.60	0.58	0.56
10157.00	0.45	0.41	0.38	0.37	0.36

De la Tabla 6.11 se observa, que los valores cercanos a $\sqrt{m_r} = 1$ son porque E_1 se aproxima al valor de E_2 y esto no afectaría en gran medida al valor de θ_0 , pero si $E_1 < E_2$ o si $E_1 > E_2$ dará un valor de $\sqrt{m_r} < 1$ y $\sqrt{m_r} > 1$, respectivamente, que terminaría escalando a θ_0 , haciéndolo incrementar y disminuir dependiendo del valor del módulo de elasticidad.

Por lo que ahora, se han calculado los valores correspondientes de θ_0 y m_0 , con las ecuaciones bajo condiciones inertes (6.9 a 6.10) y no inertes (6.12 y 6.13). Todo esto se resume en la Tabla 6.12. En la Tabla 6.12, se observa que los valores de θ_0 calculados aún no incluyen la relación modular calculada en la Tabla 6.11.

Tabla 6.12 Contiene el cálculo de los parámetros de θ_0 y m_0 con datos de los experimentos.

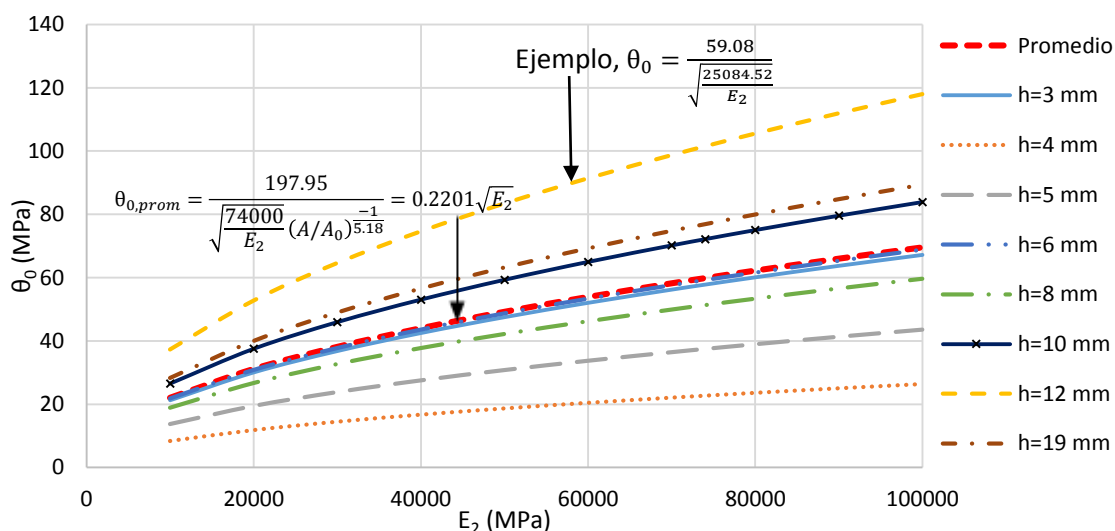
Espesor nominal	Condición de prueba	β	θ	Tasa de esfuerzo	E	K_{IC}	$U^\dagger$	ec.	m_0	ec.	θ_0
mm		(—)	MPa	MPa/s	MPa	MPaxmm ^{0.5}	MPa ² xs		(—)		Mpa
3	inerte	6.79	162.19	85.97	94070.00	—	—	6.9	6.79	6.10	65.15
4	inerte	3.41	140.64	48.36	75108.77	—	—	6.9	3.41	6.10	22.87
5	inerte	4.35	150.11	30.95	68920.64	—	—	6.9	4.35	6.10	36.15
6	inerte	5.06	187.57	21.49	64211.32	—	—	6.9	5.06	6.10	55.16
8	no inerte	5.87	126.15	12.09	46255.84	18.66	1262.03	6.12	4.83	6.13	40.55
10	no inerte	6.79	125.39	7.74	35993.92	16.46	982.05	6.12	5.59	6.13	50.32
12	no inerte	8.84	110.98	5.37	25084.52	13.74	684.40	6.12	7.28	6.13	59.08
19	no inerte	5.01	93.41	2.14	10157.00	8.74	277.12	6.12	4.13	6.13	28.49

[†]En su cálculo se emplearon los parámetros de: $Y = 1.12$, $v_0 = 0.01$ mm/s y $n = 16$.

La Tabla 6.13 determina el cálculo de $\theta_0(m_r)$ con las ecuaciones 6.11 y 6.13, o bien a partir de los resultados de las Tablas 6.11 y 6.12, véase además la Figura 6.34.

Tabla 6.13 Contiene los valores de $\theta_0[\beta, \theta, m_r]$ (en MPa), donde $A_0 = 1$ m², $A = 0.00204$ m² y $n_b = 1$.

E_2 (MPa)	50000	60000	70000	74000	80000
E_1 (MPa)					
94070.00	47.51	52.04	56.21	57.79	60.09
75108.77	18.65	20.43	22.07	22.69	23.59
68920.64	30.80	33.74	36.44	37.47	38.96
64211.32	48.72	53.37	57.64	59.27	61.62
46255.84	42.16	46.18	49.88	51.28	53.32
35993.92	59.31	64.97	70.18	72.16	75.03
25084.52	83.42	91.38	98.70	101.48	105.51
10157.00	63.21	69.24	74.79	76.90	79.95
promedio =	49.22	53.92	58.24	59.88	62.26

**Figura 6.34** Gráfica de θ_0 vs. E_2 para los diferentes grupos de espesores de las muestras de vidrio, en conjunto de una curva promedio proveniente de las mismas.

Como se observa en la Tabla 6.13, el valor promedio de θ_0 de 59.78 MPa simboliza las características de superficie ambiental de un vidrio con módulo de elasticidad igual a 74 GPa. La

Figura 6.34 presenta las curvas semi-parabólicas de θ_0 contra E_2 , similares en comparación con la Figura 6.33. Otro detalle que se observa en las curvas de la Figura 6.34, es que tienden a unirse en la cercanía de los valores pequeños de E_2 , y ocurre lo contrario para los valores más grandes de E_2 . Sin embargo, hubo otro aspecto que llama la atención, el cual es que dentro de la Figura 6.34 hubo curvas muy cercanas entre sí (por ejemplo: entre las curvas de 3 y 6 mm) y otras curvas más alejadas unas con otras (por ejemplo: entre las curvas de 4 y 12 mm). Esto se debió principalmente a que dos de las variables dentro de las ecuaciones 6.11 y 6.14 presentaron una influencia directa, como son los parámetros estimados del modelo de probabilidad Weibull. Por ejemplo, el valor de $\beta_{\text{inerte}} = m_0$ para la ecuación 6.11 muestra un impacto mucho mayor cuando sus valores son pequeños, ya que es el exponente dentro de la ecuación, elevando a una cierta potencia el valor de $A/A_0 =$ igual a 0.002043 m^2 . Todo este comportamiento lo analizamos con ayuda de la Figura 6.35 que mostramos a continuación.

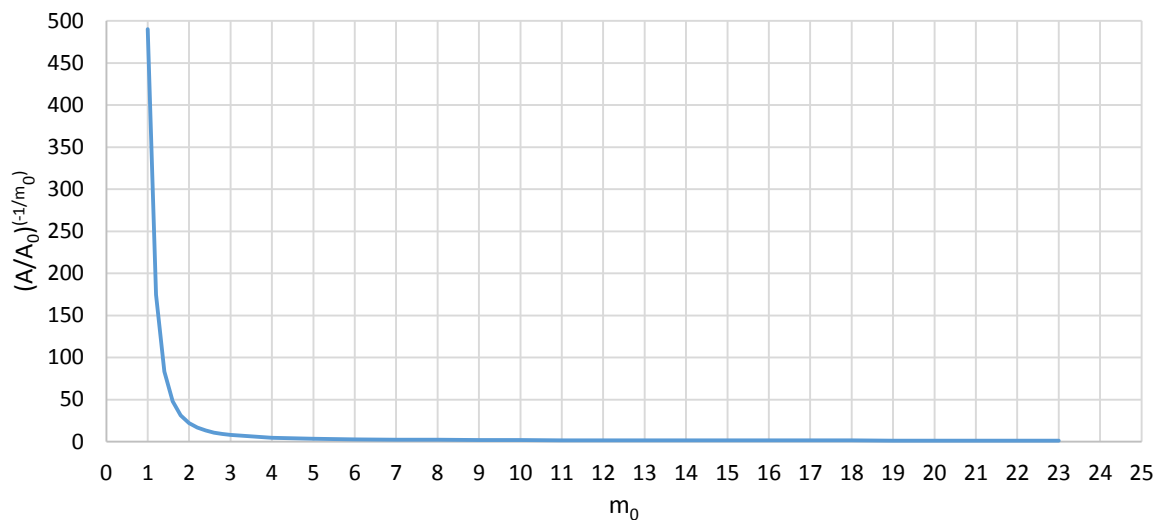


Figura 6.35 Gráfica que demuestra la influencia de m_0 dentro de la ecuación 6.11. Los parámetros que fueron utilizados en esta figura son con $A_0 = 1 \text{ m}^2$, $A = 0.00204 \text{ m}^2$ y $\nu_{mr} = 1$.

Como se observa en la Figura 6.35, la mayor variación de resultados de la operación presentada en el eje de las ordenadas de la curva exponencial corresponde a valores de m_0 menores a 10. En nuestro trabajo se encontró m_0 con valores de 3.41 a 6.79, valores mínimo y máximo de las muestras de 3 y 4 mm de espesor, respectivamente en condiciones inertes. Mientras que el valor de θ_{inerte} dentro de la ecuación 6.11, representa la magnitud de la resistencia que tuvieron las muestras de vidrio recocido nuevo analizadas y que a su vez en éste también ha quedado conceptualmente implícito el estado superficial que tenía cada una de las muestras antes de su falla y que no fue posible determinar directamente en laboratorio, como son el tamaño y número de fisuras: bajo este razonamiento se justifica que las curvas no hayan coincidido. Aunque, las curvas de 3, 6 y 8 mm, y las curvas de 10 y 19 mm, se hayan cercanas coincidencias (Figura 6.34), para ninguno de estos casos los dos parámetros Weibull resultaron ser iguales. Esto quiere decir que la influencia total que tuvieron ambos parámetros de su sustitución respectiva con las ecuaciones 6.11 y 6.14 hizo que sus resultados fueran finalmente semejantes.

Previo a la determinación de los parámetros que servirán para definir el modelo de predicción de falla de paneles de vidrio en el capítulo 7, se puede concluir que cuando se estiman los parámetros con base en pruebas inertes de laboratorio, y estos correspondan a valores altos de

β_{inerte} y de θ_{inerte} , este último significado de una alta resistencia (sin el efecto del crecimiento subcrítico de grieta), de pocos y pequeños defectos sobre la superficie del vidrio; además, si agregamos que le corresponde un alto módulo de elasticidad, como resultado el valor esperado de θ_0 sería muy elevado y se hablaría de un vidrio con muy buenas condiciones para el diseño estructural, pero debemos ser conscientes que esto pudiera ocurrir de diversas maneras sobre todo dependiendo las condiciones de superficie de los vidrios. Así pues, como anteriormente fue recomendable la determinación o el conocimiento del módulo de elasticidad para el diseño, así es igualmente recomendable hacerlo con los parámetros θ_0 y m_0 siempre que sea posible bajo condiciones inertes, de lo contrario se tendrán que adoptar algunos de estos parámetros para realizar el proceso de diseño, procurando siempre estar del lado de la seguridad, con el uso de valores conservadores de θ_0 y m_0 . Sin embargo, esto último puede resultar sin fundamento, si no se tiene la información suficiente para tomar dicha decisión. Mientras tanto, en nuestro trabajo hemos propuesto predecir la resistencia de paneles de vidrio con base en la determinación de parámetros promedio como función del módulo de elasticidad de 74 GPa, véase Figura 6.36.

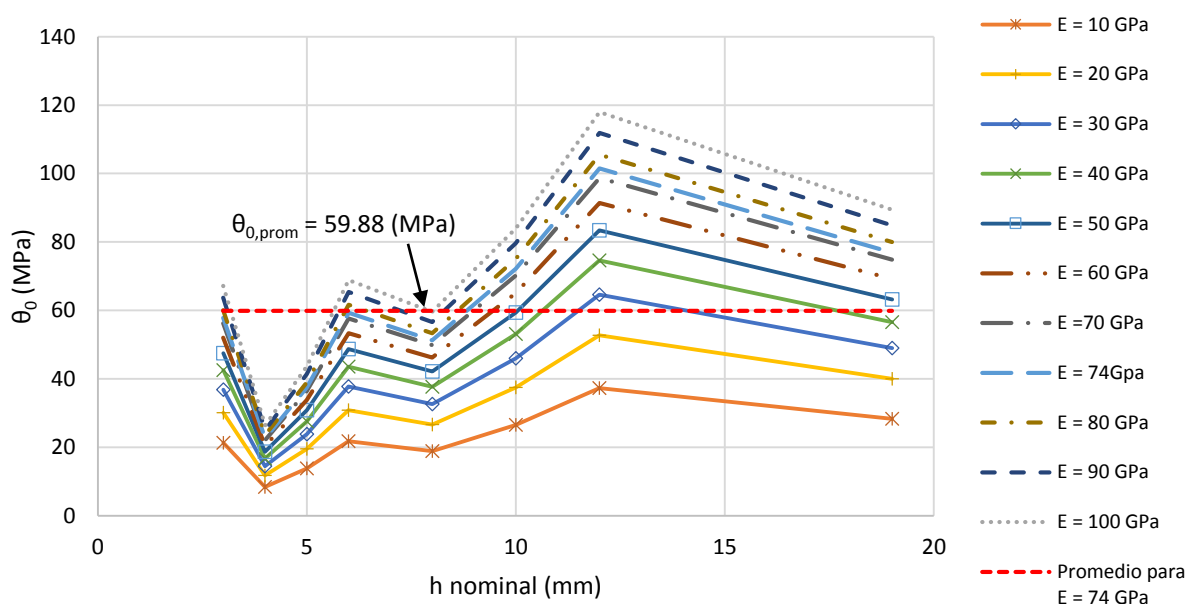


Figura 6.36 Ilustra las líneas de θ_0 contra espesor nominal para diferentes módulos de elasticidad (ec. 6.11) y el caso de un valor promedio de θ_0 .

En resumen, el modelo de predicción de falla se fundamentará como función de los datos definitivos que se presentan en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14 Contiene los valores de los parámetros promedio de diseño.			
E	θ_{prom}	$m_{0, \text{prom}}$	$\theta_{0, \text{prom}}$
MPa	MPa	adimensional	MPa
74000	197.95	5.18	59.88

Una vez elegidos los parámetros mostrados en la Tabla 6.13, que serán utilizados en el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio (MPFCV, capítulo 7), debemos anticipar lo que representan estos como función de los siguientes aspectos importantes a mencionar:

El módulo de elasticidad de 74000 MPa fue adoptado de acuerdo al valor esperado bajo pruebas en condiciones inertes o de tasa de esfuerzo mayores que 20 MPa/s, pero además, este

Heriberto Puga Juárez

valor es adecuado ante acciones de corta duración y debido a que este valor de módulo de elasticidad del vidrio también resulta familiar a la mayoría de los diseñadores. Si de antemano sabemos que el módulo de elasticidad real no coincide con el aquí mencionado, la solución parcial a sugerir es la de determinar la resistencia del vidrio para el nuevo valor de módulo de elasticidad a partir de la resistencia calculada con $E = 74 \text{ GPa}$, a través de la relación modular m_r , definida previamente, por ejemplo, si la resistencia ante carga uniforme sobre una placa de vidrio fuera predicha de 10 kPa con $E = 74 \text{ GPa}$, pero por medio de experimentos se determinó que para la misma placa E resultó finalmente de 68.4 GPa , de haber empleado una tasa de esfuerzo ligeramente inferior. Entonces ¿Cuál será la resistencia de falla (R_f) real que corresponde a la placa con $E = 68.4 \text{ MPa}$? La respuesta a la pregunta se resuelve con el producto de la raíz cuadrada de la relación modular por el valor de predicción inicial de resistencia, tal como se demuestra a continuación:

$$R_f = (10) \sqrt{\frac{68400}{74000}} = 9.61 \text{ kPa}$$

Como era de esperarse, la placa redujo su resistencia en un 7.57% con respecto a la primera estimación de resistencia de carga. De esta forma, se pretende calcular la predicción de falla de una placa a través de la predicción de falla conocida de otra placa. En seguida se muestra otro ejemplo. La Figura 6.37 se elaboró para ser utilizada con fines prácticos de cálculo.

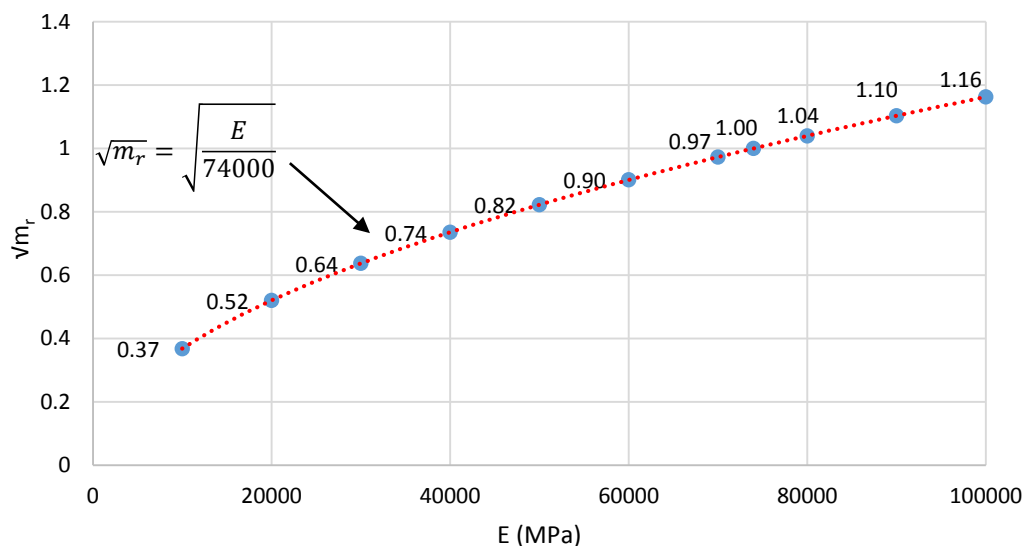


Figura 6.37 Gráfico para encontrar directamente el valor de $\sqrt{m_r}$ ante los posibles valores de E .

Al parecer la influencia de m_0 y θ_{inerte} en la predicción de la resistencia de un vidrio también puede ser ajustada para nuevos valores experimentales de estos parámetros, aunque sea de manera aproximada, esto se puede lograr por medio de un par de relaciones más. Para demostrarlo, se muestran los datos que se presentan en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15 Datos para el ejemplo.

Parámetro	Placa para la cual su resistencia de falla ante carga fue estimada inicialmente con:	Placa que requiere una nueva estimación de resistencia de falla con los datos siguientes:
θ_0 (MPa)	59.88	48.38 (ecuación 6.10, izq.)
m_0 (adimensional)	5.18	6.50
θ_{inerte} (MPa)	197.95	125.45
E (MPa)	74000	93000
Resistencia de falla (KPa)	$R_{f, inicial} = 5.40$	$R_{f, final} = ?$

El primer paso será el de determinar el nuevo valor que adoptará θ_0 por medio de la relación modular con el módulo de elasticidad de 93 GPa, como se ejemplificó anteriormente, esto es:

$$\theta_0 = 59.88 \sqrt{\frac{93000}{74000}} = 67.13 \text{ MPa}$$

El nuevo valor de θ_0 resultó mayor porque la relación modular fue mayor que uno ($\sqrt{m_r} = 1.12$), al tener que pasar a un módulo de elasticidad mayor. Con el uso de este mismo nuevo valor de θ_0 , debemos recalculamos θ_{inerte} con la ecuación 2.10 (lado izquierdo de la expresión), como se muestra a continuación:

$$\theta_{inerte} = \theta_0 \left(\frac{A \left(\frac{-1}{m_0} \right)}{A_0} \right) = 67.13 (0.002043^{\frac{-1}{5.18}}) = 221.91 \text{ MPa}$$

Entonces, ahora hacemos una segunda modificación al valor de θ_0 , a través de una nueva relación simple entre valores de θ_{inerte} , como sigue:

$$\theta_0 = 67.13 \left(\frac{125.45}{221.91} \right) = 37.95 \text{ MPa}$$

El nuevo valor de θ_0 decrece, porque el valor de $\theta_{inerte} = 125.45$ MPa es menor al valor recalculado de $\theta_{inerte} = 221.91$ MPa. Finalmente y por último, debemos afectar el valor de θ_0 anteriormente estimado, mediante la siguiente relación de entre los valores respectivos de m_0 :

$$\theta_0 = 37.95 \cdot 0.002043^{\left(\frac{1}{6.5} - \frac{1}{5.18} \right)} = 48.37 \text{ MPa}$$

Como se observa, el valor definitivo de θ_0 incremento, ya que la relación anterior es mayor que la unidad, llevándonos a un valor de $\theta_0 = 48.37$ MPa, que es igual al valor mostrado en la Tabla 6.10 para estimar la nueva resistencia. El proceso anterior se ilustra también gráficamente por medio de la Figura 6.38.

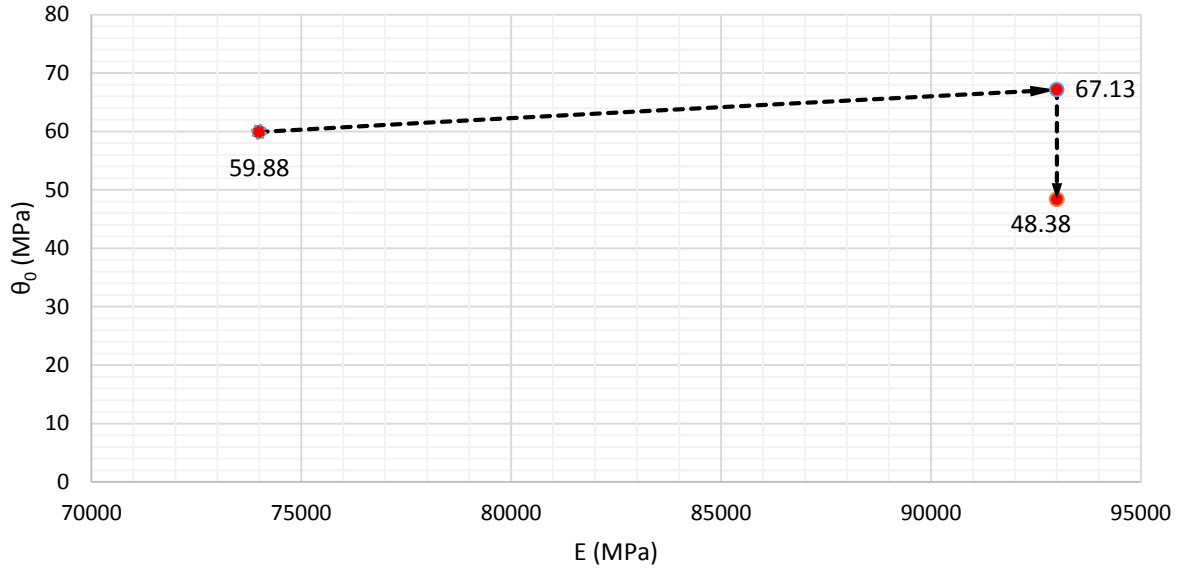


Figura 6.38 Recorrido de $\theta_0 = 59.88$ MPa para estimar el valor de 48.38MPa.

Entonces, de acuerdo con lo anterior, ha quedado explicada la influencia parcial de cálculo de los variables o parámetros para condiciones inertes (ec. 6.11), que incluye el módulo de elasticidad sobre θ_0 . Por lo que ahora tendrá más sentido dicha relación si se expresa únicamente por medio de un solo factor global, g_f .

$$g_f = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (6.15)$$

O bien, de esta otra forma más explícita e individual de cada factor y a partir de los parámetros de referencia de las Tabla 6.13:

$$g_f = m_r^{0.5} \cdot f \cdot g \quad \text{donde,} \quad (6.16)$$

$$m_r^{0.5} = \sqrt{\frac{E}{74000}}, \quad f = A^{\left(\frac{1}{5.18} + \frac{1}{m_0}\right)} \quad y \quad g = \frac{\theta_{inerte}}{\left(A^{\frac{-1}{5.18}}\right) \theta_0 \sqrt{\frac{E}{74000}}}$$

Una primera predicción en la resistencia de un elemento de vidrio, con la propiedad de $E = 74000$ Mpa y los parámetros $m_0 = 5.18$ y $\theta_0 = 59.88$ MPa también definidos en la Tabla 6.13, podrían servir de base para conducirnos a una nueva predicción de la resistencia de otro elemento de vidrio con las mismas características geométricas, de carga y de apoyo, pero que por medio de pruebas coaxiales de doble anillo bajo condiciones inertes adicionalmente exigidas, han resultado nuevos parámetros y diferentes a los relacionados con la primera predicción. Es cuando las ecuaciones 6.11, 6.15 y 6.16 planteadas en este tema toman la importancia debida, porque con ellas podríamos evitar un ahorro considerable en tiempos de trabajo tratando de determinar la nueva resistencia para el mismo elemento de vidrio considerando sus nuevas propiedades y parámetros. Por supuesto esto va más enfocado a la predicción de placas de vidrio con el modelo probabilístico de la ecuación 3.46, por ahora, consideraremos que las resistencia de falla presentada en la Tabla

6.13 es completamente válida y correcta, esto con el fin de completar el ejercicio, ya que la metodología para la determinación precisa de la predicción de la resistencia de falla de diferentes paneles de vidrio se presentará en el siguiente capítulo, lo cual es el objetivo principal de este trabajo. Mientras tanto, podremos determinar el factor necesario por medio de la ecuación 6.15:

$$g_f = \frac{48.38}{59.88} = 0.81$$

Sin embargo, como m_0 , dentro del modelo de predicción de la ecuación 3.46, es un exponente, la relación lineal no es suficiente para acercarnos a la nueva predicción que deseamos, por lo que se propone la siguiente expresión de corrección, f_m :

$$f_m = \left[\frac{\pi \cdot \ln(-P_f + 1)}{-2} \right]^{\frac{1}{m_0} - \frac{1}{5.18}} \quad (6.17)$$

La expresión anterior resultó de igualar entre sí la ecuación 3.46, donde en una de ellas se sustituyeron los parámetros: $m_0 = 5.18$, $\theta_0 = 59.88$ Mpa, que son los valores utilizados en la predicción de los elementos de vidrio en este ejemplo y los definidos para el MPFCV del capítulo 7. Entonces, para el ejemplo esto conduce a:

$$R_{f,final} = R_{f,initial} \cdot g_f \cdot f_m = (5.40) \cdot (0.81) \cdot \left[\frac{\pi \cdot \ln(-0.008 + 1)}{-2} \right]^{\frac{1}{6.5} - \frac{1}{5.18}} = 5.19 \text{ kPa}$$

Vemos que la operación anterior que corresponde a la predicción de resistencia de falla final, a través de la predicción inicial y multiplicada por el factor global y por el factor de corrección debido a m_0 , resultó un valor igual a 5.19 kPa, que es 3.89% menor que la predicción de falla inicial de 5.40 kPa.

Conclusiones

Un valor de $E = 74$ GPa queda justificado para el diseño de elementos estructurales de vidrio ante acciones de corta duración, por ejemplo: 1s, 3s, 60s, 120 s, etc.

La relación modular m_f dentro de las ecuaciones 6.11 y 6.14 contribuye a considerar un valor de E confiable como propiedad del vidrio para el diseño estructural, ante diversos valores del módulo de elasticidad, por ejemplo, los producidos experimentalmente por diferentes tasas de esfuerzo.

Los parámetros de la condición inerte de la superficie del vidrio se determinan experimentalmente bajo una tasa de esfuerzo mayor que 20 MPa/s y con las ecuaciones 6.9 y 6.10, para representar la resistencia de falla de forma confiable, al evitar el crecimiento subcrítico de grieta durante los ensayos.

Los parámetros de condición no inerte de la superficie del vidrio se determinan experimentalmente bajo una tasa de esfuerzo menor que 20 MPa/s y con las ecuaciones 6.12 y 6.13, para representar las condiciones ambientales a las que se verá sometido un elemento de vidrio durante su vida útil. En ocasiones el diseño puede resultar conservador bajo esta condición de parámetros (afectados por el crecimiento subcrítico de grieta durante los ensayos), pero pueden resultar adecuados para aquellos elementos de vidrio donde:

Capítulo 6 Pruebas Experimentales

- Se proporcione poco mantenimiento sobre ellos durante su vida útil.
- Se presente diferentes duraciones e intensidades de las acciones de diseño.
- Se presenten expuestos directamente al medio ambiente.

Los parámetros de la condición inerte de la superficie del vidrio en conjunto con las ecuaciones 6.15, 6.16 y 6.17 facilitan la labor de cálculo para la predicción de falla de más elementos de vidrio a partir de una predicción de falla anteriormente determinada.

Modelo de Predicción de Falla de Cortinas de Vidrio

7.1 Introducción

En el presente capítulo se describe e implementa el MPVÚ (ecuación 3.46) para elementos estructurales de vidrio de la construcción. Un edificio siempre requiere de uso de ventanas o de cortinas de vidrio para iluminar espacios interiores con luz natural durante la mayor parte del día, y de esta forma propiciar un consumo de energía solar que es sustentable. Además, los sistemas de cortinas de vidrio en fachadas de edificios en México requieren del desarrollo de una metodología, como base de diseño para que estas sean seguras ante demandas a que estarán sujetas durante su vida útil. Debido a esta necesidad, en este trabajo se busca implementar el MPVÚ a un sistema de cortina de vidrio a base de marcos, el cual brinde apoyo y sujeción a los bordes de una placa de vidrio ante carga lateral uniforme, como los mostrados ya en la sección 2.3.1.4.

El MPVÚ expresado por la ecuación 3.46, es un modelo probabilístico que considera un conjunto de fisuras aleatorias sobre la superficie de un vidrio. Con ella se pueden generar curvas de fragilidad asociadas a placas de vidrio simplemente apoyadas en sus cuatro bordes, con diferentes relaciones de aspecto y espesores, así como ante una condición de carga uniforme con una duración de solamente 3 segundos y con un módulo de $E = 74000$ MPa, definido en la Tabla 6.13. Con base en esto, se desarrolla el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio (MPFCV) que se presenta al final de este capítulo, mediante gráficas de ayuda de diseño que se desarrollaron para una fácil implementación.

7.2 Modelo analítico de placas simplemente apoyadas en sus cuatro bordes

Algunos de los parámetros necesarios para implementar el MPVÚ se determinan a partir de un modelo analítico, del cual se estiman principalmente los esfuerzos principales (S_1 y S_2) correspondientes a sub-áreas (A_i) en que están divididas las placas de vidrio, con base en esta información se determina la probabilidad de falla (P_f) asociada al modelo analítico de placa representativa del caso de interés. Para la solución analítica se buscó un programa de cómputo que optimizara el tiempo de trabajo, así como la eficiencia en el número de casos resueltos y que fuera capaz de desarrollar análisis que consideren los efectos de no linealidad geométrica; por lo que se eligió el software comercial Ansys 14.5, que es un programa que ofrece múltiples aplicaciones a las diferentes ramas de la ingeniería. Su base fundamental es el desarrollo de modelos analíticos mediante el método de elementos finitos, requisito esencial para generar los resultados de las placas de vidrio propuestas en este trabajo de investigación. A pesar de que el software comercial tiene muchas aplicaciones para resolver desde problemas simples hasta complejos, para resolver nuestro caso fue necesario implementar únicamente el módulo de “Static Structural” del software Ansys 14.5, para desarrollar los análisis estáticos sobre el material isotrópico del vidrio. Otro aspecto importante, es que Ansys 14.5 es un programa capaz de desarrollar análisis no lineales geométricos, los cuales son indispensables para modelar el comportamiento de placas que presentan grandes deflexiones, mayores a un tercio de su espesor (Ventsel, E. y Krauthammer, T., 2001), debido a su

relación de aspecto, ya que para estos valores de deflexión la teoría lineal de placas de Kirchhoff deja de ser precisa, es decir, deja de aproximarse a los esfuerzos y deformaciones a que está sometida realmente la placa, porque no son considerados los aspectos del estrechamiento que se presentan en la zona de la mitad de los bordes y los esfuerzos de membrana. En la Figura 7.1 se ilustra el comportamiento de una placa de vidrio mediante la curva carga vs. deformación para resultados experimentales y los resultados obtenidos del modelo matemático desarrollo para un comportamiento elástico lineal con los efectos de la no linealidad geométrica y sin ella (Haldimann, M., Luible, A. y Overerd, M., 2008). La Figura 7.1 se muestra una curva de resultados experimentales de una placa de vidrio templado de 1.6764 x 1.6764 m y de 5.66 mm de espesor, simplemente apoyada en sus cuatro bordes, sometida a una carga uniforme. Los resultados de la teoría lineal de placas se observa que están lejos de predecir el comportamiento, y que sobreestiman las deflexiones y esfuerzos comparados con los resultados reales obtenidos de la prueba experimental, mientras que mediante la teoría de grandes deformaciones los resultados estuvieron muy cerca de predecir correctamente el comportamiento real de la placa de vidrio templado de la curva experimental.

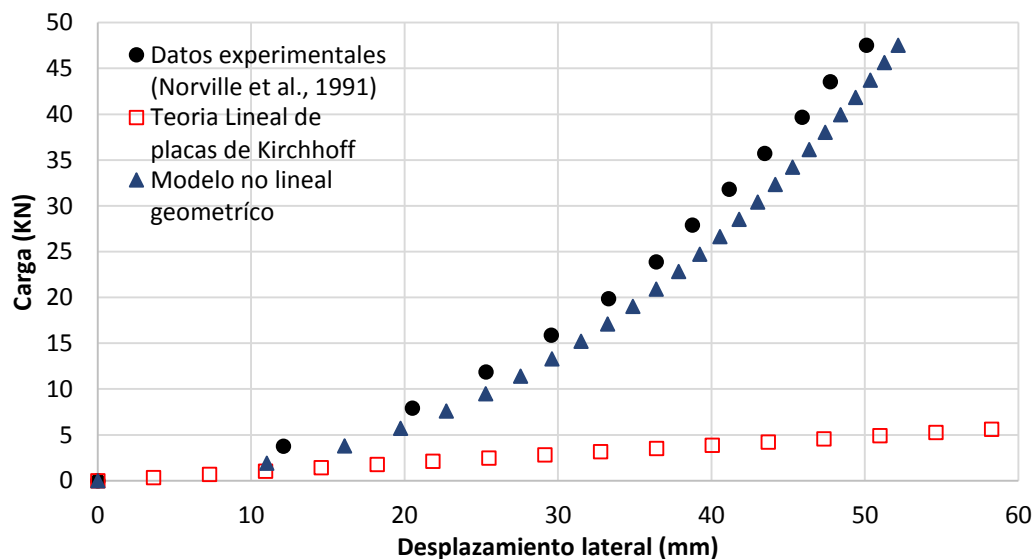


Figura 7.1 Gráfica de carga vs. deflexión, *Ilustra la aproximación de las curvas de la teoría de placas y de la teoría de grandes deformaciones ante los datos experimentales de una placa de vidrio templado de 1.676 m x 1.676 m y espesor de 5.66 mm.*

Se observa que la curva más precisa corresponde a la que considera la no linealidad geométrica para estimar el comportamiento de la placa de vidrio, creada con Ansys Workbench 14.5. En el modelo no lineal geométrico se utilizó un módulo de elasticidad de 74000 MPa, una relación de Poisson de 0.23 y elementos finitos tipo placa de 4 nodos (Shell 181).

Una vez validada la teoría de grandes deformaciones como el método apropiado para estimar el comportamiento de placas de vidrio, se definió la cantidad de modelos analíticos de placas de vidrio simplemente apoyadas en sus cuatro bordes a estudiar mediante diferentes relaciones de aspecto, altura entre ancho (a/b , donde $a > b$), la cual se cubrió para las siguientes relaciones de aspecto: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 y 7, los casos de estudio se limitan al tamaño máximo de hoja de vidrio recocido que con mayor facilidad se puede encontrar en el mercado, 2.5 m de ancho por 3.5 m de altura. Como resultado de estas consideraciones, el número de modelos analíticos de no linealidad geométrica desarrollados fue de 56 para cada espesor UMSNH

nominal que se puede adquirir en la industria de la construcción: 2.5 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm y 25 mm, algunos de estos espesores corresponden a los mencionados por la norma oficial mexicana, NOM-146-SCFI-2001. El número total de modelos fue de 672. La intensidad de la carga uniforme o normal al plano de la placa de vidrio que se consideró para cada uno de uno de los 672 modelos fue en promedio, y para la gran mayoría, de 0.02 MPa. El detalle específico de cada caso de estudio se reporta en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Modelos analíticos de paneles desarrollados en Ansys 14.5 para los espesores de 2.5 mm, 3mm, 4 mm, 5 mm, 6mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm y 25 mm, con diferentes relaciones de aspecto (a/b, donde $a \geq b$), a y b son las dimensiones de la placa en metros.

Tamaño de Shell (mm ²)		100	225	400	625	225	306.25	400	506.25	625	900
Relación de aspecto											
a/b = 1	a =	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75
a/b = 1.5	a =	0.75	1.13	1.50	1.88	2.25	2.63	3.00	3.38	3.75	
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	
a/b = 2	a =	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00			
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00			
a/b = 2.5	a =	1.25	1.88	2.50	3.13	3.75	4.38				
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75				
a/b = 3	a =	1.50	2.25	3.00	3.75						
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25						
a/b = 3.5	a =	1.75	2.63	3.50	4.38						
	b =	0.50	0.75	1.00	1.25						
a/b = 4	a =	2.00	3.00	4.00							
	b =	0.50	0.75	1.00							
a/b = 4.5	a =	2.25	3.38	4.50							
	b =	0.50	0.75	1.00							
a/b = 5	a =	2.50	3.75								
	b =	0.50	0.75								
a/b = 5.5	a =	2.75	4.13								
	b =	0.50	0.75								
a/b = 6	a =	3.00	4.50								
	b =	0.50	0.75								
a/b = 6.5	a =	3.25	5.25								
	b =	0.50	0.75								
a/b = 7	a =	3.50	5.63								
	b =	0.50	0.75								

7.2.1 Detalles de los modelos analíticos

Para explicar las bases de los modelos analíticos desarrollados en este trabajo, daremos un ejemplo representativo de ellos, para obtener los componentes necesarios para el MPVÚ. El ejemplo corresponde a una placa de vidrio recocido nuevo de 2000 mm por 2000 mm y 6 mm de espesor nominal. Las propiedades isotrópicas del vidrio empleadas en este modelo corresponden a:

- $E = 74\,000\text{ MPa}$
- $\nu = 0.23$
- Densidad = 2500 kgf/m^3

Adicionalmente fue posible aprovechar la simetría que se tiene en los paneles de vidrio, y con ello reducir el tiempo de cómputo mediante el desarrollo del modelo para un cuarto de placa (submodelo) para el desarrollo de análisis mediante elementos finitos, por lo que se simplificó mucho el trabajo. También es que a partir de esta consideración, se disminuyeron drásticamente los tiempos de espera sin que se comprometiera la precisión de los resultados. Por último, solamente queda establecer las condiciones de apoyo, restricciones en los nudos de borde, y de carga asumidas. La condición de apoyo de los cuatro bordes se hizo únicamente restringiendo el

desplazamiento fuera del plano del panel de vidrio, el cual corresponde al caso asignado con el número cero mostrado en la Figura 7.2. Esta condición de apoyo es típica en sistemas de acristalamiento a base de montantes y travesaños. En comparación con otras condiciones de apoyo de los mostrados esquemáticamente en la Figura 7.2, la condición de apoyo simple corresponde a la condición de mayor deflexión para una acción actuante fuera del plano de una placa de vidrio, ya que no impone ninguna restricción ante el giro en el apoyo mismo. La norma E1300 y CAN/CGSB-12.20-M89 principalmente usan esta condición de apoyo para los bordes de sus paneles de vidrio.

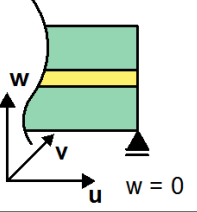
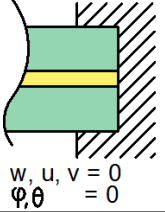
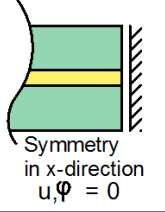
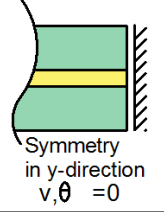
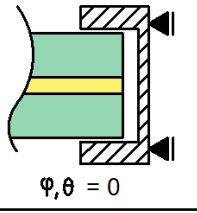
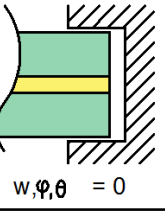
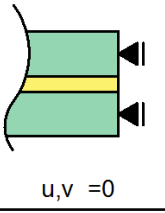
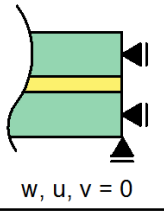
0	1	2	3
 $w = 0$	 $w, u, v = 0$ $\phi, \theta = 0$	 Symmetry in x-direction $u, \phi = 0$	 Symmetry in y-direction $v, \theta = 0$
4	5	6	7
 $\phi, \theta = 0$	 $w, \phi, \theta = 0$	 $u, v = 0$	 $w, u, v = 0$

Figura 7.2 Condiciones de apoyo para sistemas de acristalamiento. (Imagen tomada del programa SJ Mepla).

El elemento finito utilizado para modelar el comportamiento de las placas es el elemento Shell de cuatro nodos (Shell 181), donde la malla del ejemplo fue creada con elementos de 20 mm por 20 mm. Para otras placas, el tamaño de elemento Shell esta especificada en la Tabla 7.1. De esta forma el cuarto de placa del ejemplo queda definida por un total de 2601 nodos y 2500 elementos, como se muestra en la Figura 7.3.

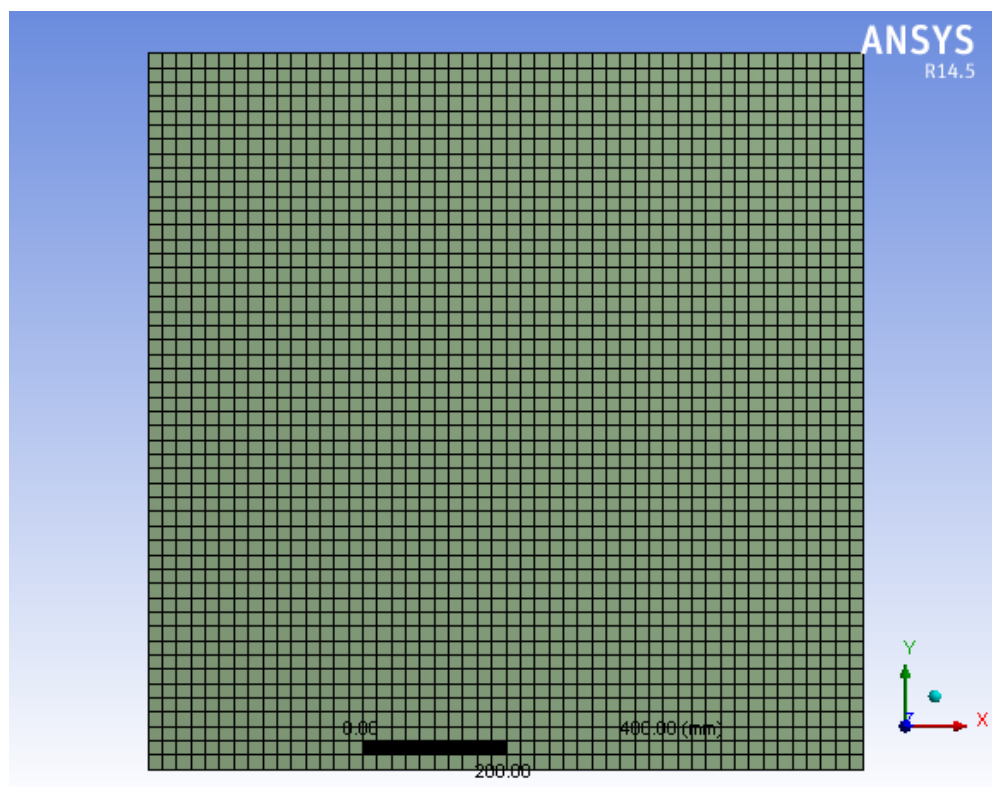


Figura 7.3 Malla representativa del modelo de un cuarto de placa.

Para ejemplificar la condición de carga de todos nuestros modelos analíticos, se presenta a continuación, la presión uniforme aplicada sobre la superficie de la placa de vidrio que para nuestro ejemplo se realizó mediante 20 estados de carga, los cuales corresponden a incrementos de carga 0.001 MPa, como se muestra en la Figura 7.4.

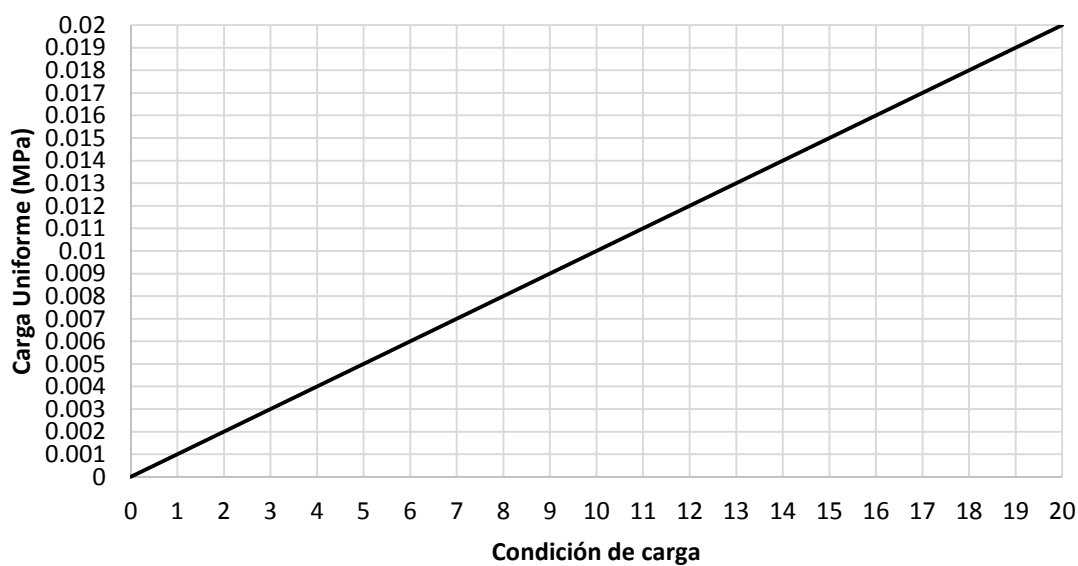


Figura 7.4 Condición de carga vs. intensidad de carga uniforme utilizada en el modelo de placa de vidrio recocido de 6 mm de espesor.

Finalmente, el submodelo está completo y listo para correr su análisis, y extraer los resultados que se muestran a continuación en formato de imágenes o mediante archivos electrónicos adjuntos. Los resultados que se presentan a continuación, se obtuvieron del programa Ansys Workbench 14.5 bajo la condición de análisis no lineal geométrico, como se expresó al inicio de este ejemplo. La Figura 7.5 muestra los resultados de carga uniforme contra deflexión.

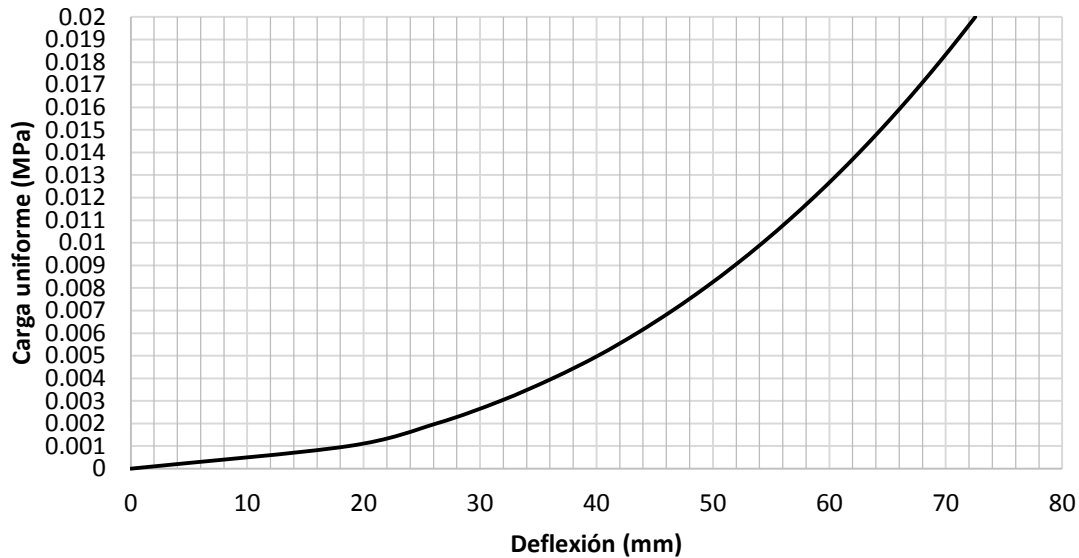


Figura 7.5 Deflexión vs. carga uniforme resultados obtenidos de Ansys Workbench 14.5 para la placa de vidrio recocido de 2 m por 2 m y 6 mm de espesor.

Para otra serie de resultados se presentan a continuación un par de gráficas más donde se relaciona a la carga con los esfuerzos principales S1 y S2, véase Figura 7.6.

El comportamiento de un material como el vidrio es de tipo elástico lineal, y como se observa en la Figura 7.6, la variación de la carga o presión uniforme contra los esfuerzos principales es también de comportamiento lineal. Por lo tanto, conocida la pendiente de los gráficos superior e inferior de la Figura 7.6, es posible extrapolar otros esfuerzos para otras intensidades de carga uniforme, sobre todo en aquellas placas de vidrio donde su resistencia fue superior a la calculada analíticamente.

La precisión obtenida de un ajuste lineal generalmente es suficiente y además justificable para fines prácticos y bajo el manejo de un gran volumen de información, también es muy simple y de clara aplicación. Aunque también existe la posibilidad de realizar ajustes con otro tipo de funciones, como la polinomial de segundo grado (o superior), con las que se puede ganar una mayor precisión en algunos casos, pero implicando mayor tiempo de cálculo.

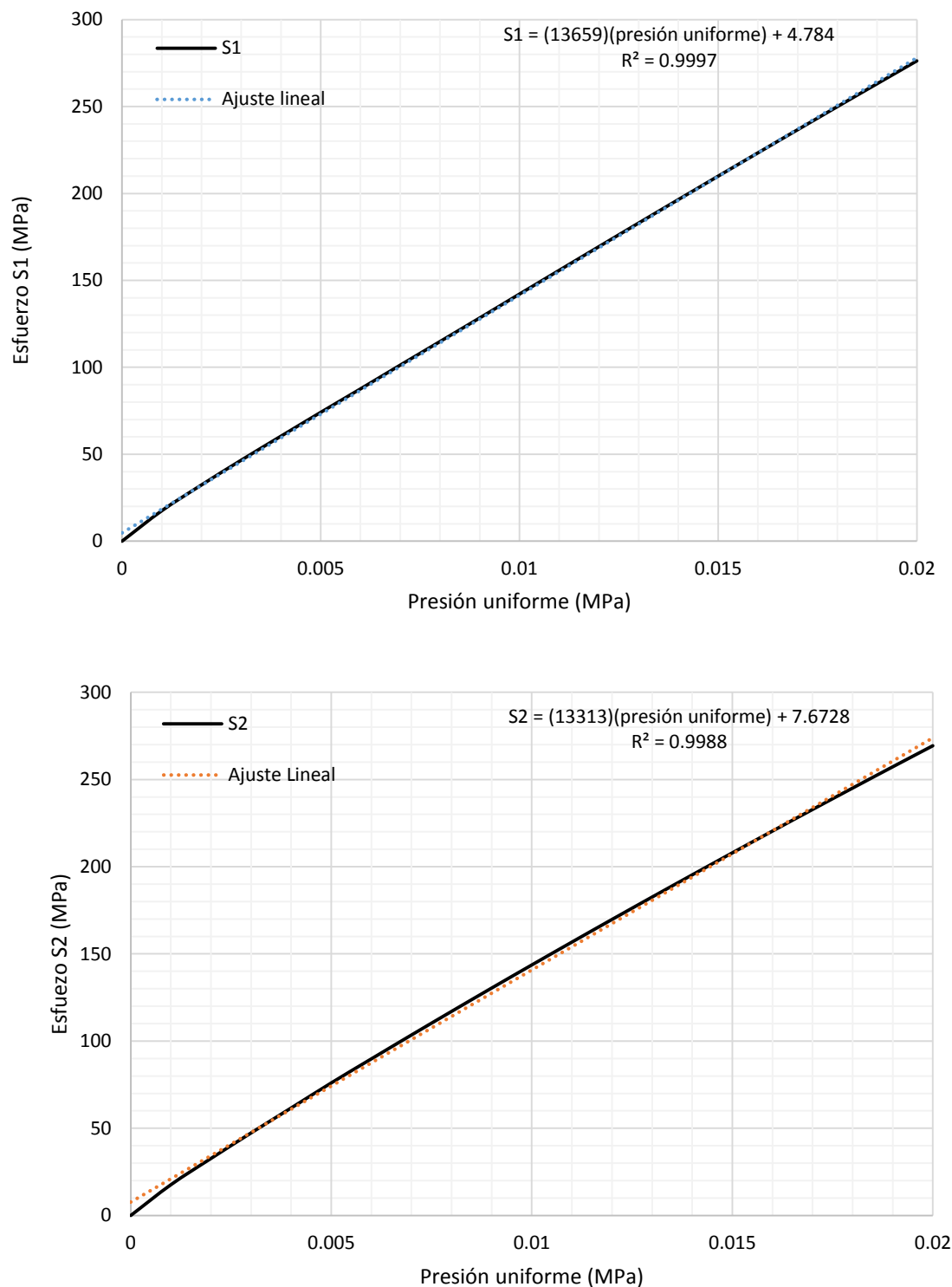


Figura 7.6 Gráficos de presión uniforme contra esfuerzos principales, S1 (arriba) y S2 (abajo), con ajuste lineal sobre ellos, indicada también están sus ecuaciones respectivas.

A continuación, la Figura 7.7 ilustra la distribución de los esfuerzos principales máximos (S1) y mínimos (S2), mencionados con anterioridad, en el plano de la cara inferior que se encuentra bajo esfuerzos de tensión en el caso de nuestro submodelo, y sus deformaciones se presentan

también fuera del plano para la condición de carga 20, la cual representa una carga uniforme de 0.02 Mpa.

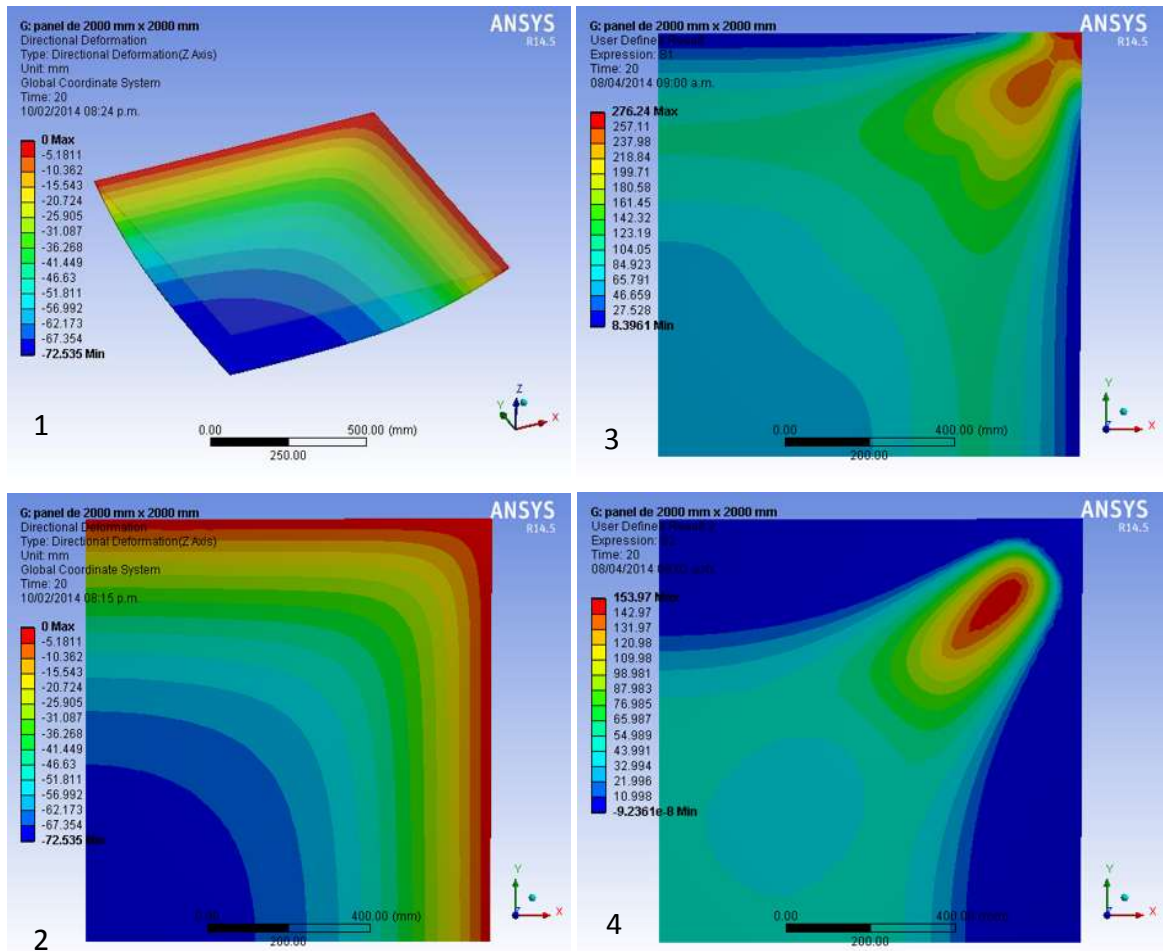


Figura 7.7 Muestra los resultados de esfuerzos y deflexión de la placa en estudio (espesor, 6 mm):

- 1) Vista de deformada de la placa ante carga de 0.02 Mpa.
- 2) Deflexión máxima en el centro de 72.5 mm.
- 3) Distribución de esfuerzo principal máximo, S1, para la carga uniforme de 0.02 MPa.
- 4) Distribución de esfuerzo principal mínimo, S2, para la carga uniforme de 0.02 MPa.

En la Figura 7.6 se observó que los esfuerzos sobre la superficie del panel de vidrio fueron directamente calculados en los 2601 nodos de los elementos Shell, sin embargo, la intensidad del esfuerzo requerida para el MPVÚ corresponde a cada subárea (A_i), lo que es igual al área de cada elemento shell en toda la malla del modelo de la placa de vidrio. Para estimar estos valores, los resultados se obtuvieron como el valor promedio de los 4 nodos adyacentes de cada elemento Shell, la Figura 7.8 muestra este aspecto.

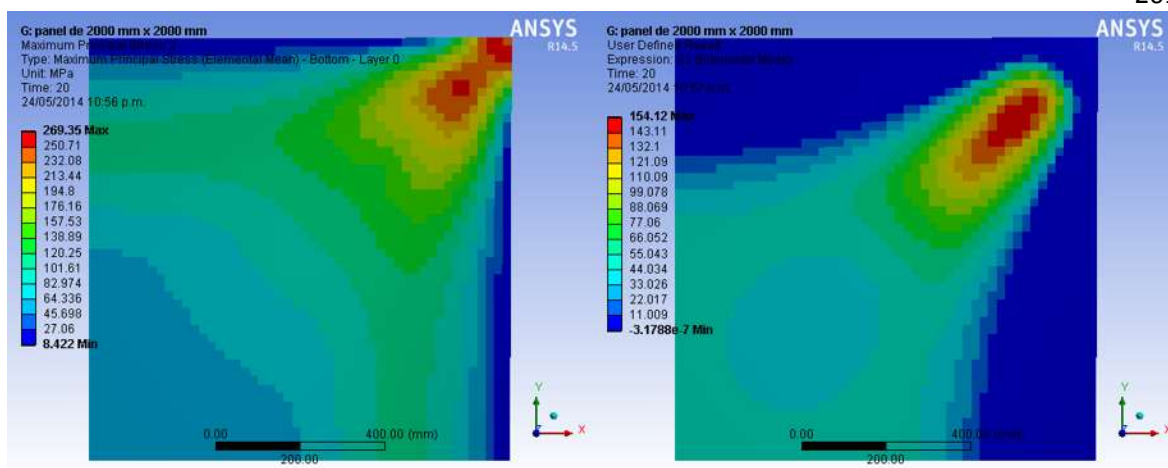


Figura 7.8 Distribución de esfuerzos principales máximo (izquierda) y mínimo (derecha) en cada elemento de subárea, A_i .

7.3 Resultados

En esta sección se presentan y se discuten los resultados obtenidos para los 672 modelos de paneles de vidrio recocido simplemente apoyados en sus 4 bordes, bajo la acción de carga uniforme. La forma de presentar los resultados es mediante tablas y gráficas de carga vs. deflexión, así como de carga vs. probabilidad de falla. Es importante recordar que en todos los modelos analíticos se emplearon valores nominales del espesor y que las cargas de diseño corresponden a cargas sin factorizar.

7.3.1 Curvas de fragilidad de carga uniforme contra probabilidad de falla de una placa de vidrio recocido nuevo

Las curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla, fueron construidas mediante el desarrollo de la ecuación 3.46. Los parámetros y propiedades del vidrio se presentan en la Tabla 7.2, que son también los valores de las variables que debemos proporcionar para la implementación de la ecuación 3.46.

Tabla 7.2 Conjunto de parámetros y propiedades considerados para la construcción de curvas de fragilidad para cada panel de vidrio recocido nuevo.

Parámetro (s)	Valor
Factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC})	23.7172 MPa-mm ^{0.5}
Factor de geometría de la fisura (Y)	1.12 (adimensional)
Parámetros de velocidad de grieta (v_0, n)	$v_0 = 6$ mm/s
	$n = 16$ (adimensional)
θ_0	59.88 MPa
m_0	5.18 (adimensional)
Módulo de elasticidad (E)	74000 MPa
Duración de carga uniforme (t)	3 (segundos)
Subárea (A_i)	depende del tamaño de shell (mm ²)
Esfuerzos principales S1 y S2	proviene del análisis de elemento finito (en MPa)

Para la elaboración de las curvas de fragilidad fue necesario programar la ecuación 3.46. Haldimann, M., 2006, programó su modelo con base en la ecuación 3.46, este código fue adoptado

Capítulo 7 Modelo de Predicción de Falla de Cortinas de Vidrio

como base y fue modificado, los cambios principales que se realizaron fueron de acuerdo a la necesidad de encontrar la predicción de falla de cortinas de vidrio, que en general los cambios fueron pocos, es decir, se eliminó el modelo de historia de acciones generalizada por una historia de acciones con duración constante (t), en consecuencia el código se simplificó y al mismo tiempo aumento su eficiencia de cálculo, y finalmente se le dio una interfaz gráfica para el usuario (GUI, siglas en inglés), previendo la posibilidad de que sirva como una herramienta de cálculo más accesible, la forma gráfica de la herramienta desarrollada se muestra en la Figura 7.9. El programa ejecutable (.exe) se encuentra anexo en el disco compacto de información adicional generada en este trabajo y que se presenta como parte del trabajo de tesis.

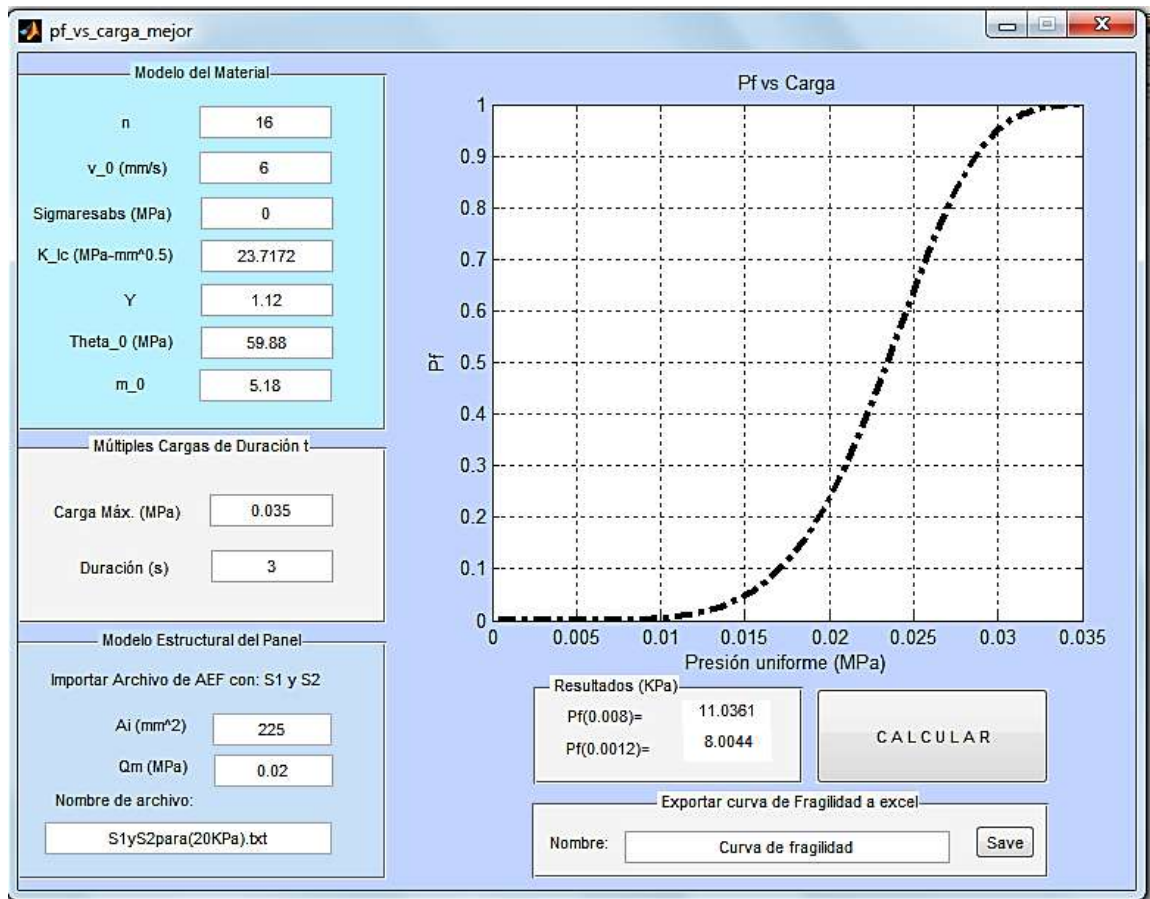


Figura 7.9 Interfaz gráfica para el usuario del programa de MPFCV, generador de curvas de fragilidad de carga uniforme contra la probabilidad de falla.

A continuación, se ilustra un conjunto de Figuras (7.10 a 7.21) donde se presentan los resultados obtenidos expresados mediante las curvas de fragilidad, cuyas gráficas presentan en el eje de las ordenadas la probabilidad de falla y en el eje de las abscisas la carga uniformemente repartida. Los resultados que involucran estas curvas consideran las variables aleatorias implícitas en la predicción de la resistencia de falla (en kPa). Estos resultados corresponden a probabilidades objetivo de 0.8% y de 0.12%, que son las que se manejan respectivamente en el código Americano y Europeo, para las placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 2500 mm x 2500 mm x h ($a/b = 1$) y 3500 mm x 500 mm x h ($a/b = 7$), donde h es el espesor nominal de los paneles de 2.5 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm y 25 mm. El resto de curvas de fragilidad estimadas en este trabajo se han incluido en el disco compacto de esta tesis

y las predicciones de falla para cada una de las placas de vidrio recocido se encuentran en el apéndice C.

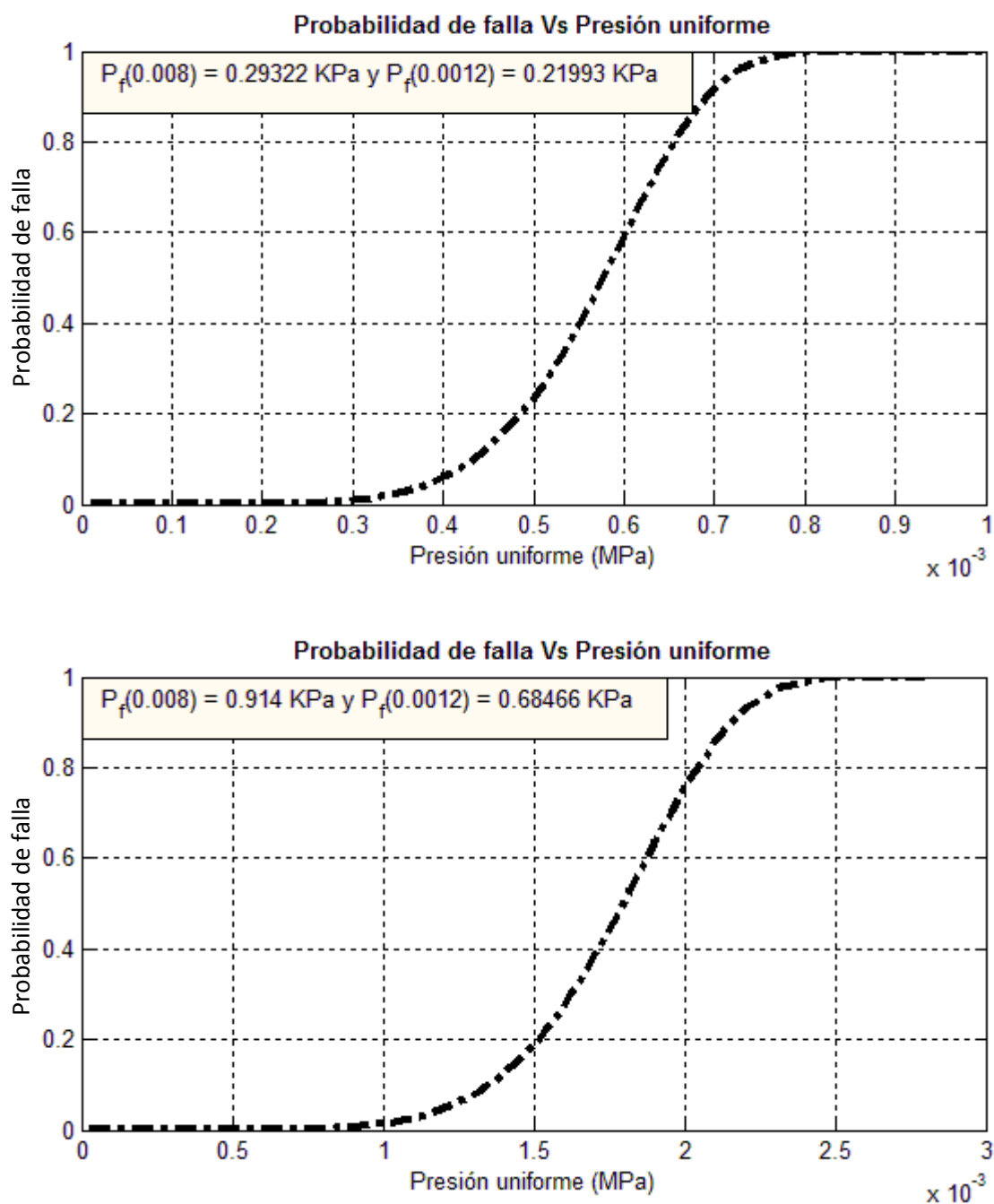


Figura 7.10 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 2.5 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 2.5 mm (abajo).

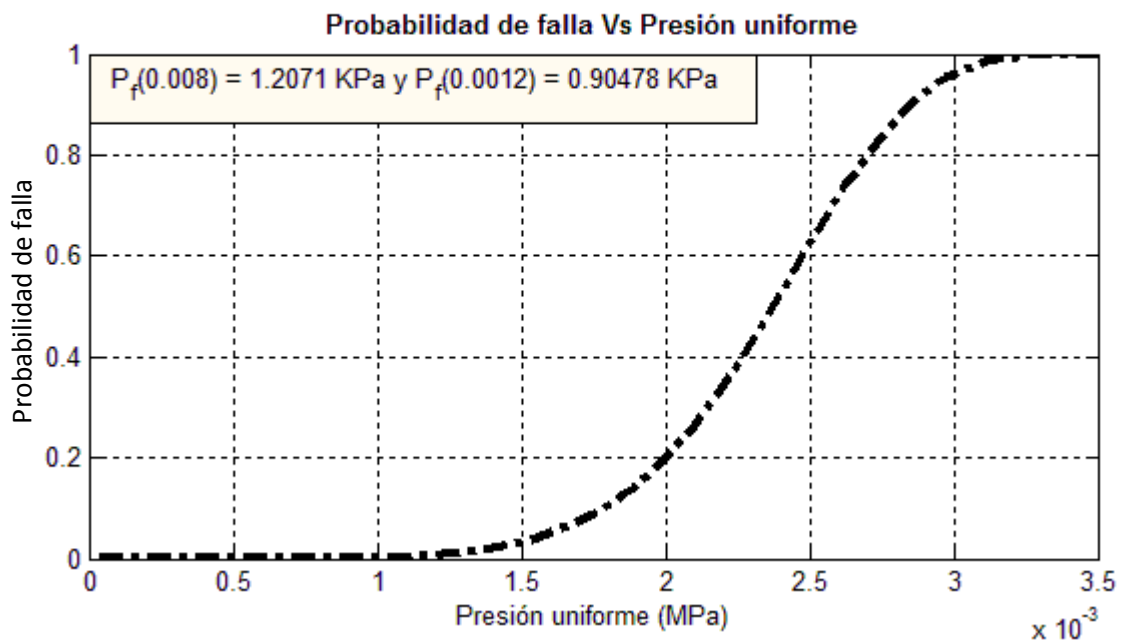
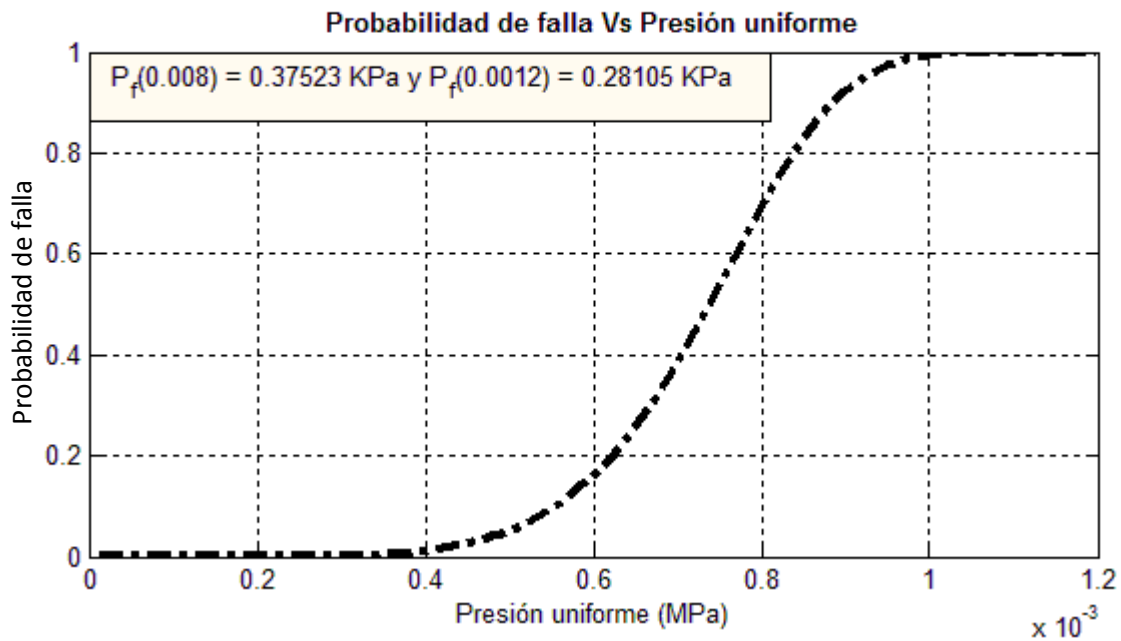


Figura 7.11 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 3 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 3 mm (abajo).

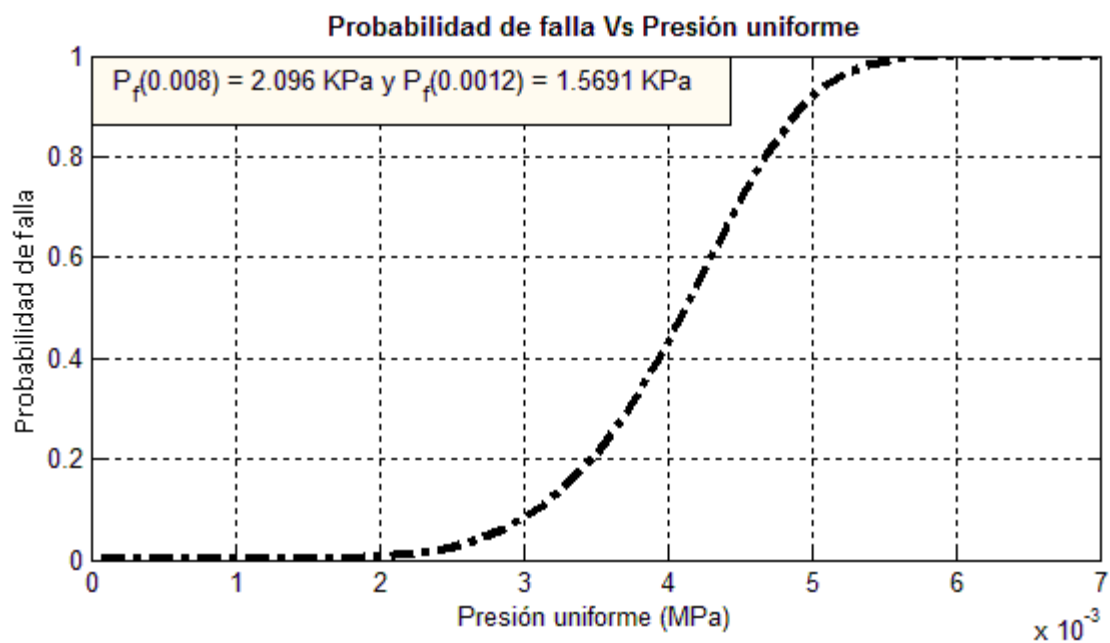
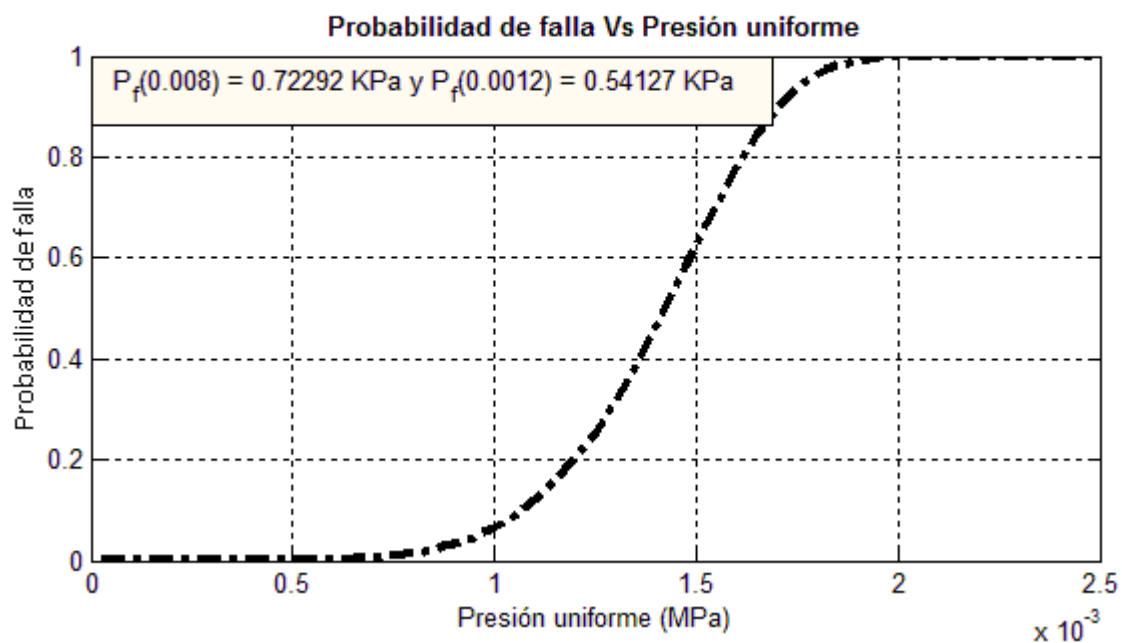


Figura 7.12 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 4 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 4 mm (abajo).

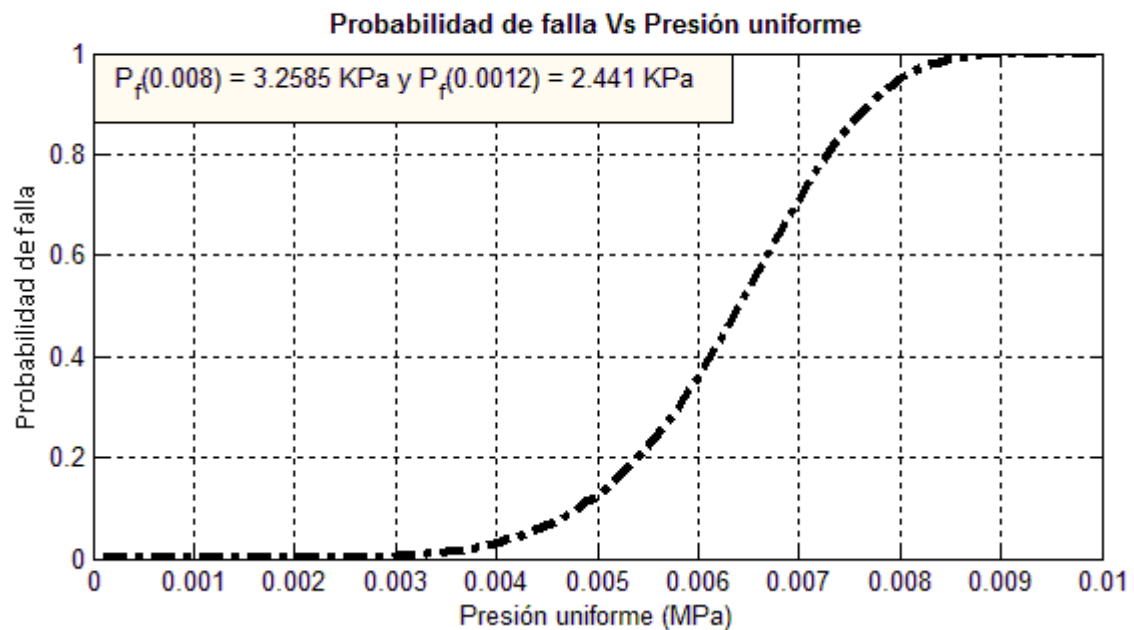
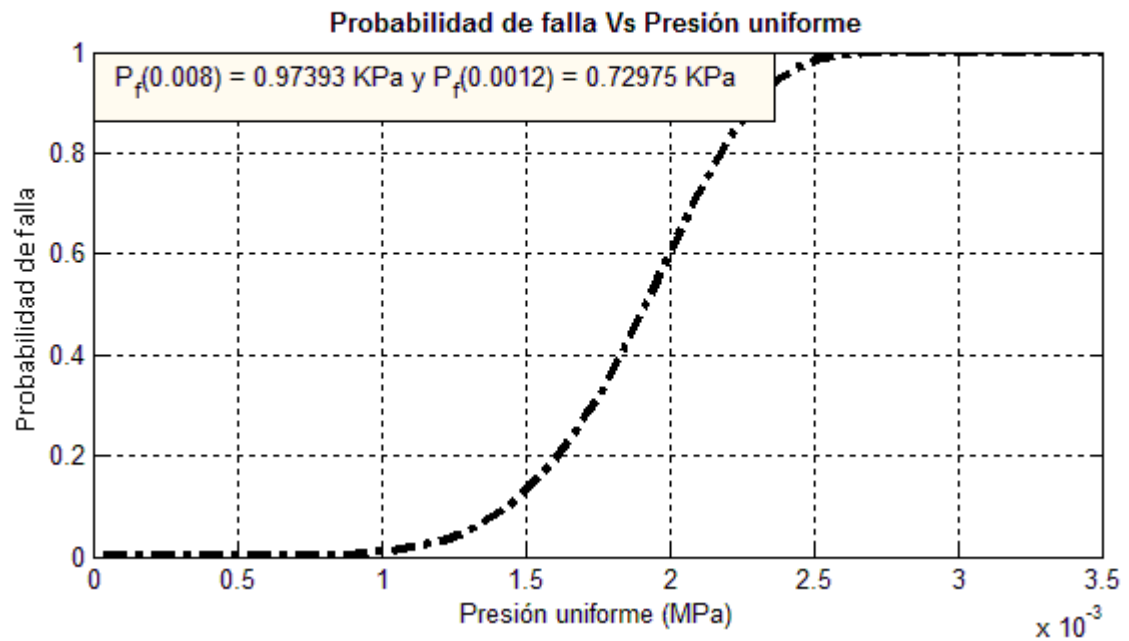


Figura 7.13 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 5 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 5 mm (abajo).

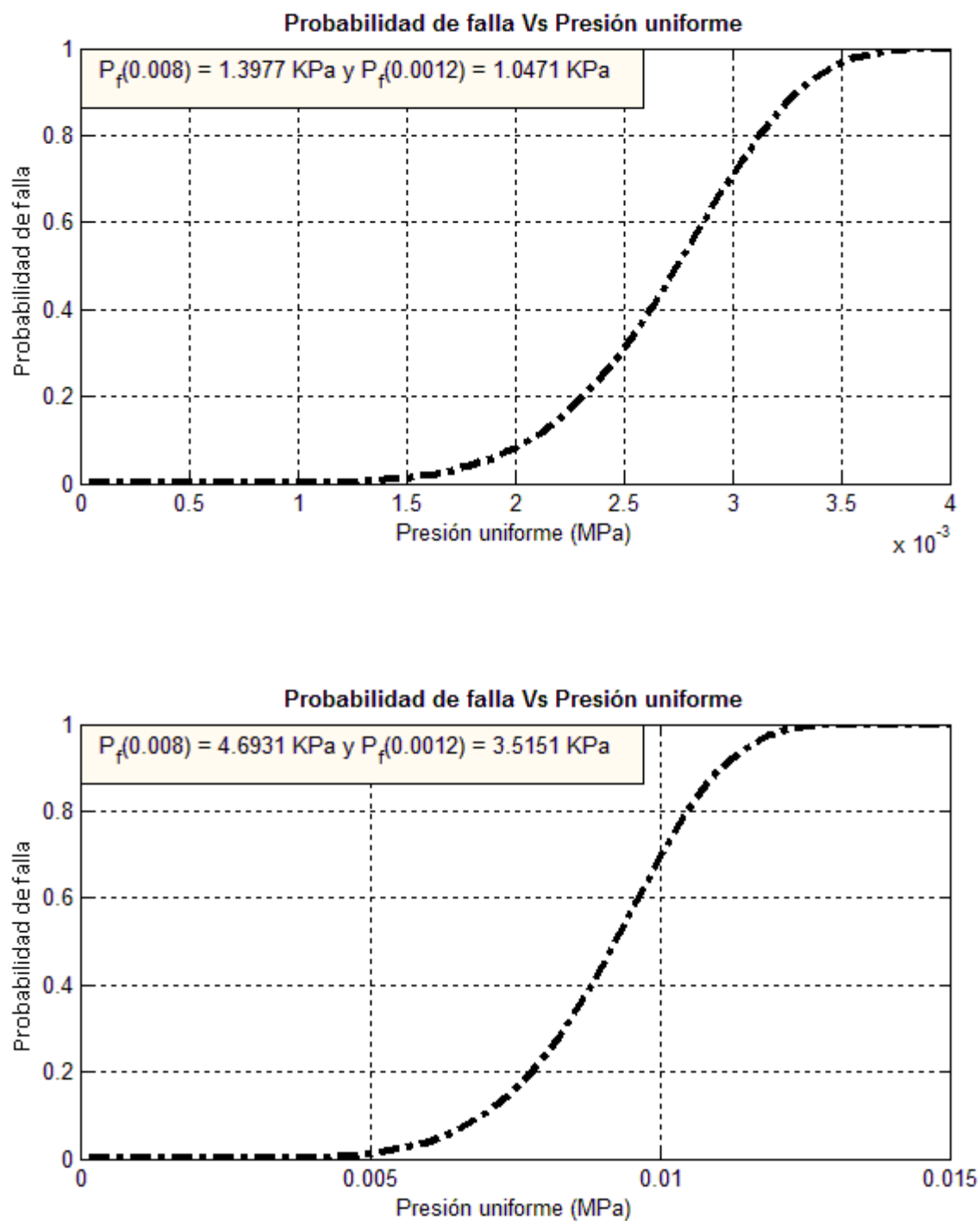


Figura 7.14 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 6 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 6 mm (abajo).

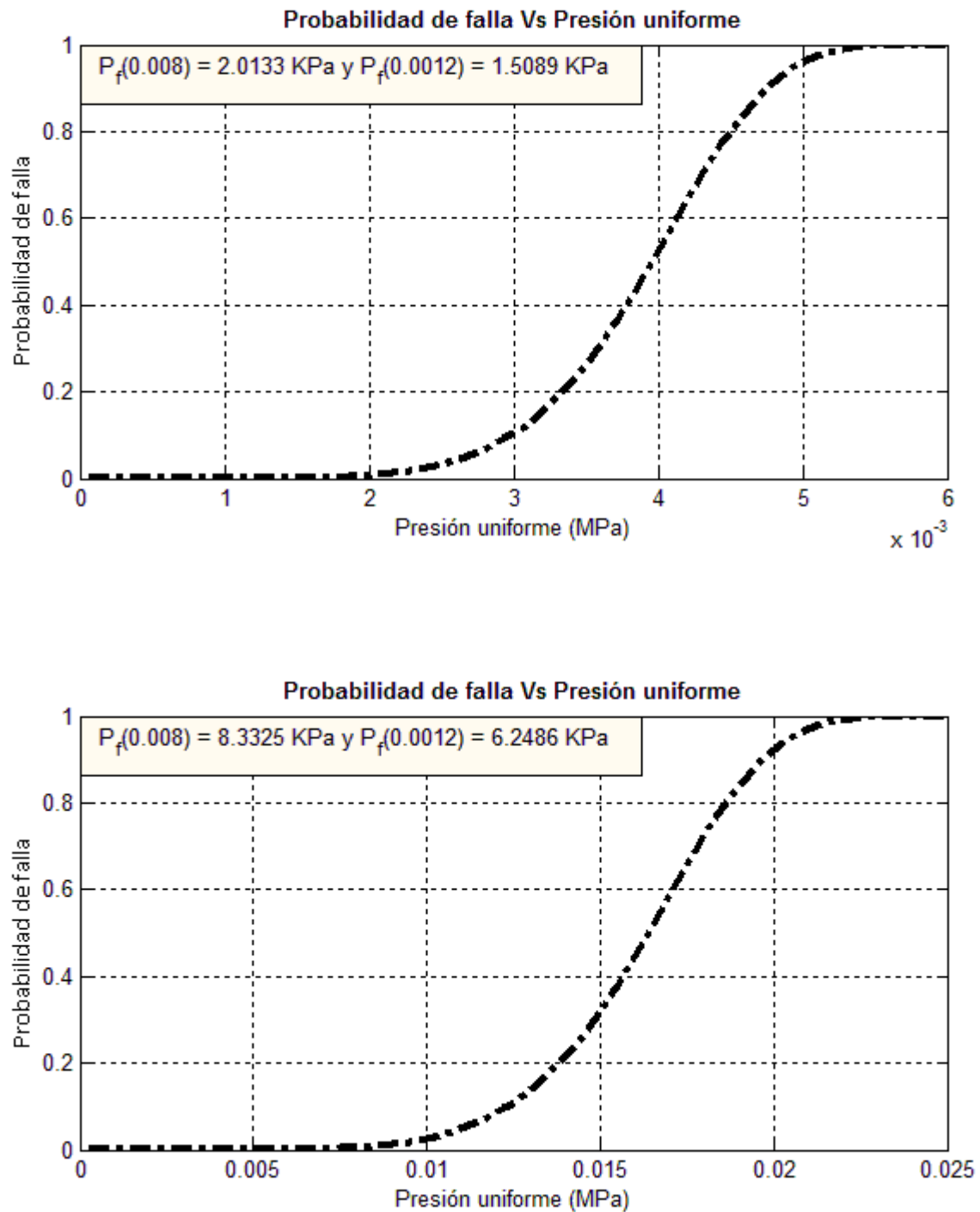


Figura 7.15 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 8 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 8 mm (abajo).

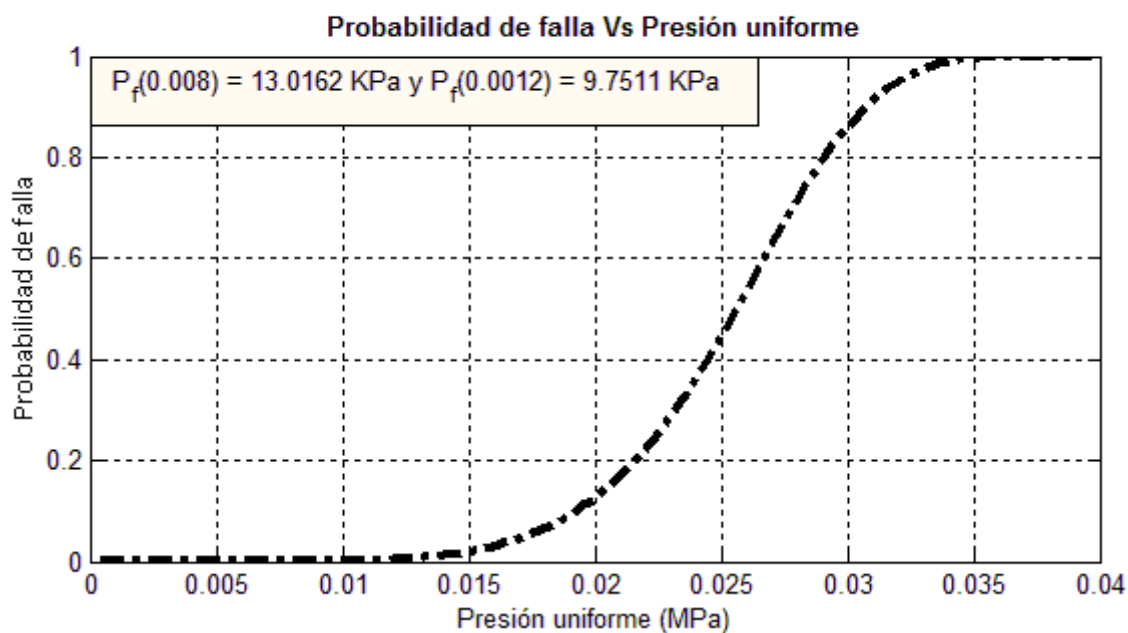
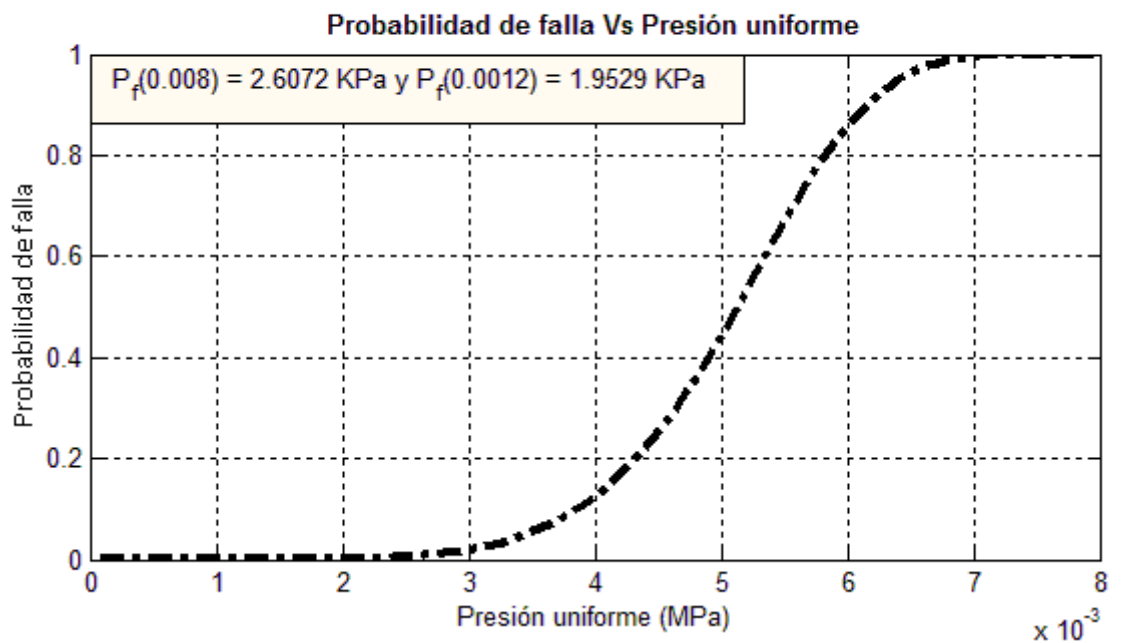


Figura 7.16 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 10 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 10 mm (abajo).

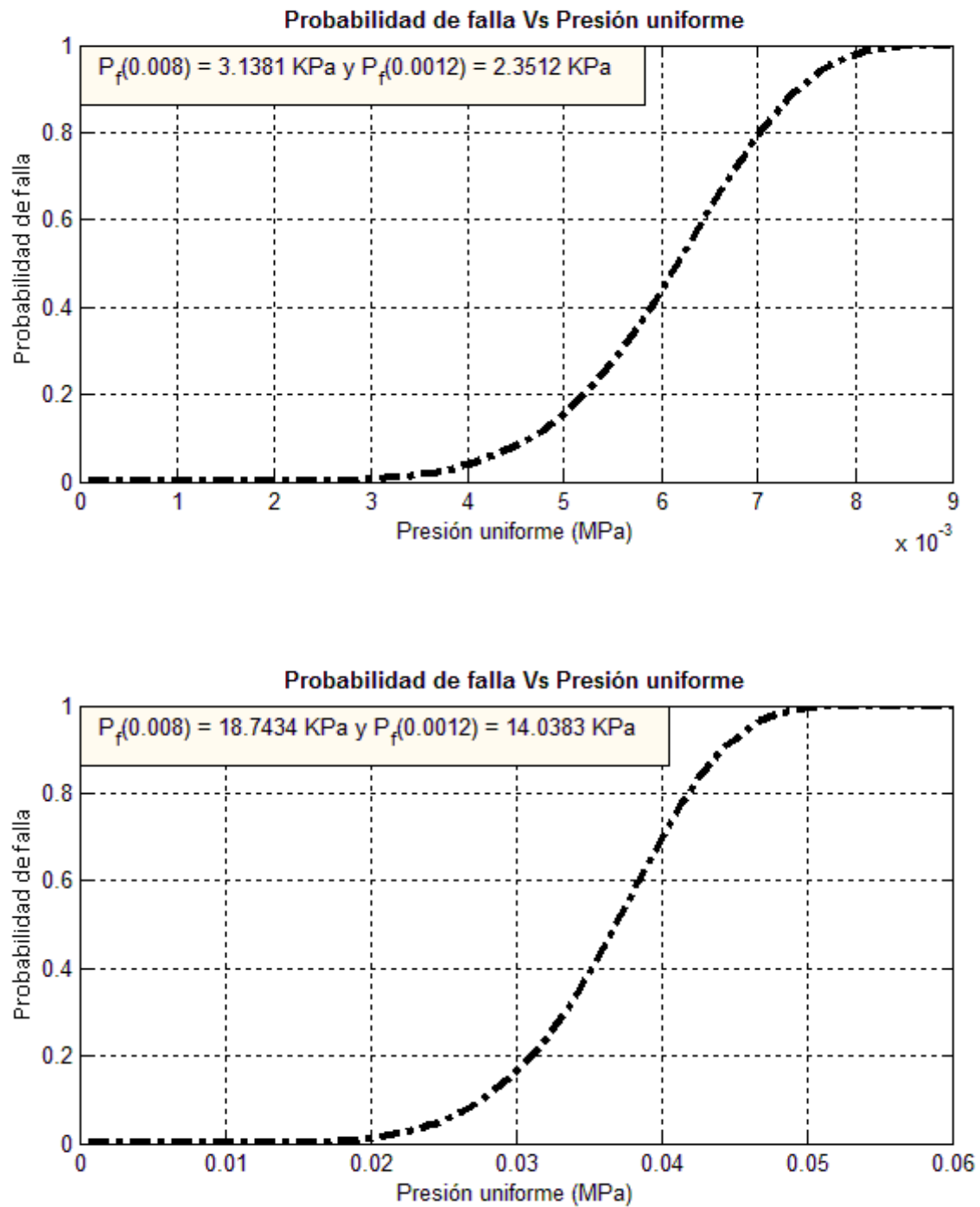


Figura 7.17 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 12 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 12 mm (abajo).

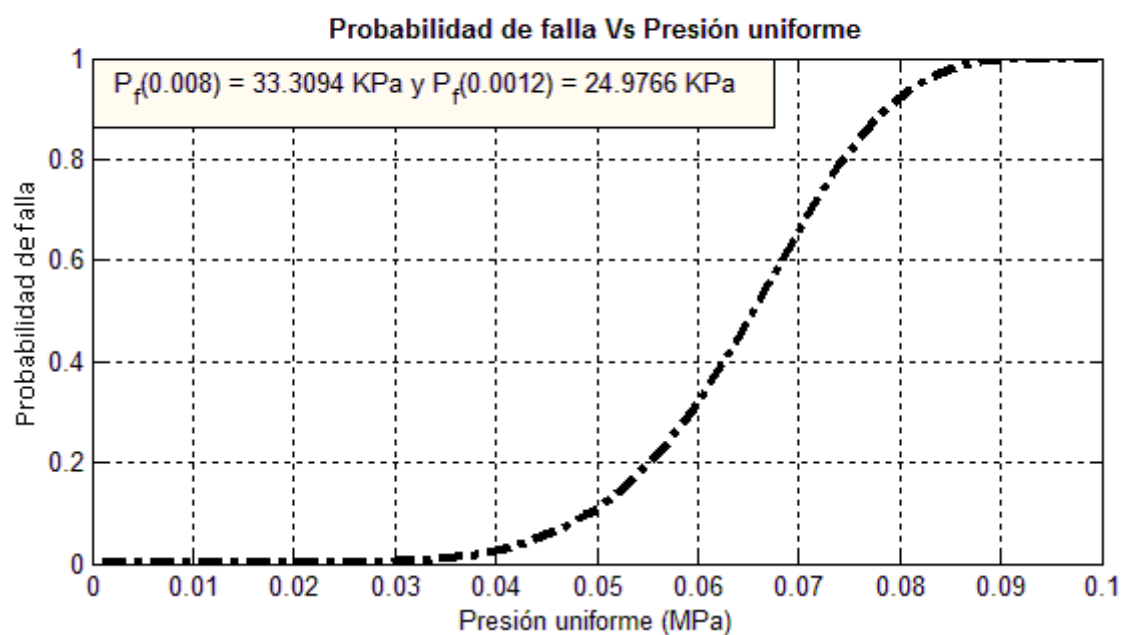
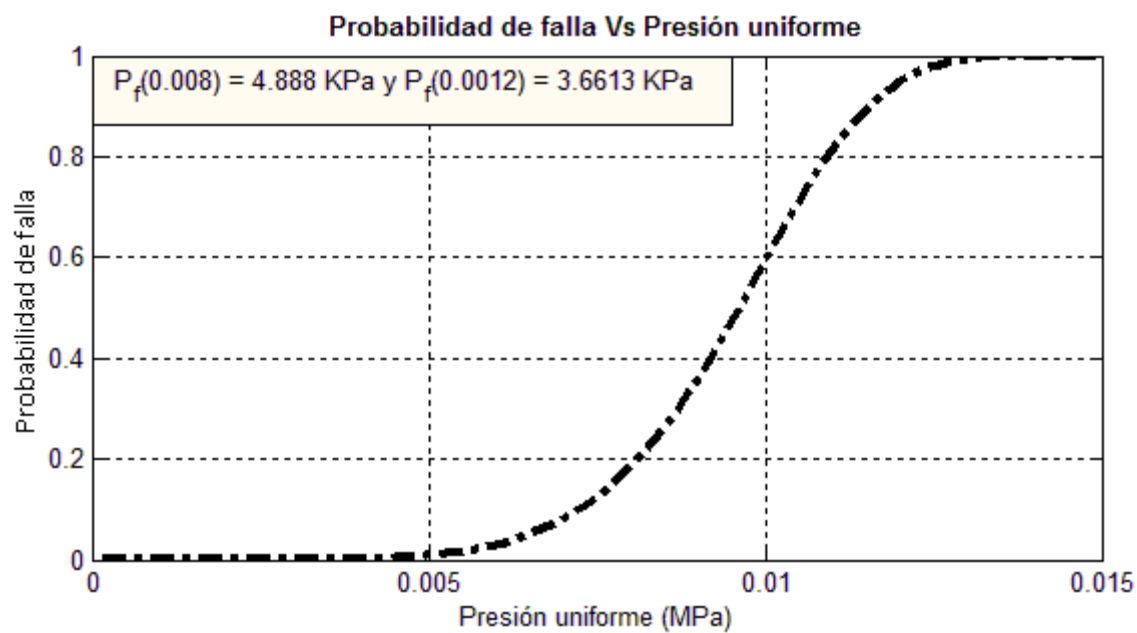


Figura 7.18 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 16 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 16 mm (abajo).

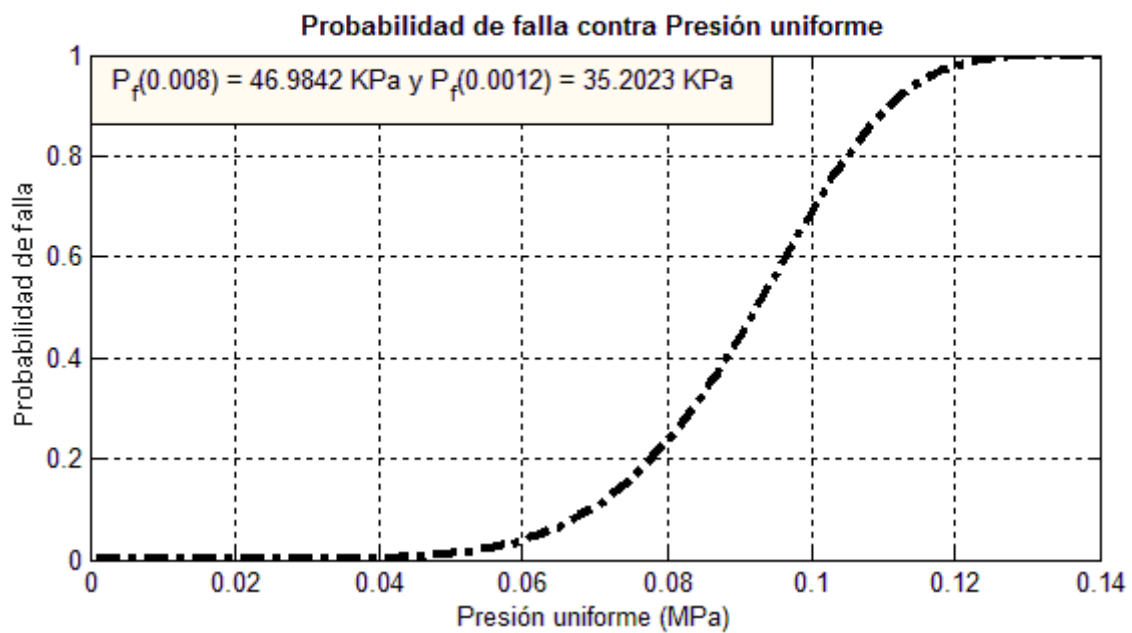
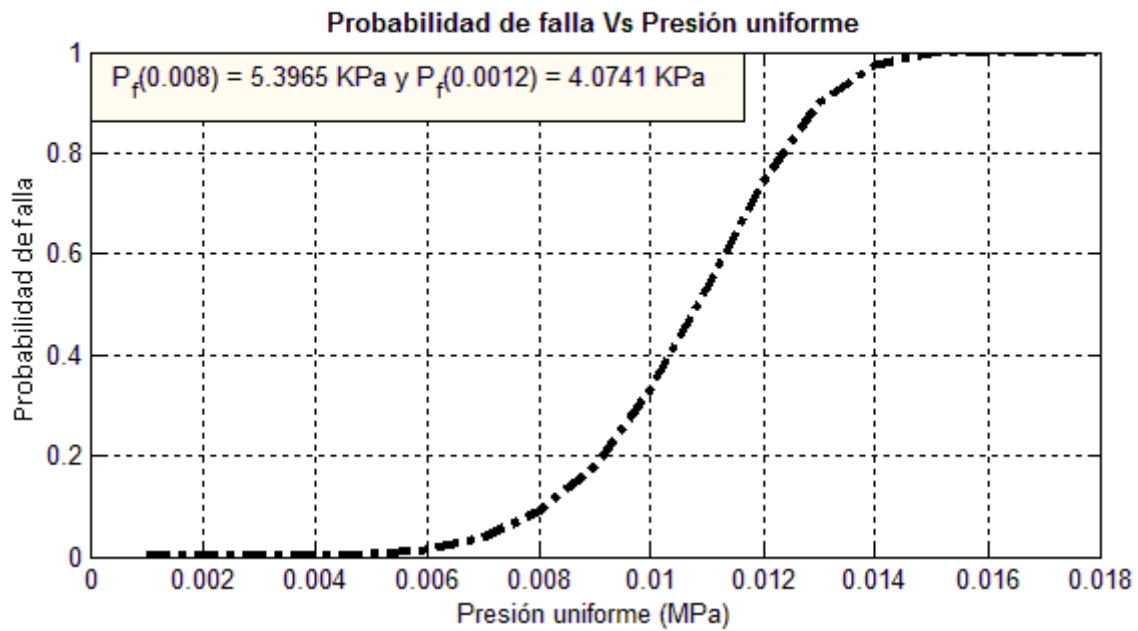


Figura 7.19 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 19 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 19 mm (abajo).

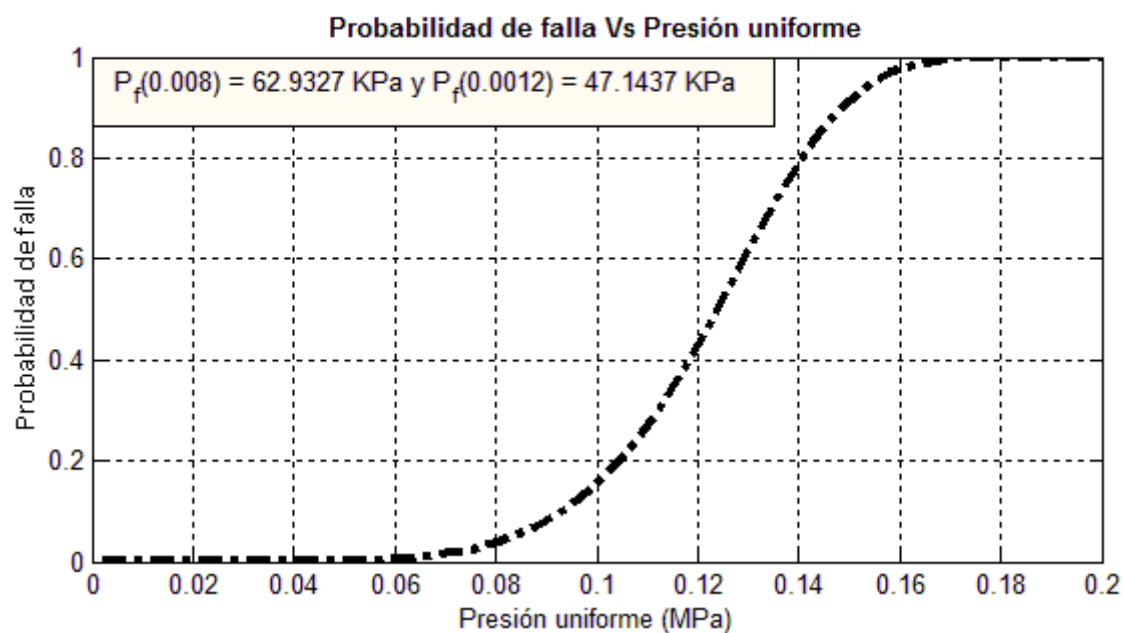
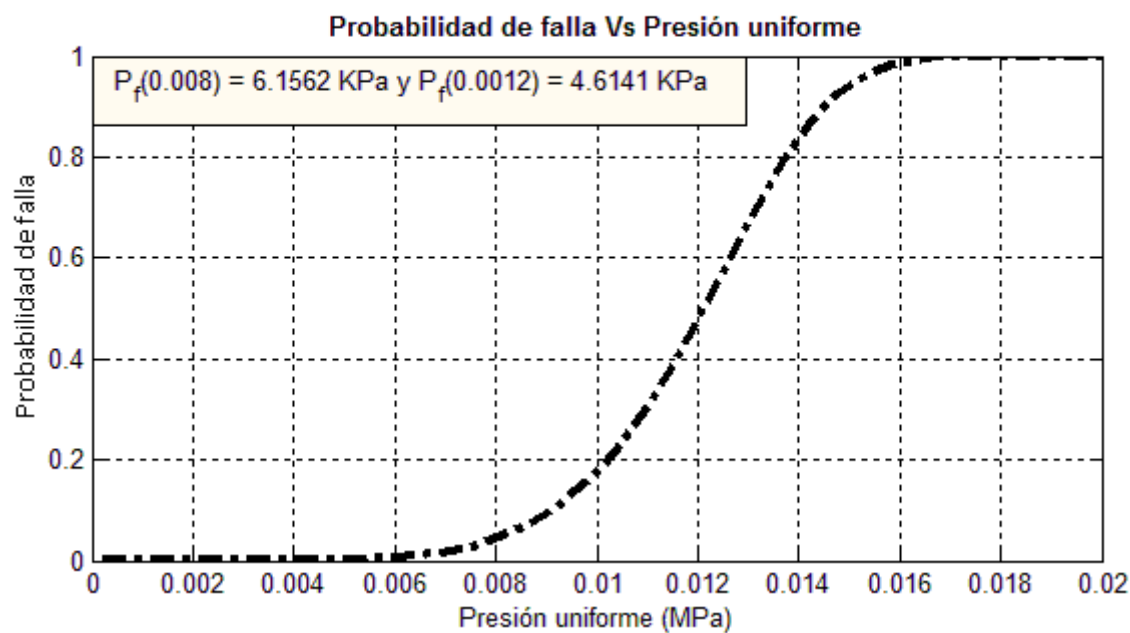


Figura 7.20 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 22 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 22 mm (abajo).

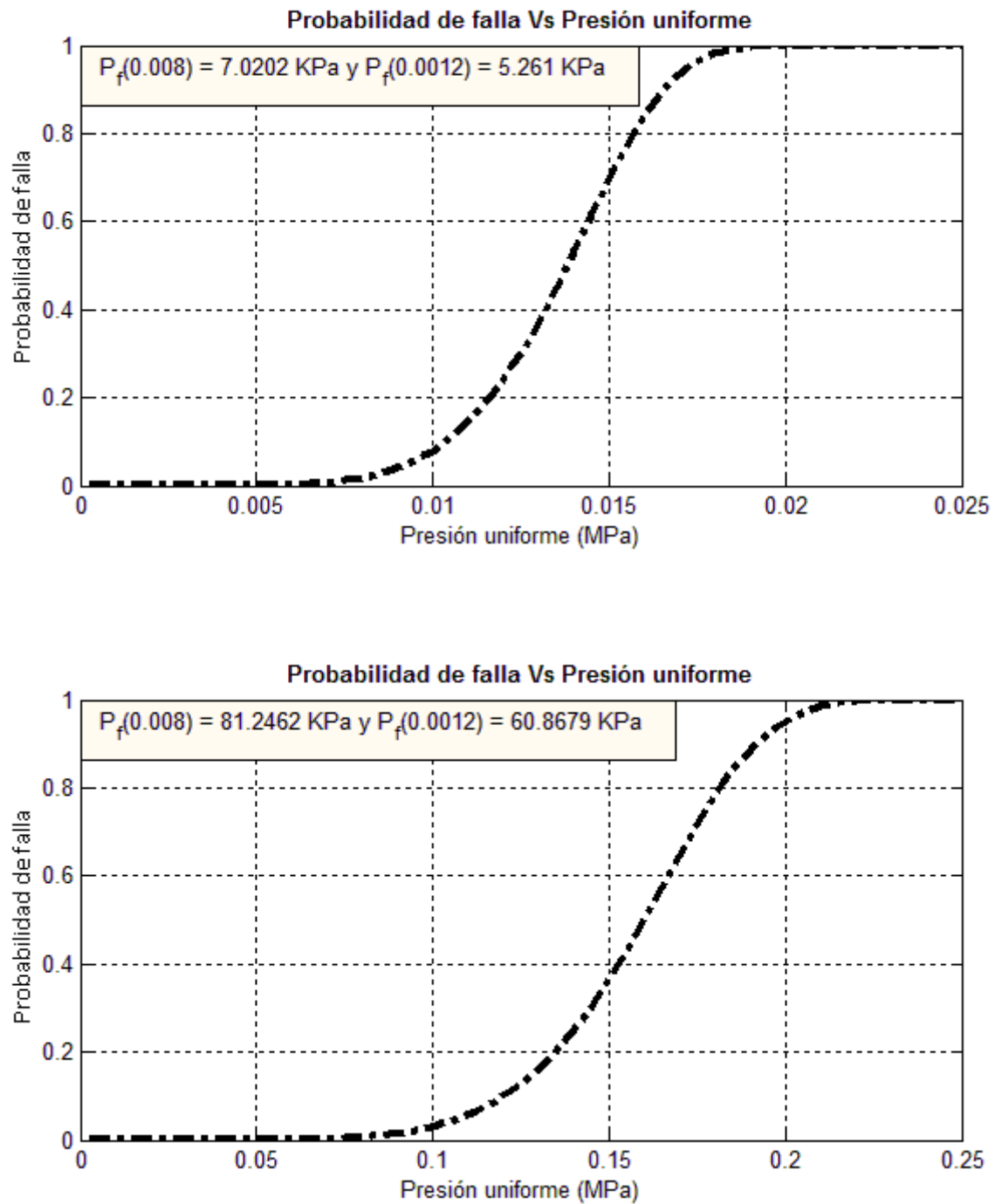


Figura 7.21 Curvas de fragilidad de presión uniforme contra la probabilidad de falla para las placas de 2500 mm x 2500 mm x 25 mm (arriba) y 3500 mm x 500 mm x 25 mm (abajo).

7.3.2 Gráficos de diseño para el cálculo de la resistencia de falla y de deflexión en el centro del claro de paneles de vidrio recocido nuevo

De acuerdo con lo presentado en las secciones anteriores, se estimaron las predicciones de falla de los 672 paneles de vidrio recocido nuevo con el MPFCV y las deflexiones centrales de cada uno de los mismos paneles ante la intensidad de carga uniforme, cuyos resultados se han expresado a través de curvas sobre gráficos de diseño estructural que faciliten el acceso a los ingenieros de la práctica profesional. El formato de los gráficos de diseño se ha expresado con similitud a los propuestos en la norma americana E1300-12a. Es decir, las gráficas de carga uniforme contra deflexión, que se presentan en esta sección, siguen el mismo formato y proceso de uso que para las que se ofrecen en la norma E1300-12a. Esto quiere decir que para hacer uso de ellas, el primer paso consiste en seleccionar un espesor nominal del panel de vidrio para seleccionar el gráfico adecuado, después de esto, se entra por el eje de las abscisas con el cálculo de la operación de carga $\times \text{área}^2$, en el paso continuo se intersecta la curva de aspecto con el valor correspondiente de a/b , y para finalizar se intersecta el eje vertical para encontrar el valor correspondiente a la deflexión máxima esperada en el centro del claro del panel de vidrio en cuestión.

La predicción de la resistencia de los paneles de vidrio recocido nuevo con sus cuatro bordes simplemente apoyados sometidos a una carga lateral con duración de 3 segundos, se presentará un poco más adelante mediante gráficos que tienen el mismo formato a los que se presentan en la norma E1300. Para el uso de estos gráficos de predicción es necesario conocer las dimensiones del panel de vidrio, como son su longitud, ancho y espesor, de acuerdo al valor del espesor se selecciona el gráfico adecuado, y con base en las dimensiones restantes se siguen las trayectorias de los ejes vertical (ancho) y horizontal (largo) para que al quedar definido su punto de intersección, estimar el valor de su carga esperada de falla (sin factorizar) en kPa para una probabilidad asociada de 0.8%. Finalmente, la resistencia del panel ante carga lateral uniforme obtenida del gráfico se compara contra la carga de diseño, donde la resistencia por carga lateral debe ser mayor o igual a la de carga de diseño. Las Figuras 7.22 a 7.33 son los gráficos que se estimaron para la predicción de la carga de falla y la máxima deflexión esperadas en el centro del claro, para paneles de vidrio nuevo del tipo recocido, con un módulo de elasticidad de 74 GPa (para acciones de corta duración) y una relación de Poisson de 0.23.

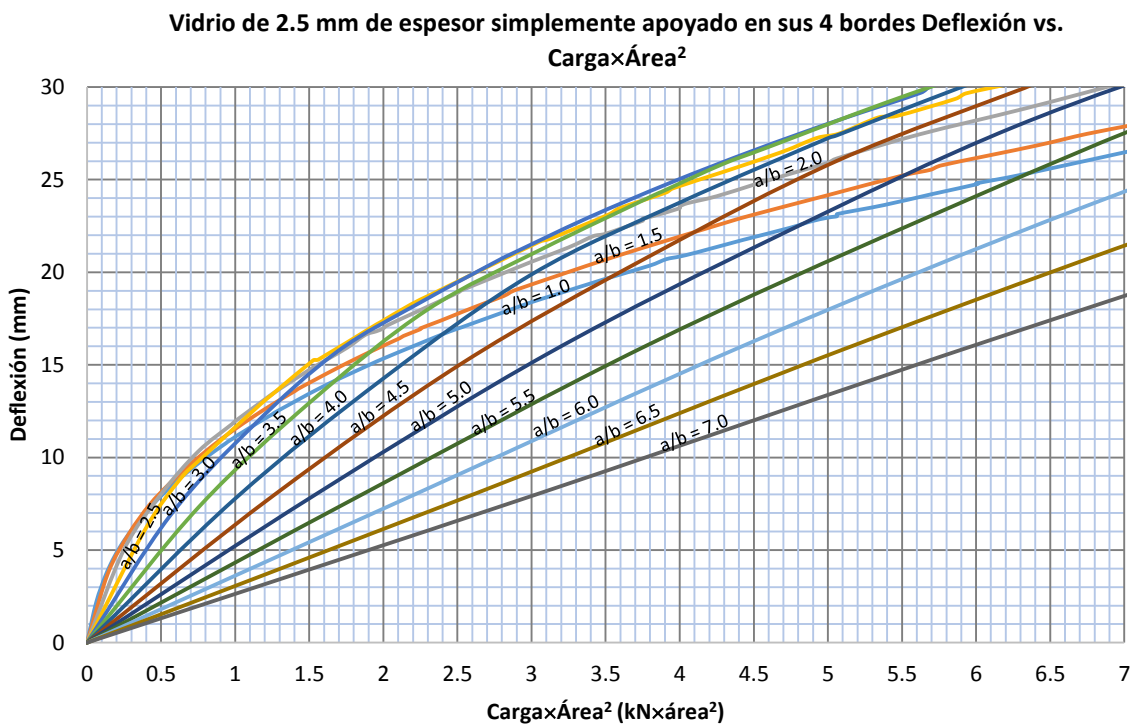
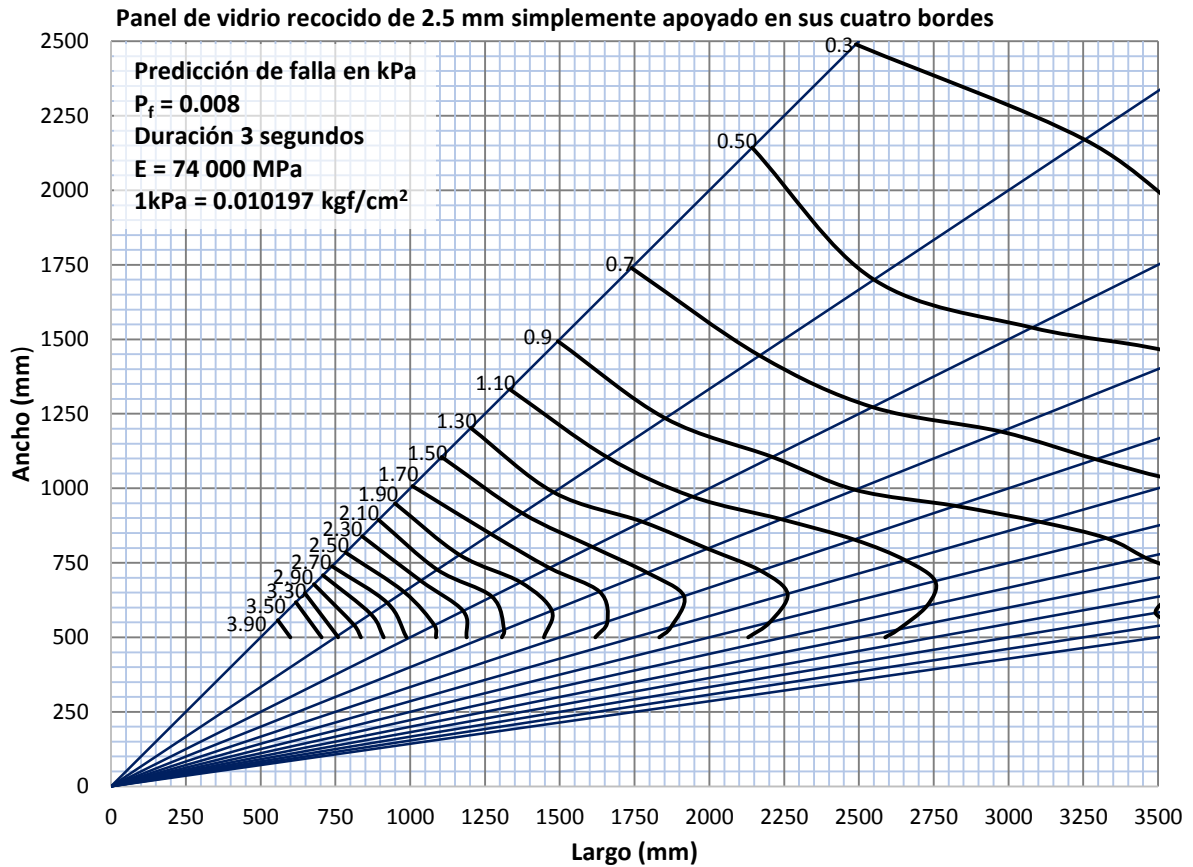


Figura 7.22 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 2.5\text{ mm}$: Gráfico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

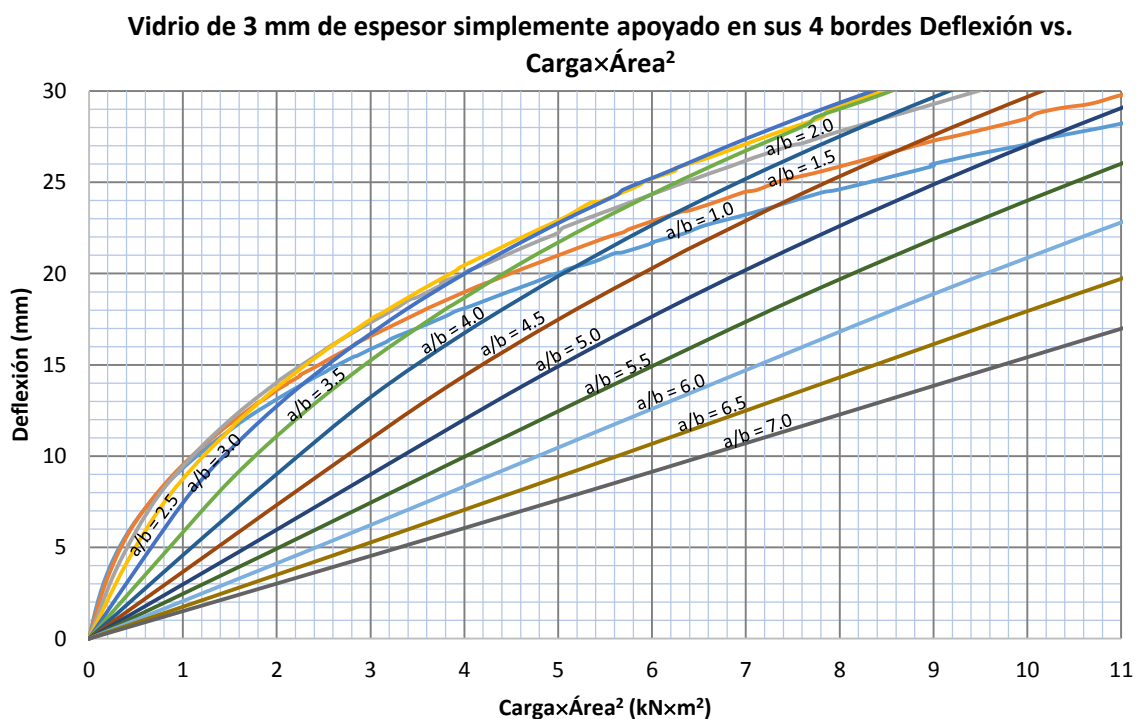
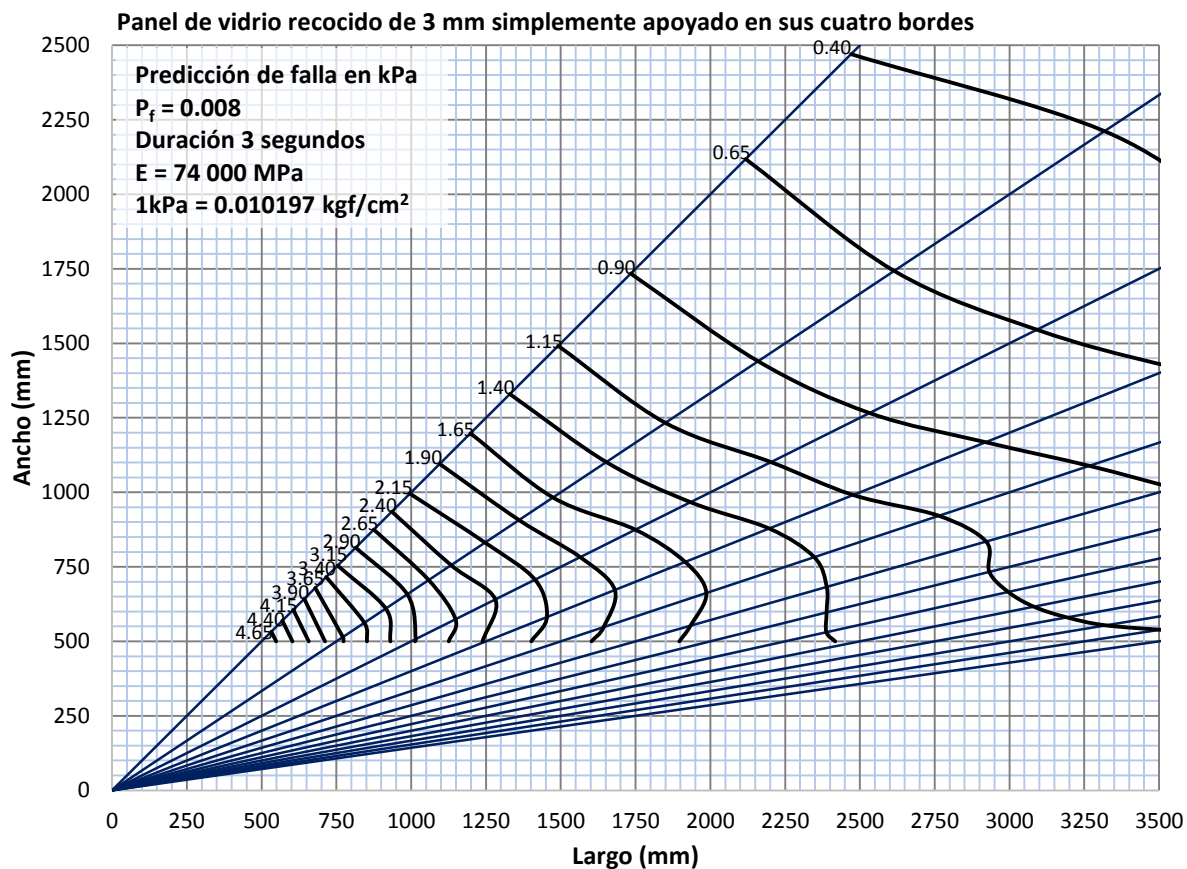


Figura 7.23 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 3\text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

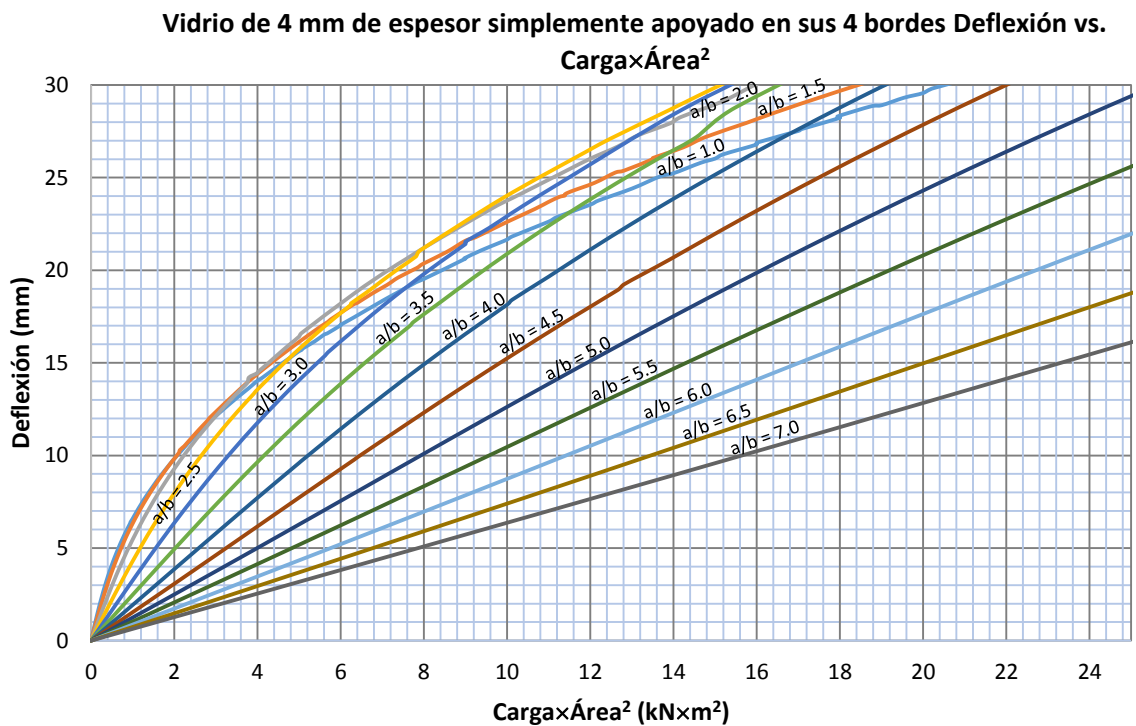
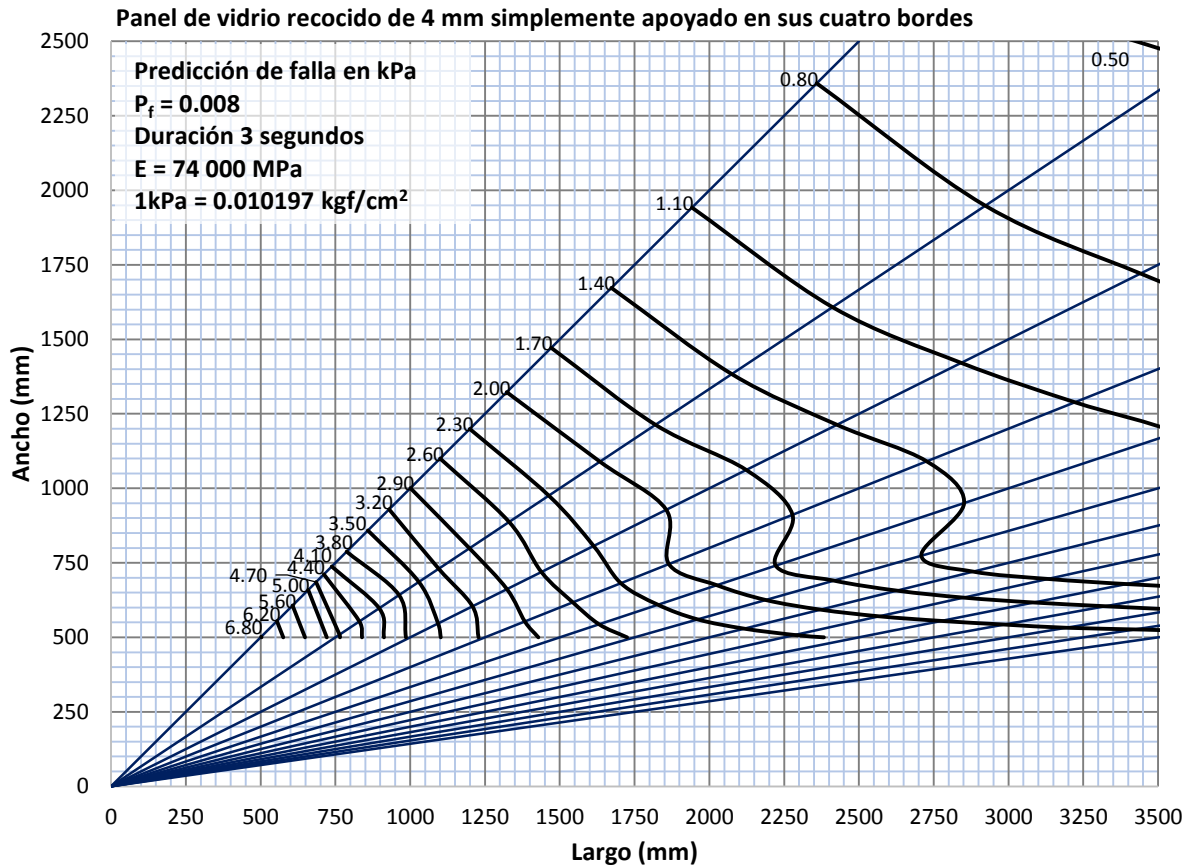


Figura 7.24 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 4 \text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

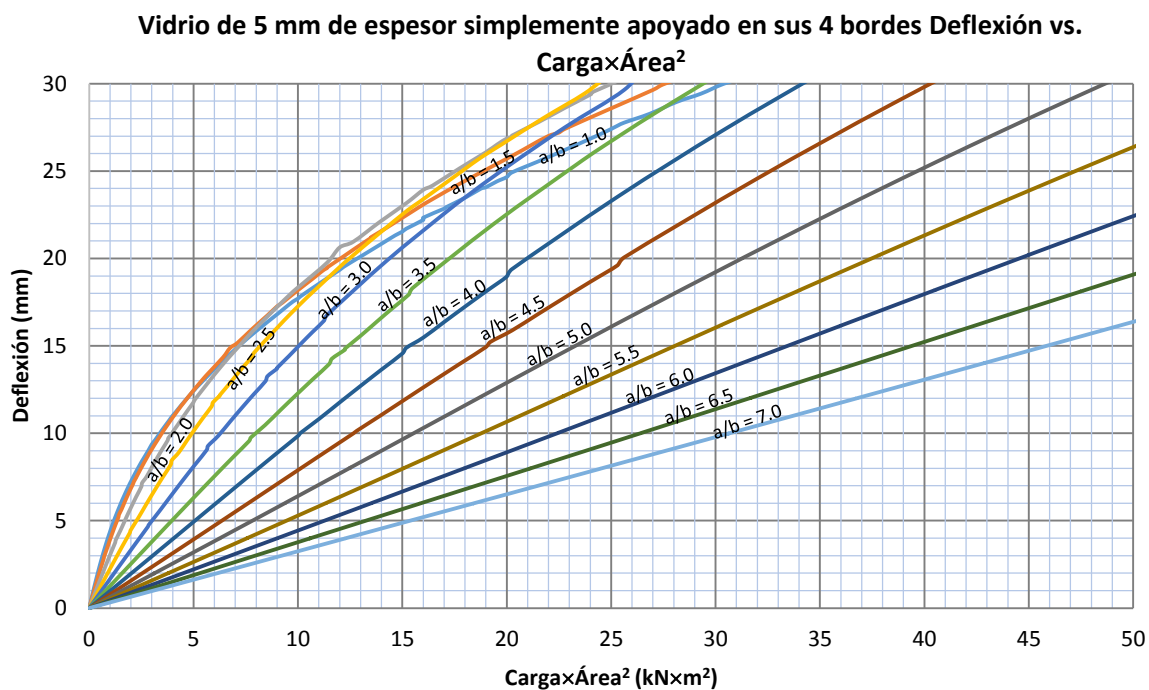
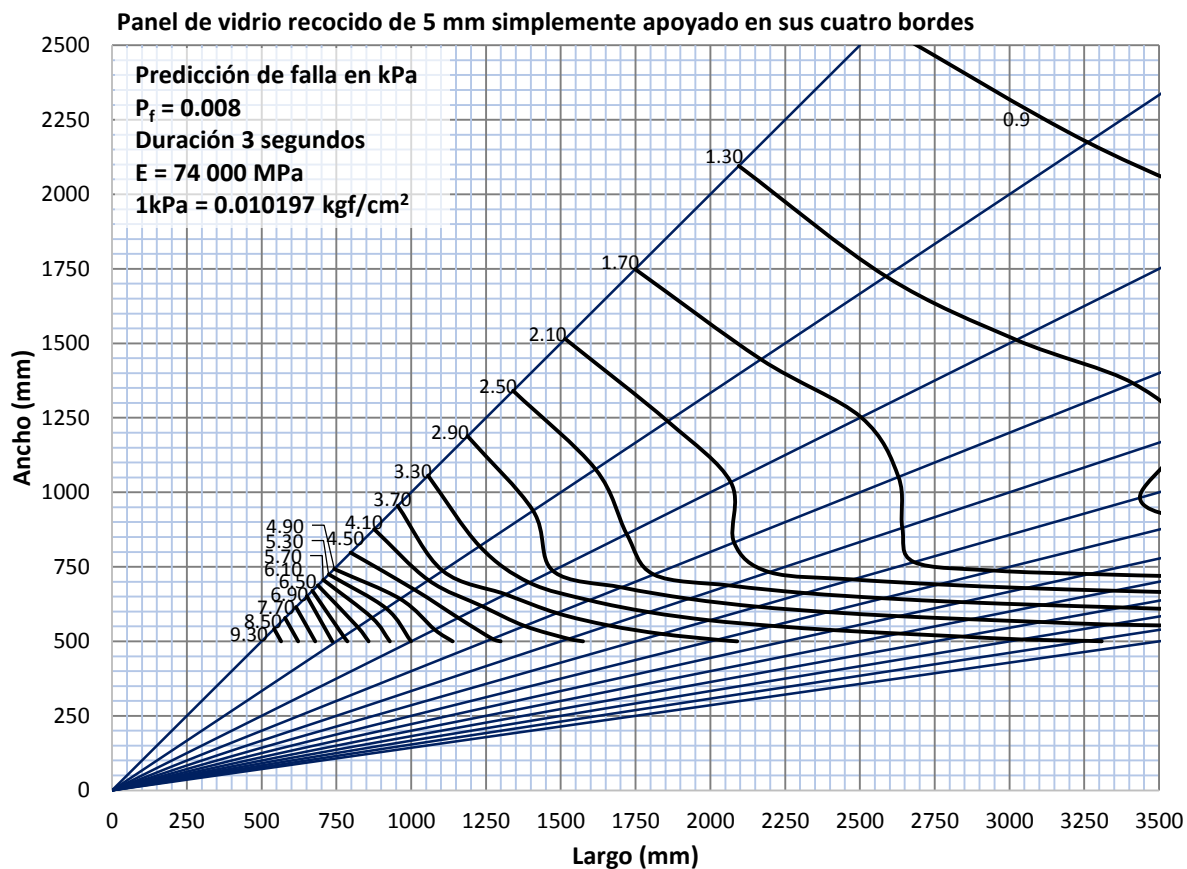


Figura 7.25 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 5\text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

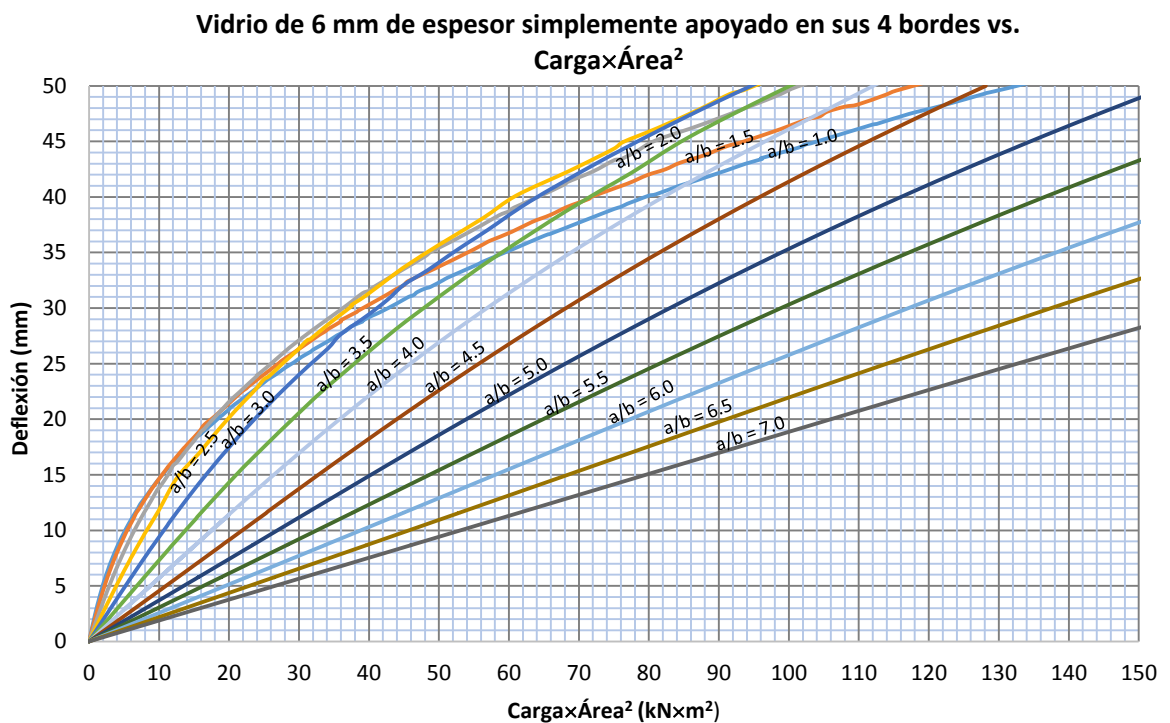
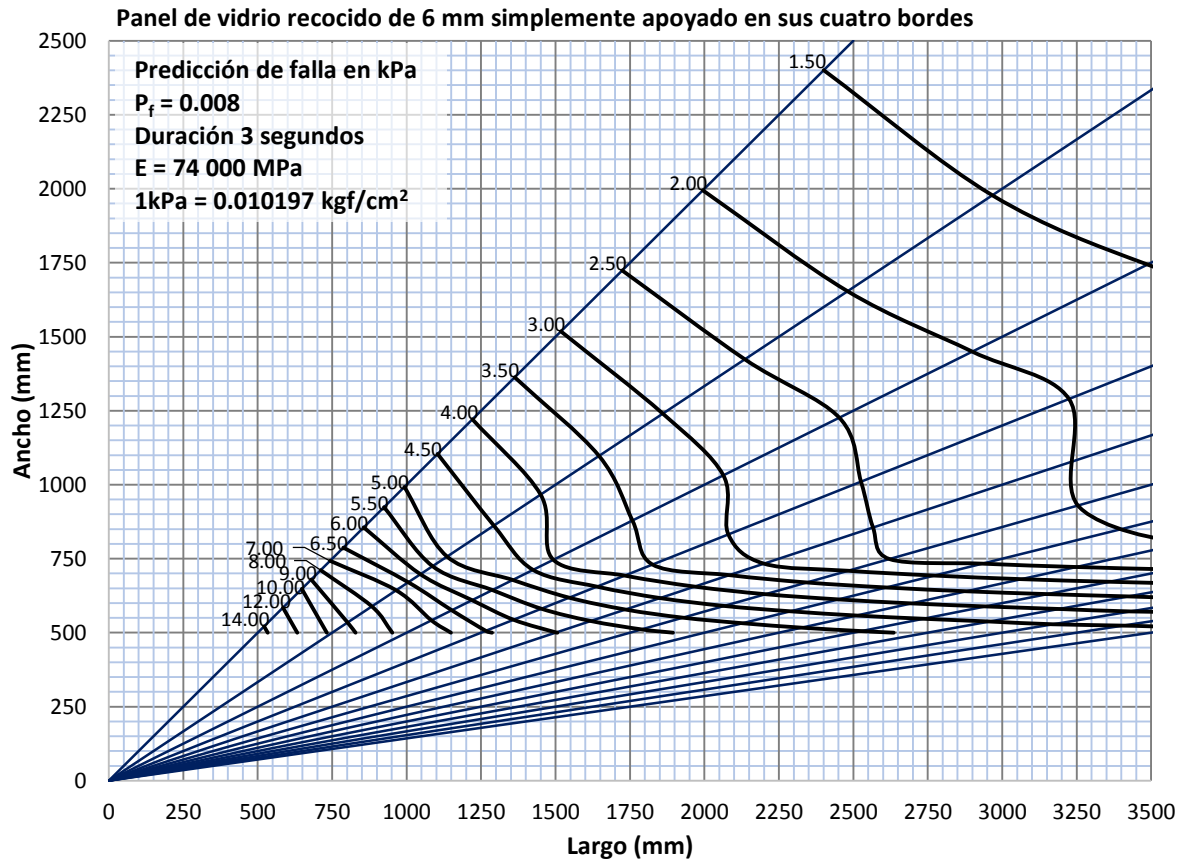


Figura 7.26 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 6\text{ mm}$: Gráfico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

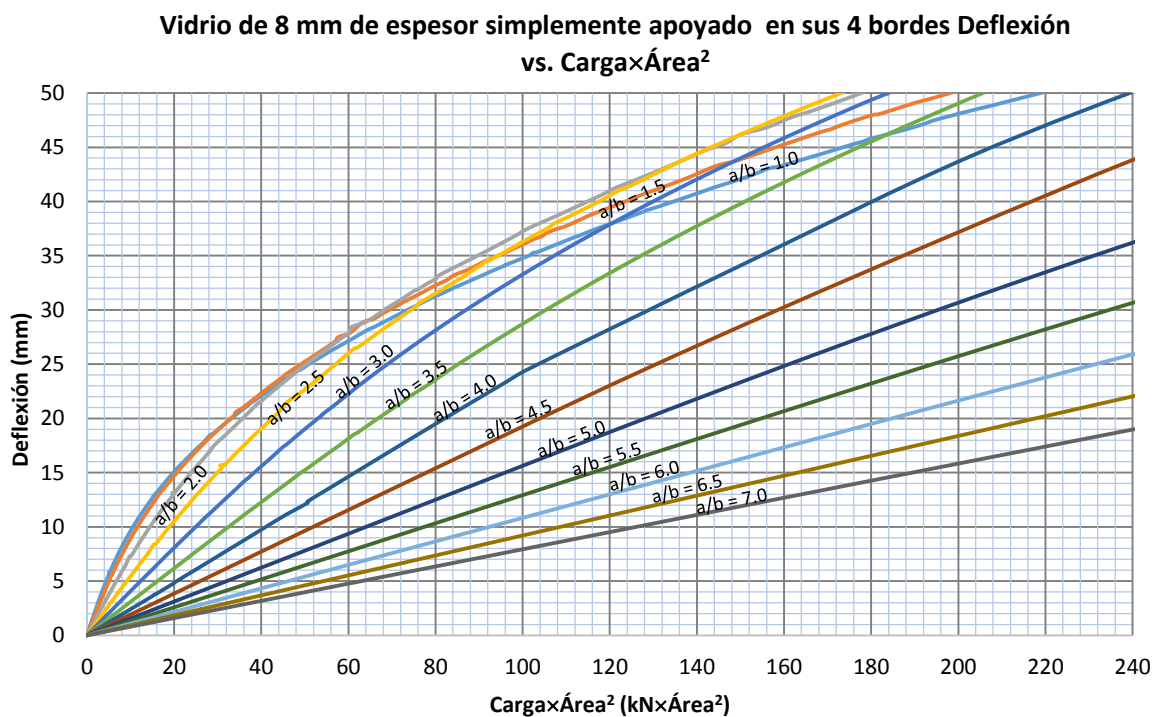
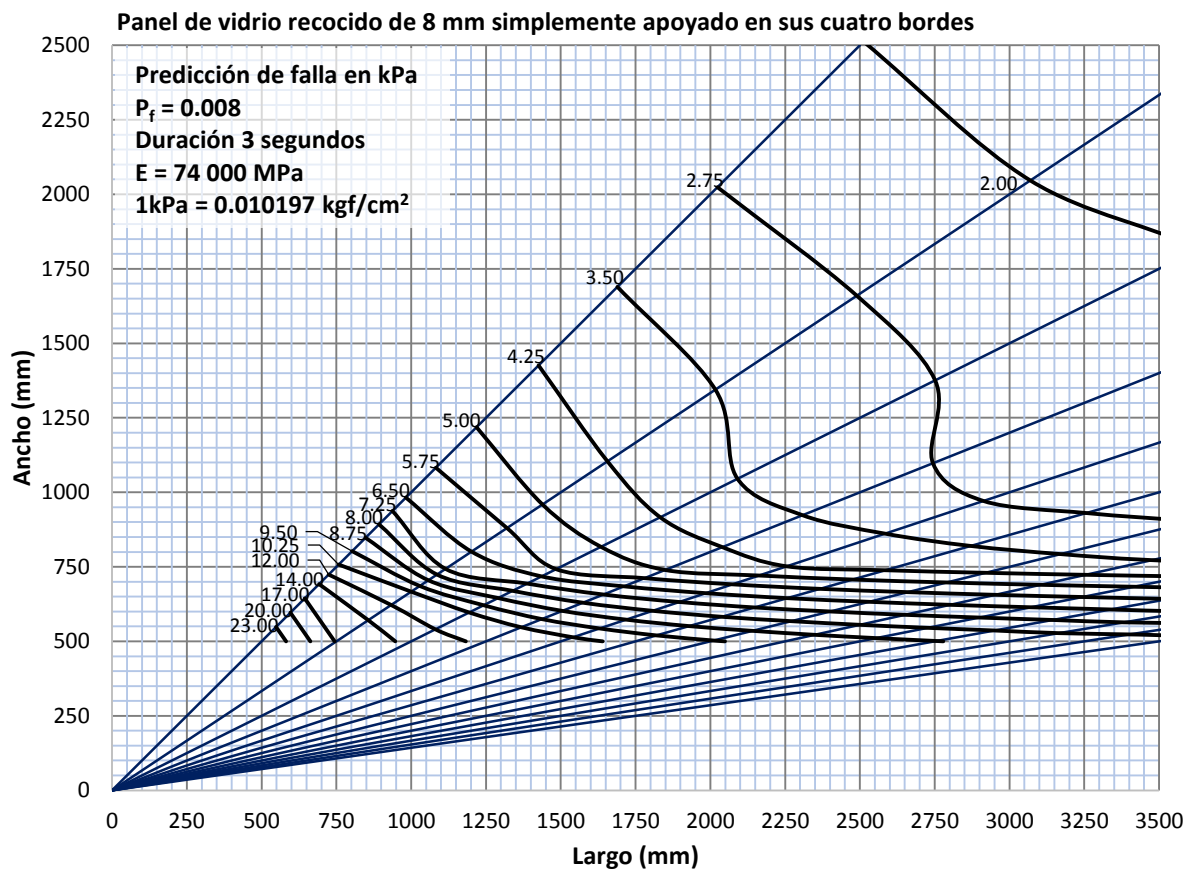


Figura 7.27 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 8\text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

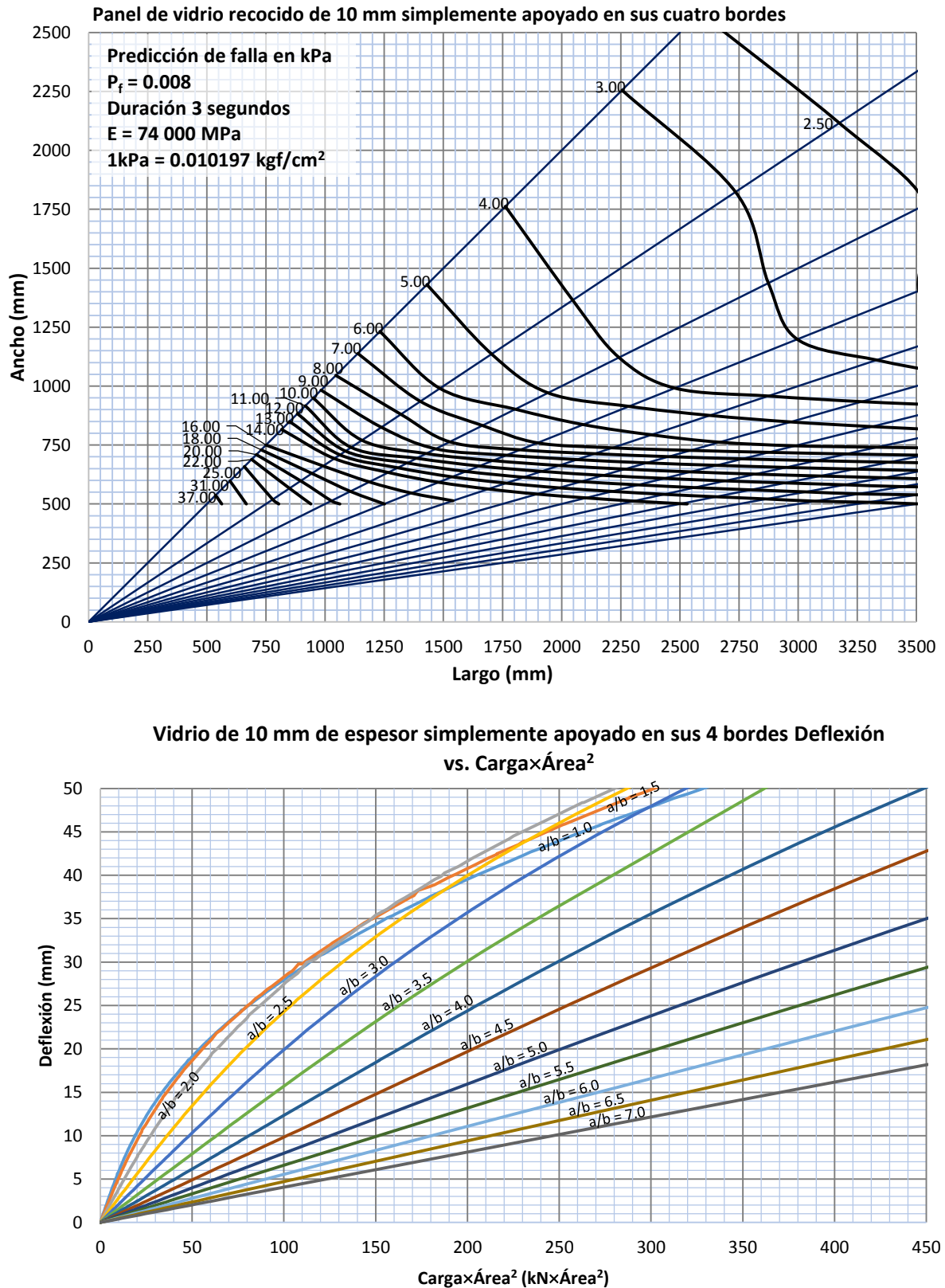


Figura 7.28 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 10 \text{ mm}$: Gráfico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

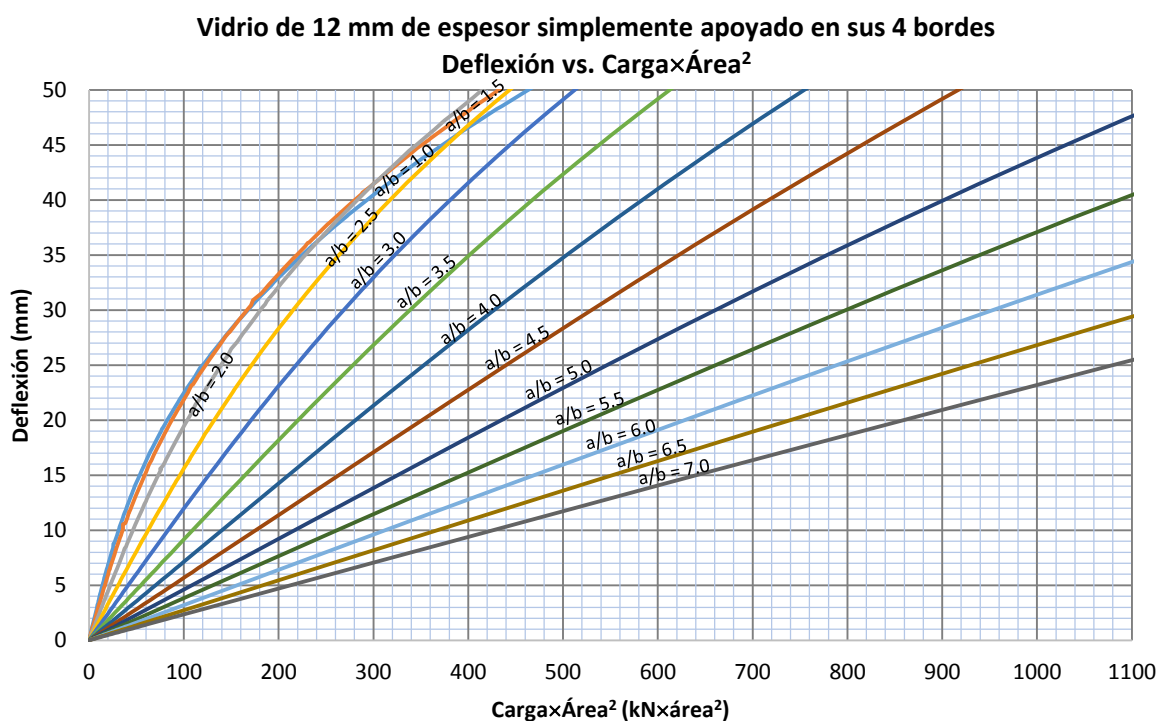
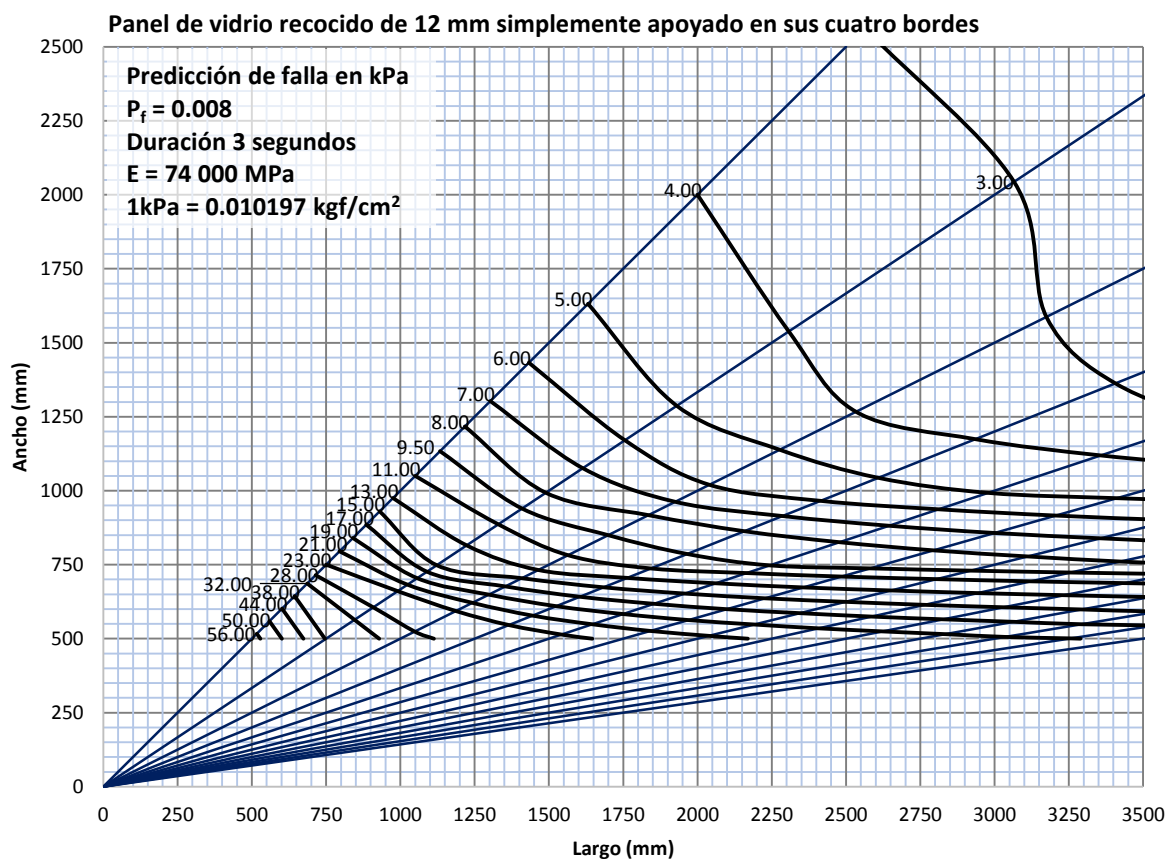


Figura 7.29 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 12\text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

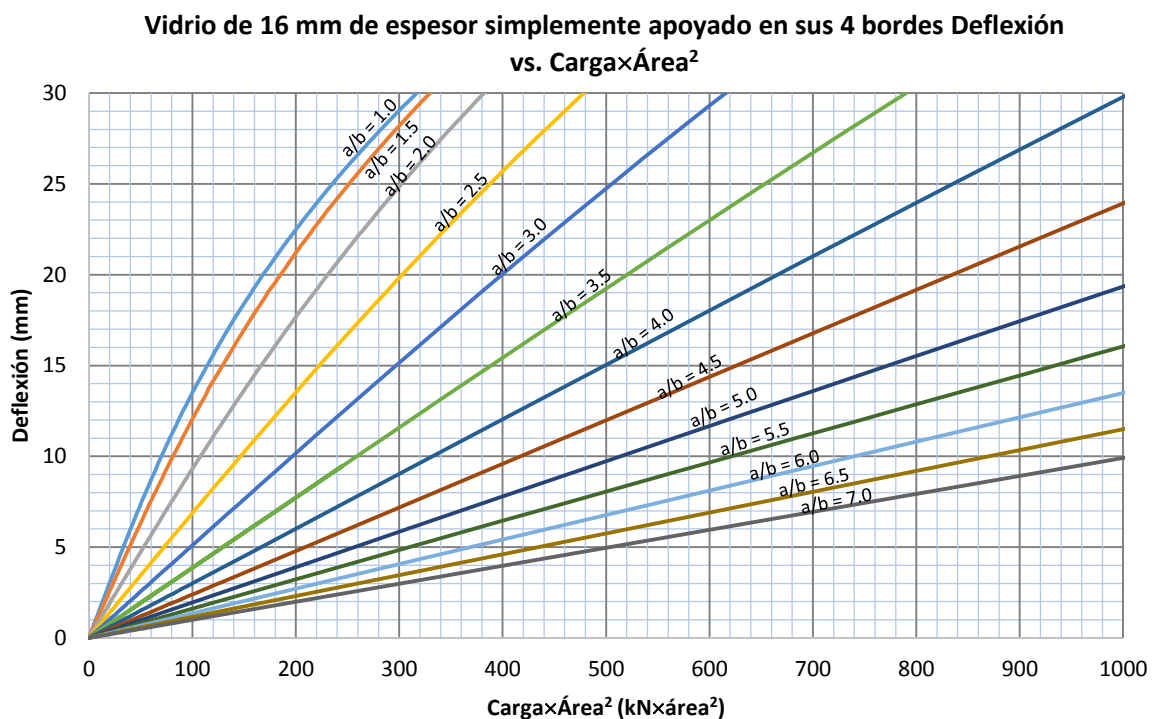
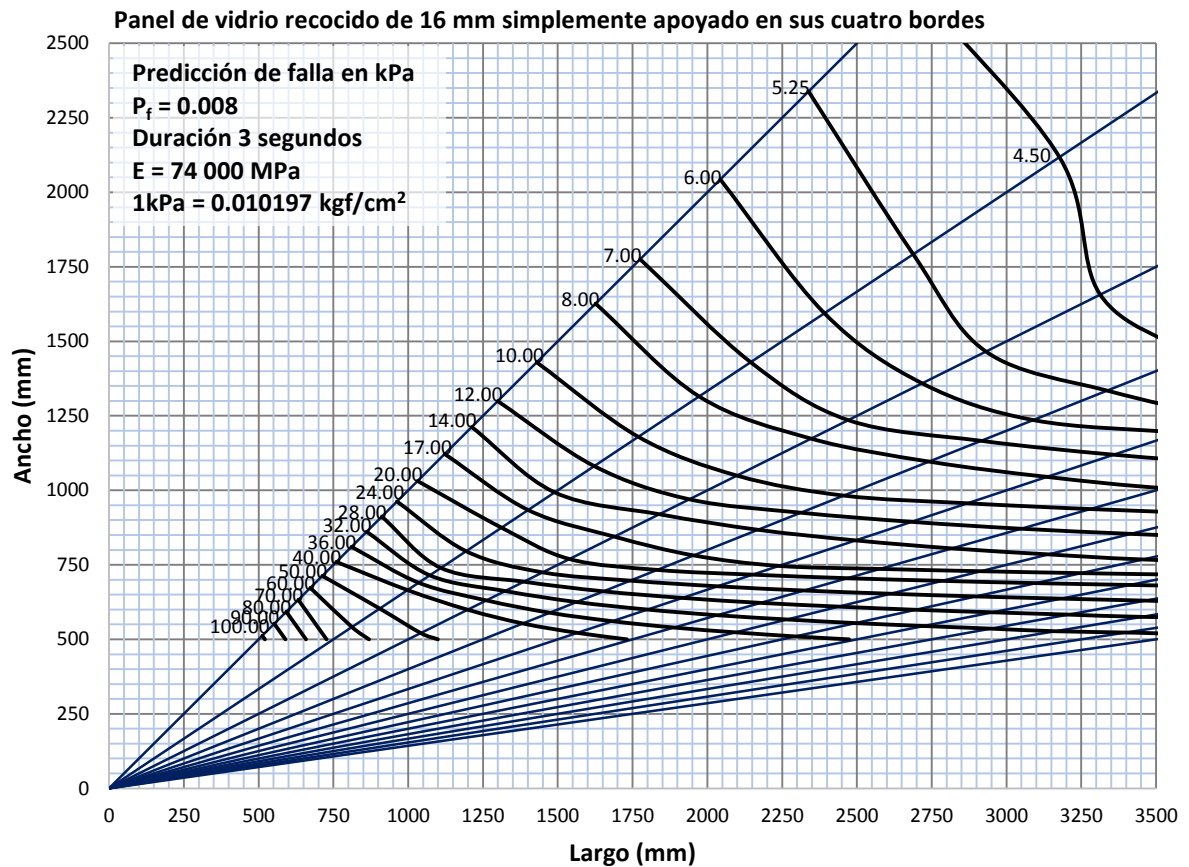


Figura 7.30 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 16 \text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

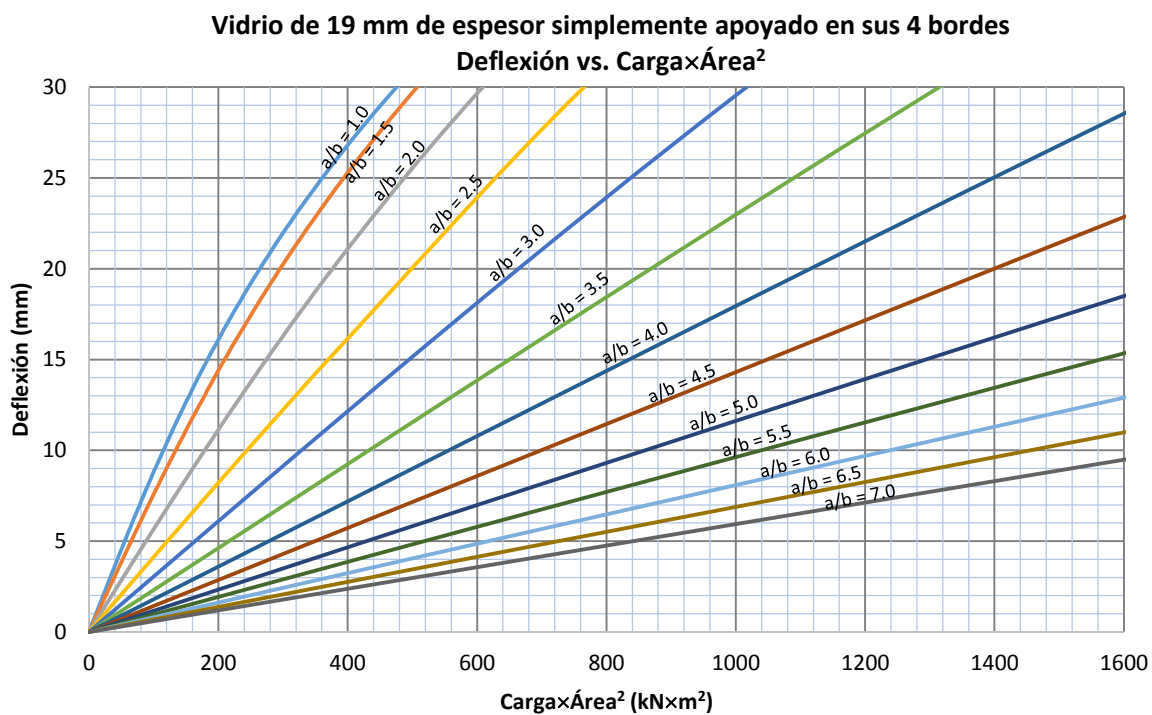
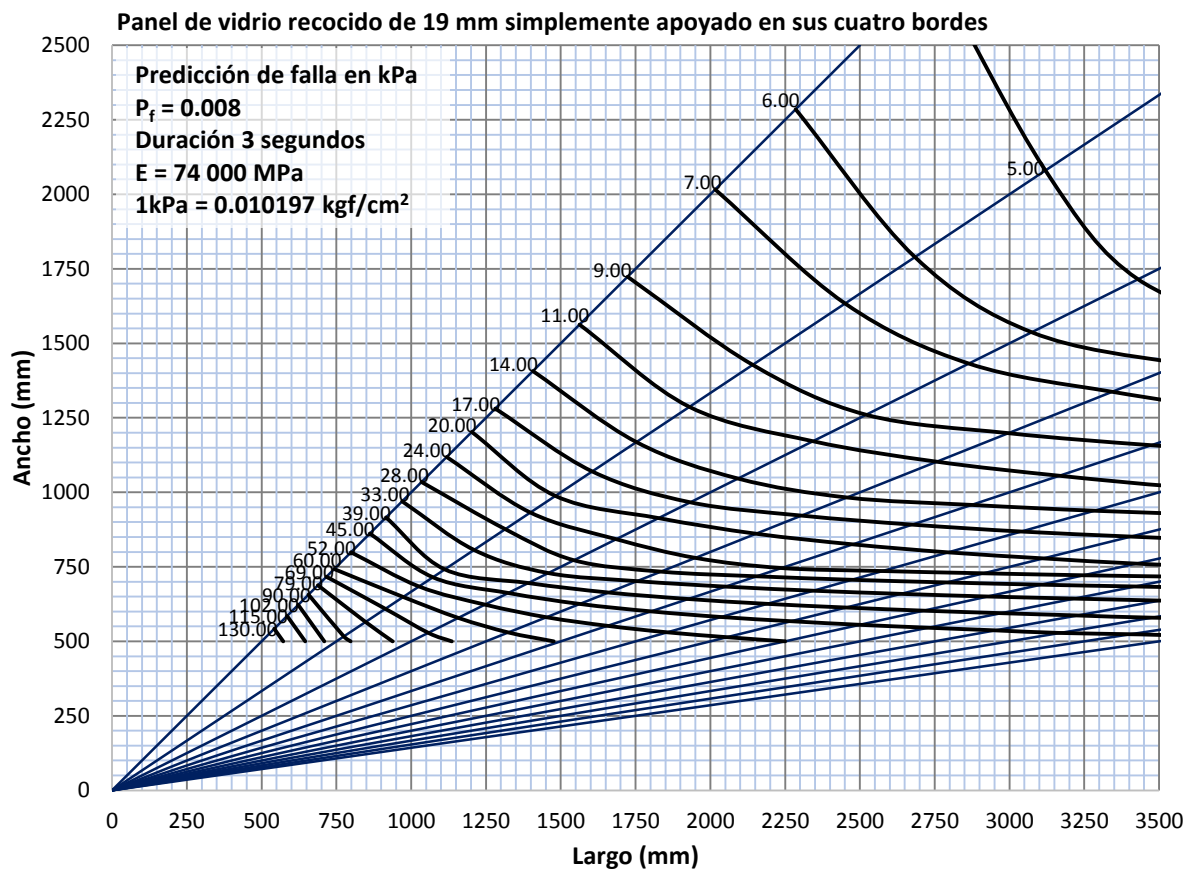


Figura 7.31 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 19 \text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

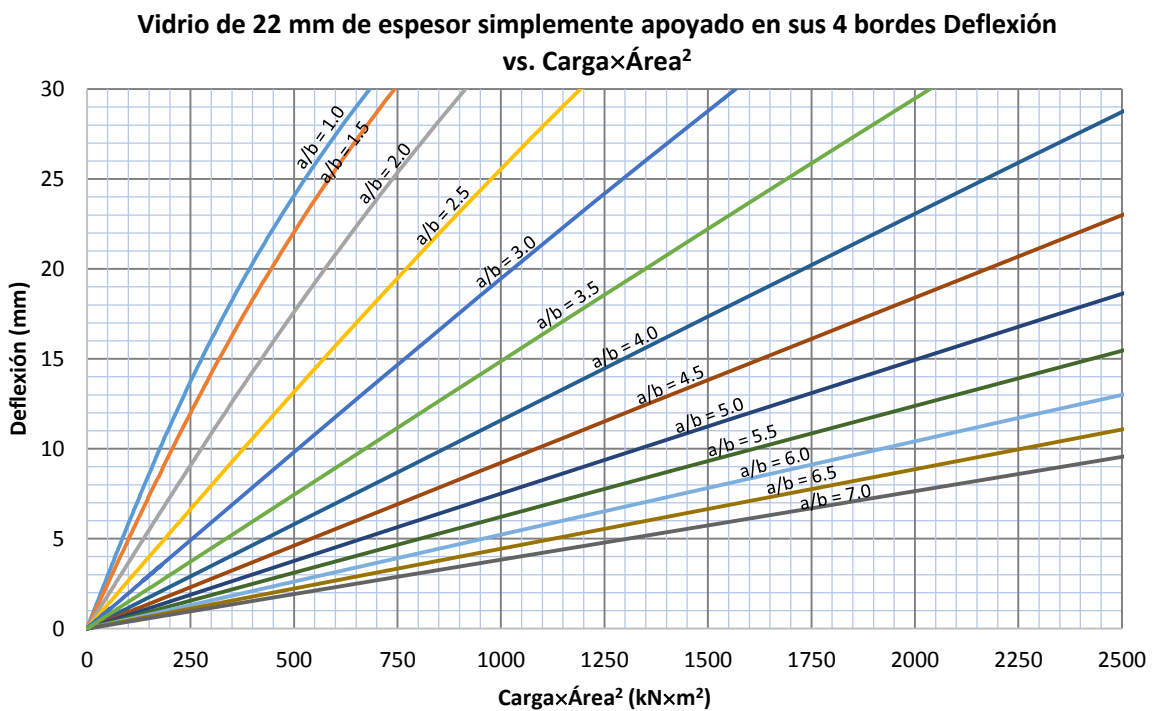
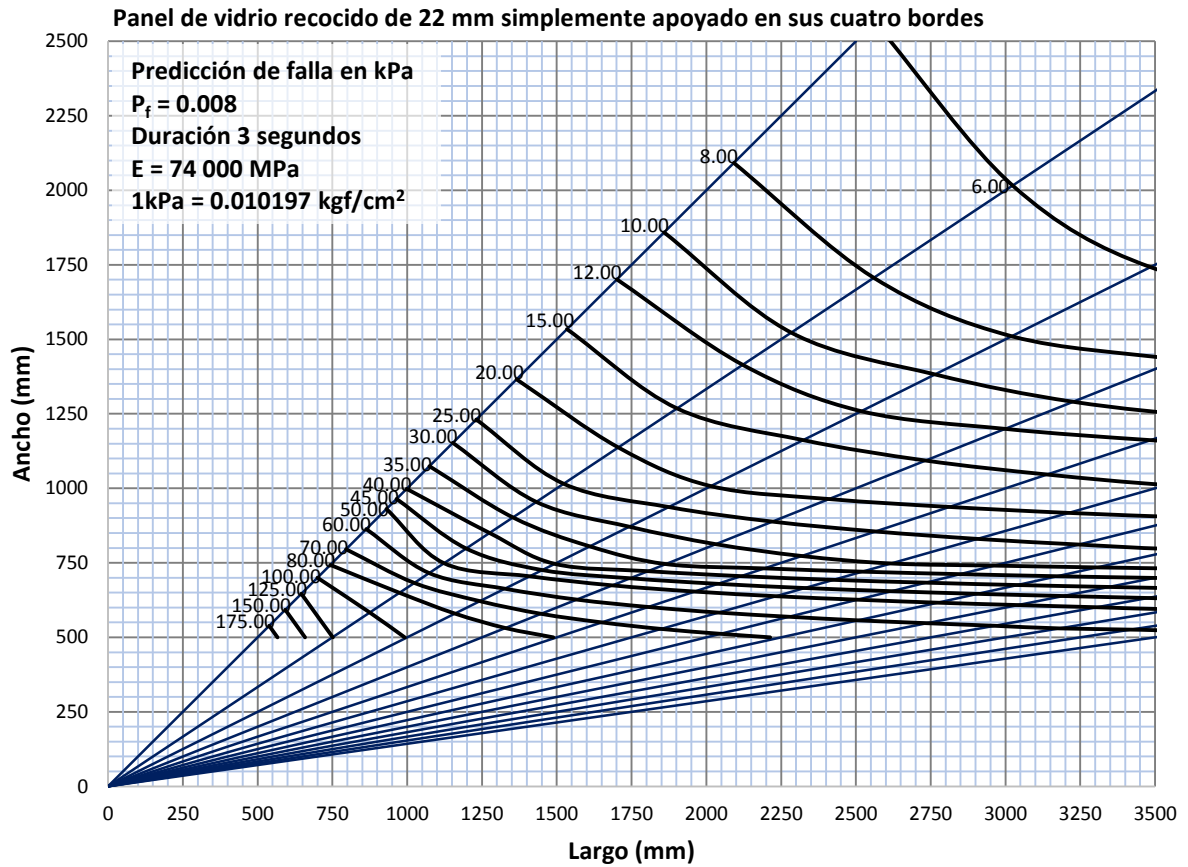


Figura 7.32 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 22 \text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

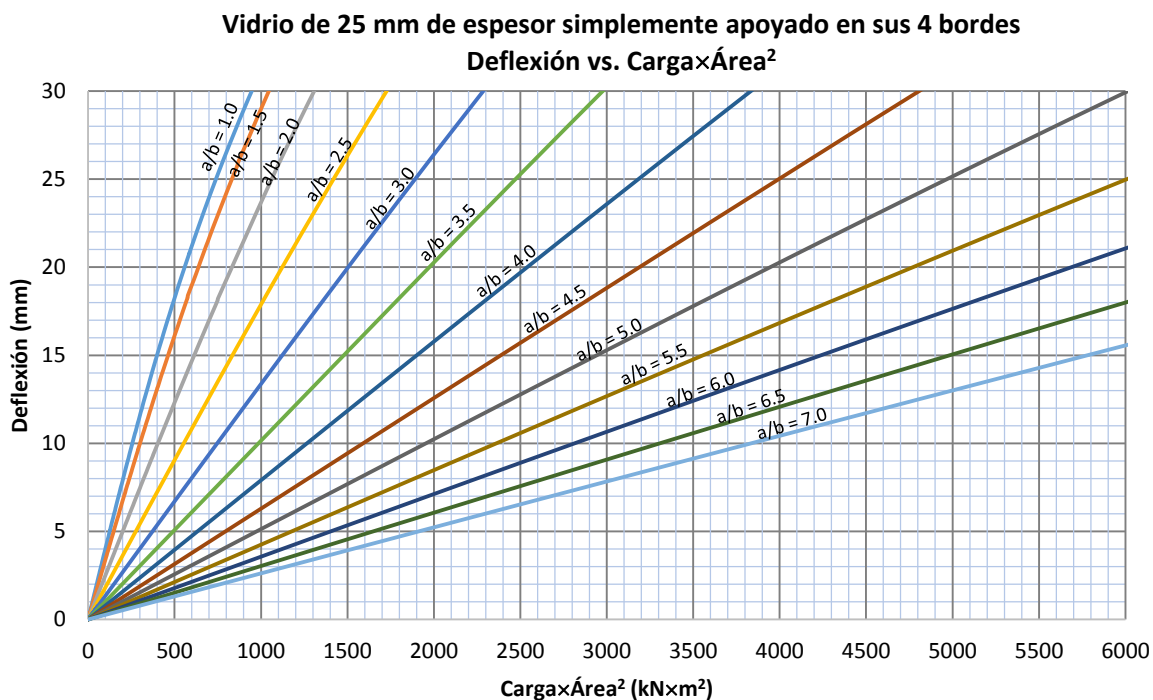
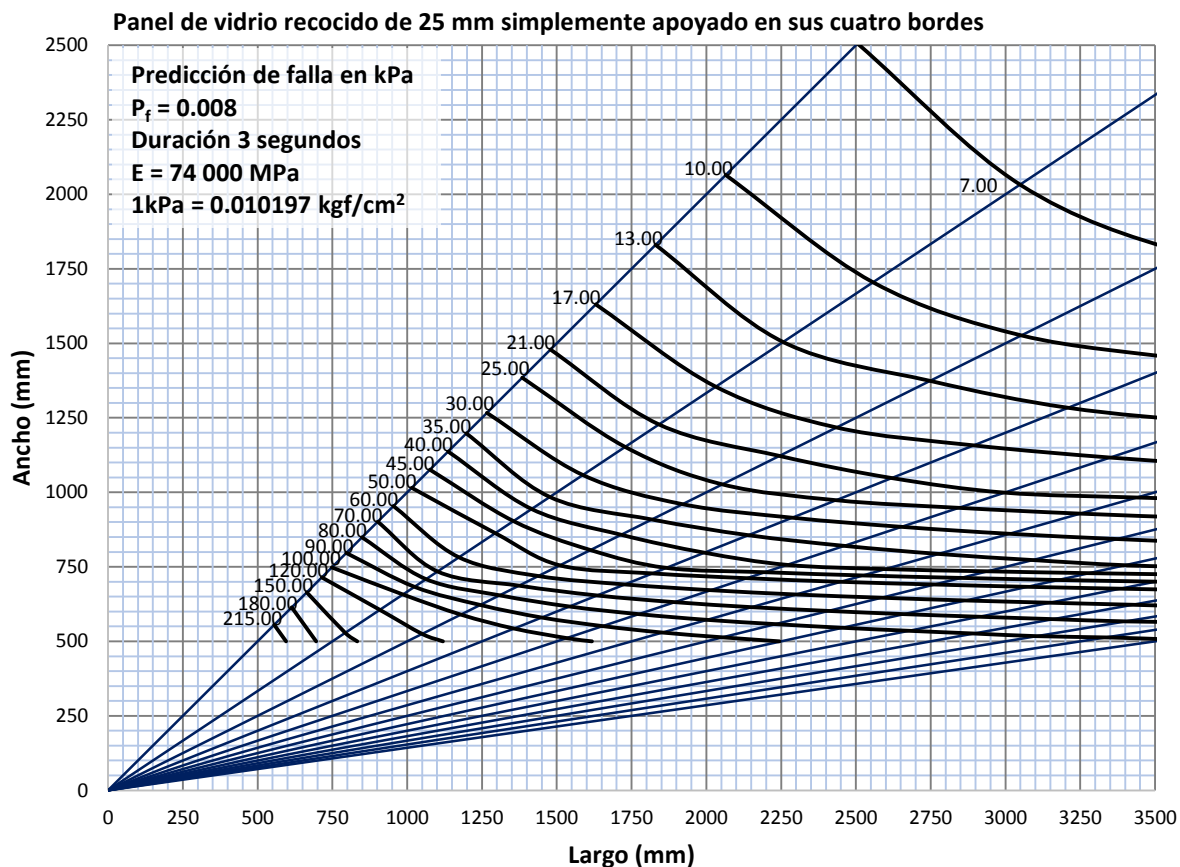


Figura 7.33 Gráficos de diseño estructural de paneles de vidrio recocido nuevo con $h = 25\text{ mm}$: Grafico de predicción de resistencia (arriba) y gráfico del cálculo de deflexión lateral (abajo).

7.3.3 MPFCV como función de E

Al resolver problemas de la práctica profesional, es posible que el módulo de elasticidad del vidrio en cuestión sea distinto al valor utilizado en los gráficos de diseño que se presentan en las Figuras 7.22 a 7.33, es decir diferente al valor de $E = 74 \text{ GPa}$, por lo cual es conveniente que se estudie este aspecto, lo cual se hace en esta sección con el objetivo de determinar si los gráficos de diseño pueden ser aplicables mediante la implementación de algún factor, lo cual permitiría una extrapolación confiable de los resultados. Para alcanzar este objetivo, primeramente debemos estudiar los efectos que se presentan sobre los esfuerzos principales en el plano ($S1$ y $S2$), así como las deflexiones máximas estimadas en el centro del claro (w) de placas de vidrio recocido para diferentes valores de su módulo de elasticidad. Para estudiar la influencia del módulo de elasticidad en estas variables, se desarrolló un modelo analítico donde se unificaron los efectos producidos por la variación del módulo de elasticidad en un intervalo de variación de 10 GPa a 95 GPa , para distintas placas con relación de aspecto igual a uno ($1500 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$) como función de su espesor, el cual se varió de 3 a 19 mm . Los resultados obtenidos de estos análisis se muestran en la Figura 7.34, donde se presenta una superficie en 3D del esfuerzo principal máximo en el plano ($S1$, en MPa) contra el módulo de elasticidad (E , en MPa) y contra el espesor nominal del panel (h , en mm).

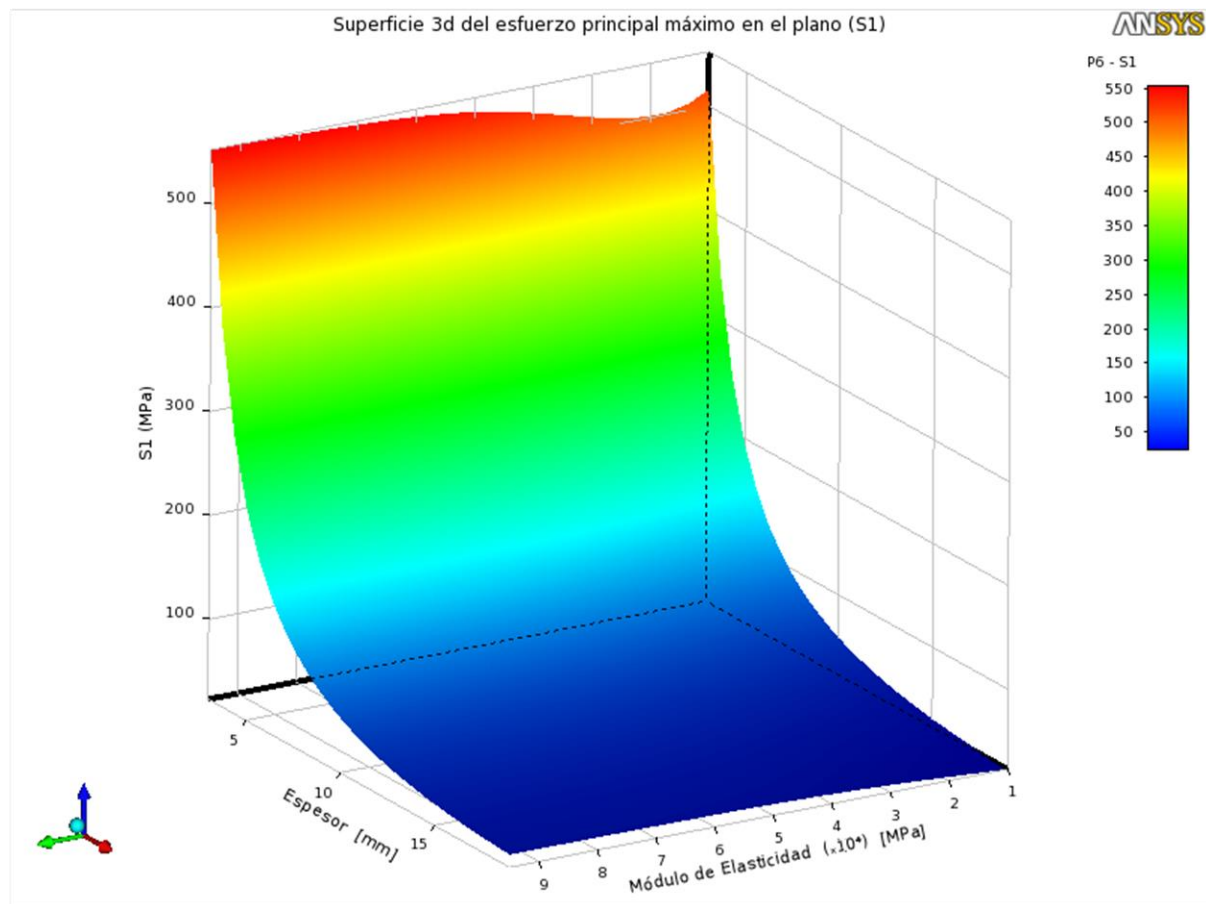


Figura 7.34 Superficie 3D de los esfuerzos principales máximos ($S1$) en el plano de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de $1500 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$, como función de su espesor (h) y de su módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa .

A continuación, se ilustra otra superficie (Figura 7.35), similar a la que se presenta en la Figura 7.34, pero ahora para el esfuerzo principal mínimo en el plano de la placa de vidrio recocido nuevo (S2, en MPa).

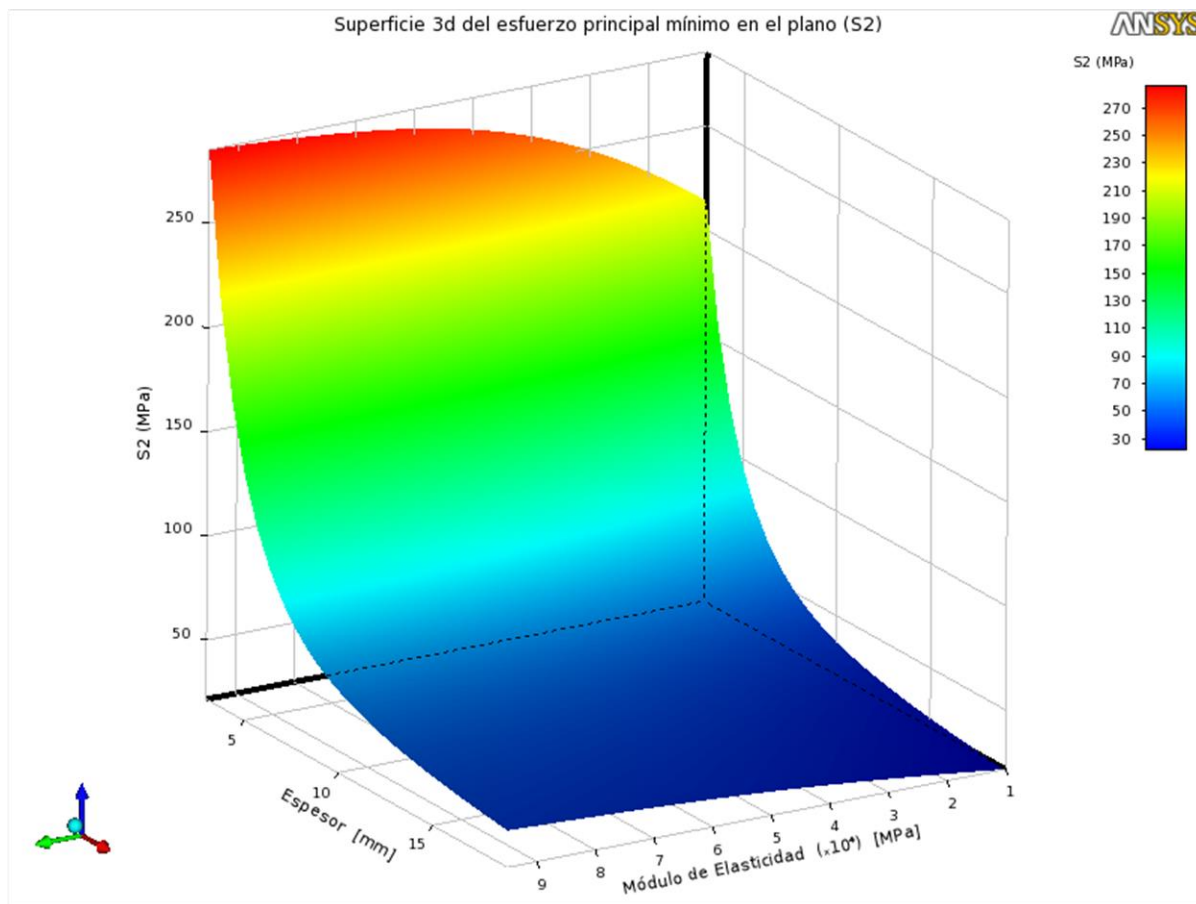


Figura 7.35 Superficie 3D de los esfuerzos principales mínimos (S_2) en el plano de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm, como función de su espesor (h) y de su módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa.

Las gráficas 7.34 y 7.35, fueron elaboradas con los resultados de placas de vidrio recocido simplemente apoyadas en sus cuatro bordes ante una carga lateral de 0.02 MPa. Del análisis de estos resultados fue posible observar que ambos esfuerzos principales, S_1 y S_2 , crecen exponencialmente como función de la disminución del espesor (h); sin embargo, quizá la observación más importante es que los esfuerzos principales decrecen también ligeramente como función de la disminución del módulo de elasticidad (E). Por ejemplo, al comparar los esfuerzos principales máximos de un par de paneles de vidrio recocido, en el caso de paneles con espesores de 19 mm, pero uno con módulo de 95 GPa y otro con un módulo de elasticidad de 10 GPa, encontramos que el esfuerzo principal máximo para la placa con $E = 10$ GPa fue de 22.98 MPa, esto es aproximadamente un 35% menor con respecto al valor del esfuerzo principal de la placa con $E = 95$ GPa. Entonces, se podría esperar que los esfuerzos principales en el plano para aquellas placas de vidrio con valores menores a $E = 74$ GPa, fuesen inferiores, esto podría tener un significado positivo para el desempeño del panel. En caso contrario, cuando E en el vidrio recocido superó el valor de $E = 74$ GPa, esperaríamos que los esfuerzos principales en el plano del panel

fuesen superiores a aquellos paneles con $E = 74$, y en consecuencia la predicción de la carga de falla esperada se reduciría. A pesar de esto, se pueden encontrar paneles que de acuerdo a sus propiedades de material (E), sus condiciones geométricas (relación de aspecto y espesor) e intensidades de carga, contribuyan para que la no linealidad geométrica desarrolle variaciones y distribuciones particulares de los esfuerzos principales en el plano de cada panel, pudiendo afectar mucho o casi nada la predicción de su falla. Para ejemplificar un poco más los efectos que interfieren en la variación de los esfuerzos principales en el plano contra el módulo de elasticidad, veamos a continuación que para la misma placa de estudio, pero para un espesor de 6 mm, su comportamiento responde de diferente forma para una variación de $S1$ contra E cada vez que se le introduce un valor de intensidad de carga lateral uniforme diferente, véase Figura 7.36. Donde, el eje vertical de la Figura 7.36 fue normalizado con respecto al valor del esfuerzo principal máximo de $E = 74$ GPa ($S1_{74}$), para cada intensidad de carga.

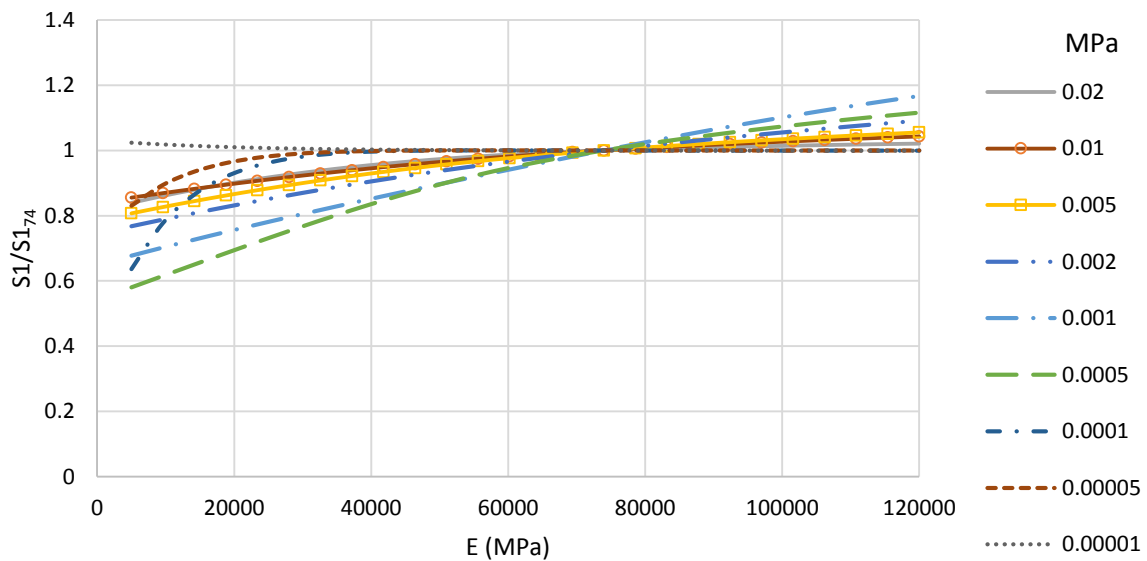


Figura 7.36 Variación del esfuerzo principal máximo en el plano como función de E y de la intensidad de carga lateral uniforme, con el panel de estudio.

Para el mismo caso de estudio, vemos cómo influye el espesor en la variación de $S1$ contra E , si la intensidad de carga es de 0.001 MPa, para todos los casos, Figura 7.37.

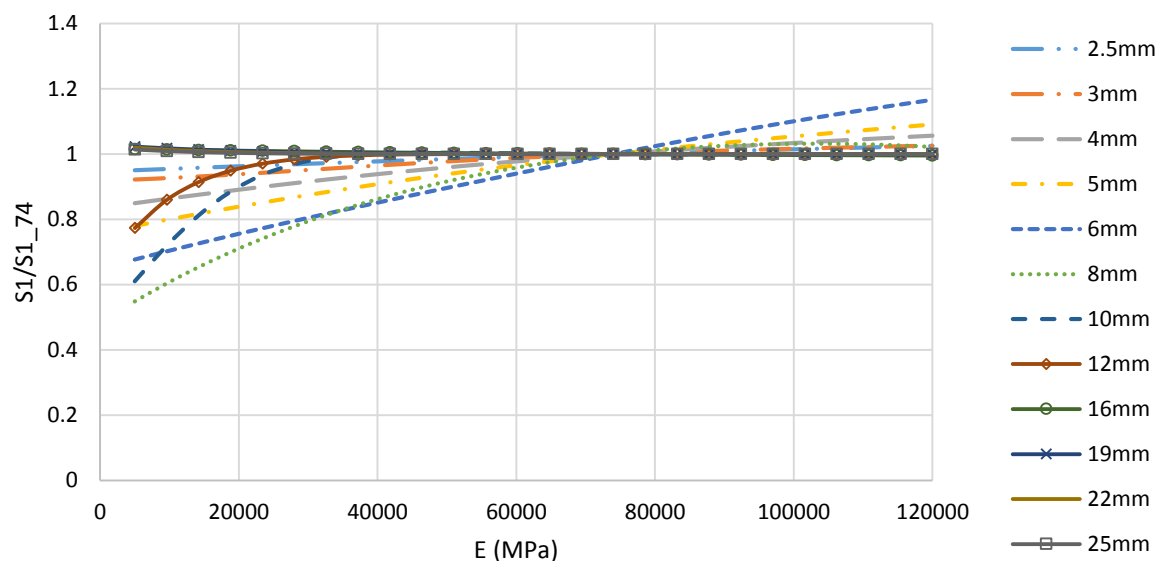


Figura 7.37 Variación del esfuerzo principal máximo en el plano como función de E y de la intensidad de carga lateral uniforme, con el panel de estudio.

Como se observa en las Figuras 7.36 y 7.37, los esfuerzos principales en el plano contra E pueden ser variables, por lo tanto, el diseñador debe tener en cuenta esto y debe procurar que las predicciones de falla que se realicen sobre paneles de vidrio recocido lo consideren u omitirlo, pero debe asegurarse siempre de que se está del lado de la seguridad, es decir, evitar sobrestimar demasiado la resistencia de falla. Por lo que, para resultados precisos en la predicción de la resistencia, el diseñador debe acudir al cálculo de los esfuerzos principales (S_1 y S_2) generados por un determinado valor de E en el vidrio. Sin embargo, realizar la tarea de calcular los esfuerzos cada vez que se ha determinado un nuevo valor de E en el vidrio, implica el desarrollo del modelo analítico apropiado, lo cual repercute en el consumo de tiempo. Por eso, además de recomendar la forma exacta de la predicción en la resistencia de paneles de vidrio, hemos considerado una forma aproximada de conseguir la aplicación de las herramientas desarrolladas para otros casos de estudio, es decir, predecir la resistencia de un panel para valores del E diferentes a 74 GPa, que es el valor con el que se desarrollaron todas las gráficas de diseño que se presentan en las Figuras 7.22 a 7.33, y con ello se puede optimizar el tiempo en la etapa de diseño. Para ejemplificar lo antes descrito, se ha desarrollado un ejemplo, donde trataremos de evaluar este aspecto directamente sobre la resistencia de paneles de vidrio recocido nuevo con diferentes valores hipotéticos de E (desde los 5 GPa, hasta un valor máximo de $E = 120$ GPa), lo cual se realiza de las dos formas explicadas en este capítulo.

Consideraremos que los paneles miden $1500 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ y se encuentran simplemente apoyados en sus cuatro bordes para contrarrestar los desplazamientos ante carga lateral uniforme con duración de 3 segundos. La primera manera de calcular la resistencia de falla de los paneles, es la más precisa, ya que para ello se estiman los esfuerzos principales en el plano (S_1 y S_2) de los paneles para el valor apropiado del E del vidrio en cuestión, los cuales fueron determinados a través de modelos analíticos de elementos finitos. La segunda manera de calcular la resistencia de falla de las placas de vidrio recocido, resulta aproximada, ya que se emplea la relación modular m_r , como se explicó en la sección 6.6. Considere además, todos los datos que se presentaron en la Tabla 7.2, para conducir los cálculos en forma precisa. Para la forma aproximada

Capítulo 7 Modelo de Predicción de Falla de Cortinas de Vidrio

considere únicamente los datos siguientes: $m_0 = 5.18$, $\theta_0 = 59.88$ MPa y $E = 74$ GPa. Los resultados para cada caso se presentan en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Resumen de resultados de los métodos aproximado y preciso para la predicción de la resistencia de falla del panel de vidrio recocido nuevo.

E (GPa)	K_{Ic} (MPa $\times$ mm ^{0.5})	θ_0 (MPa)	$\sqrt{m_r}$ (adimensional)	$P_{f(0.008)}$, modo preciso (kPa)	$P_{f(0.008)}$, modo aprox. (kPa)	Porcentaje de aproximación
5	6.13	15.47	0.26	6.91	5.23	-24.40
10	8.68	21.91	0.37	8.21	7.39	-9.97
20	12.27	30.98	0.52	10.48	10.45	-0.22
30	15.03	37.94	0.64	12.72	12.80	0.69
40	17.35	43.80	0.74	14.70	14.79	0.60
50	19.40	48.97	0.82	16.31	16.53	1.33
60	21.25	53.64	0.90	17.75	18.11	2.02
70	22.95	57.94	0.97	19.41	19.56	0.76
74	23.72	59.88	1.00	20.11	20.11	-0.02
80	24.54	61.95	1.04	20.85	20.91	0.27
90	26.03	65.71	1.10	21.96	22.18	0.99
100	27.43	69.25	1.16	23.29	23.38	0.38
120	30.05	75.86	1.27	25.47	25.61	0.54

La manera precisa de obtener la predicción de falla de los paneles de vidrio como función de E , implica el cálculo previo de los valores de K_{Ic} (ecuación 5.1), de los valores de θ_0 (ecuación 6.11, para carga de corta duración) y de la elaboración de 13 modelos analíticos para conocer los esfuerzos principales en el plano de cada panel (S1 y S2) para cada diferente valor de E . Los valores calculados de K_{Ic} y de θ_0 se muestran también en la Tabla 7.3. Una vez conocida y organizada la información sobre cada panel se empleó el programa de Matlab, donde se programó el MPFCV y de donde se obtuvo finalmente la predicción de falla, para una probabilidad de 0.8%, ante carga lateral uniforme de los paneles, los resultados se registran en la Tabla 7.3, en la columna llamada: $P_{f(0.008)}$, modo preciso. En otras palabras, la forma exacta implicó la demanda de tiempo y la operación de todo el modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio para obtener los resultados de falla de manera precisa.

La manera aproximada de obtener la predicción de falla de los paneles de vidrio como función de E , implicó únicamente el cálculo de la raíz cuadrada de la relación modular (los cálculos de $\sqrt{m_r}$, se muestran en la Tabla 7.3, utilizado como factor, al ser multiplicado por el valor de 20.11 kPa, valor previamente obtenido de la Figura 7.33 para la predicción de la resistencia de paneles de vidrio recocido de 25 mm de espesor ante carga lateral uniforme y $E = 74$ GPa, para generar finalmente la columna de $P_{f(0.008)}$, modo aproximado de la Tabla 7.3.

En resumen, al evaluar los resultados de la Tabla 7.3, a partir de la columna correspondiente al porcentaje de aproximación, la predicción aproximada sobrestimó la carga de falla en menos del 3%, y que así mismo esta fue subestimada en un par de ocasiones, en un 10% y 25% con respecto de los valores de predicción obtenidos de forma exacta. El haber subestimado la predicción de falla se podría considerar como estar del lado de la seguridad.

Los resultados muestran que la forma aproximada que se propone para la predicción de la carga de falla de los paneles de vidrio como función de E , a través del cálculo de $\sqrt{m_r}$ y usado este

valor como factor multiplicativo de la resistencia que se obtiene de implementar las gráficas de diseño desarrolladas en este trabajo (Figuras 7.22 a 7.33), permite la posibilidad de evitar el cálculo exacto de los esfuerzos principales máximo (S1) y mínimo (S2) en el plano del panel, obtenidos analíticamente de un modelo desarrollado mediante los conceptos de elementos finitos y que considere los aspectos referentes a la no linealidad geométrica; sin embargo, para poder aceptar al 100% la aplicabilidad de la propuesta que se presenta en este trabajo es necesario desarrollar un número mayor de casos de estudio donde se demuestre que esta propuesta puede ser precisa, por lo cual se deben tener presentes las recomendaciones siguientes:

- Se recomienda usar la relación modular como método aproximado para predecir la resistencia de paneles de vidrio recocido sin restricción alguna, siempre y cuando el valor del módulo de elasticidad sea menor que 74 Gpa.
- Para las placas de vidrio con espesores inferiores a 8 mm con un módulo de elasticidad que supere el valor de 74 Gpa, se debe considerar el factor de reducción que resulte de la siguiente operación: $[0.00435 \times E + 0.67826]^{-1}$, donde E (en GPa) es mayor a 74 GPa, pero no mayor a 90 Gpa. El factor de reducción debe multiplicar al valor que resulte de considerar únicamente la predicción de falla del panel de vidrio recocido con $E = 74$ Gpa (Figuras 7.22 a 7.26). Para las placas con espesores nominales mayores o iguales a 8 mm, únicamente se debe considerar el valor que resulte de la predicción de falla del panel de vidrio recocido con el valor de $E = 74$ Gpa (Figuras 7.26 a 7.33).

La razón de la última recomendación, se fundamenta en el comportamiento de los resultados observados en las Figuras 3.36 y 3.37, donde las placas con espesores nominales inferiores a 8 mm, pueden desarrollar una distribución e intensidad de los esfuerzo principales en el plano de las placas mucho mayores que para los espesores iguales o mayores a 8 mm, cada vez que se incrementa el módulo de elasticidad del vidrio por encima del valor de $E = 74$ Gpa.

Por otro lado es importante resaltar que cambios en el módulo de elasticidad del vidrio recocido afectan también significativamente las deflexiones máximas en el centro del claro (w) de placas de vidrio simplemente apoyadas en sus cuatro bordes ante una carga lateral uniforme. La deflexión máxima del centro de placas de vidrio recocido se incrementa considerablemente cuando el módulo de elasticidad es muy bajo, debido a que esta propiedad está directamente relacionado con la rigidez a flexión de las placas de vidrio. La Figura 7.38 ilustra con mayor detalle los efectos del módulo de elasticidad sobre placas de vidrio con espesores que van desde los 3 mm hasta los 19 mm.

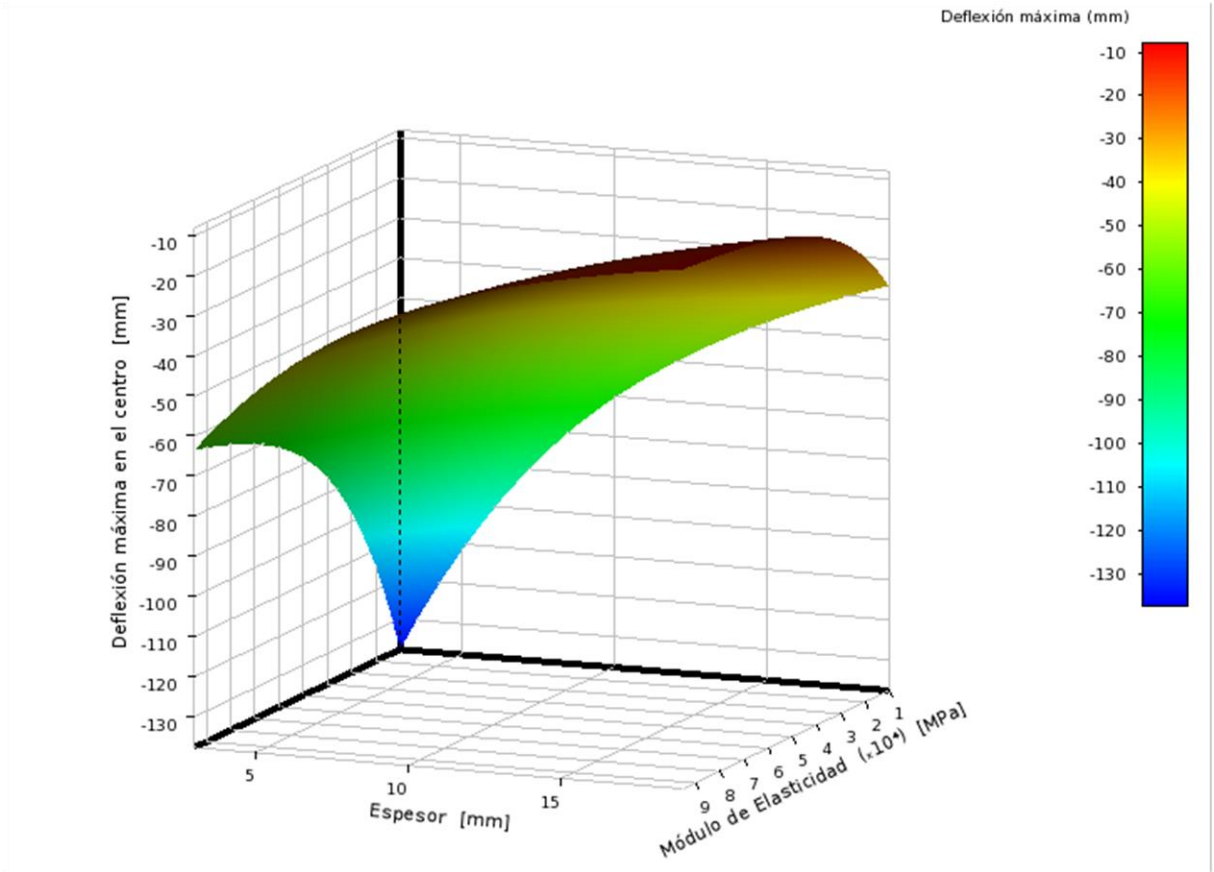


Figura 7.38 Superficie en 3D para deflexiones máximas en el centro (w) de placas de vidrio recocido nuevo con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm, como función de su espesor (h) y del módulo de elasticidad (E). Ante una carga lateral uniforme de 0.02 MPa.

Para precisar los efectos debidos a un cambio en el módulo de elasticidad sobre los paneles de vidrio recocido, se realizó un ajuste sobre la base de datos generada de los resultados de los análisis desarrollos para los casos de estudio, el ajuste sigue la forma del polinomio que se presenta a continuación:

$$w = h \cdot \exp(r_0 + r_1 \cdot x + r_2 \cdot x^2) \quad (7.1)$$

donde:

w , es la deflexión en el centro de la placa (mm).

h , es el espesor de la placa (mm).

$$\begin{aligned} r_0 &= -0.0628 - 2.4654(a/b) + 0.5692(a/b)^2 - 0.0374(a/b)^3 \\ r_1 &= -0.936 + 3.0822(a/b) - 1.0498(a/b)^2 + 0.0807(a/b)^3 \\ r_2 &= 0.8472 - 0.7441(a/b) + 0.344(a/b)^2 - 0.0291(a/b)^3 \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$x = \ln \left[\ln \left(\frac{L_d \cdot a^2 \cdot b^2}{E \cdot h^4} \right) \right] \quad (7.3)$$

donde:

L_d es igual a la carga uniforme de diseño (kPa).

a es igual a la longitud (mm).

b es igual al ancho (mm).

E es igual al módulo de elasticidad del vidrio (74.0×10^6 kPa).

El polinomio de la ecuación 7.1 proporciona una aproximación para estimar la deflexión del centro de un panel, donde se consideran los efectos del comportamiento no lineal. Para que sea aplicable la ecuación ajustada, la deflexión debe ser mayor a un tercio del espesor del panel. Como ejemplo, considere una placa de vidrio recocido de 1500 mm x 1500 mm con espesor nominal variable ante carga lateral uniforme de 20 kPa, como función del espesor del módulo de elasticidad, esto se expresa gráficamente en la Figura 7.39.

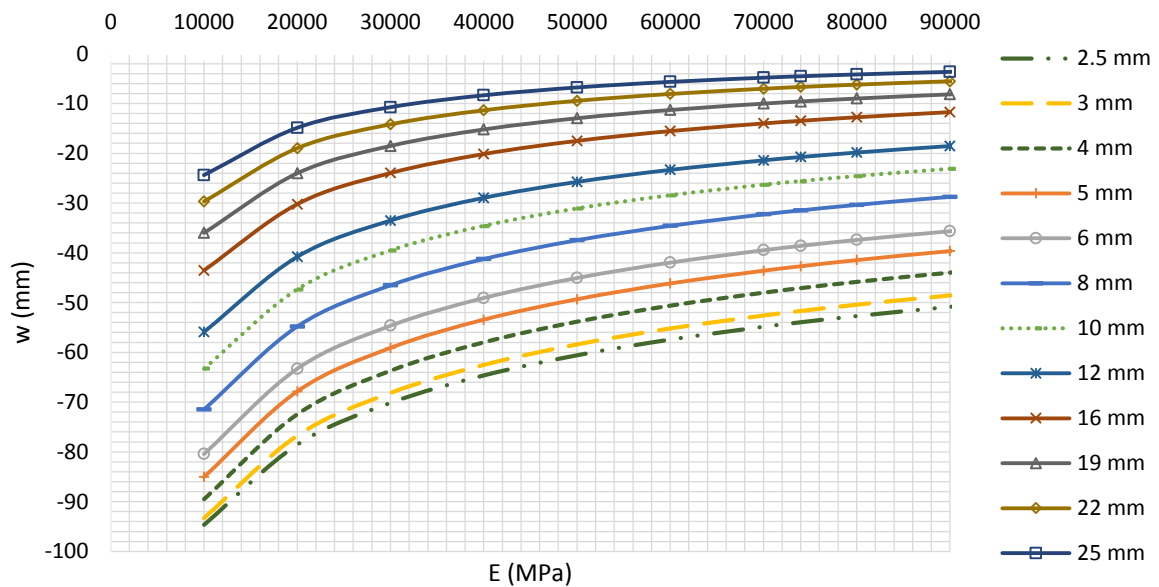


Figura 7.39 Gráfica de w Vs. E para diferentes espesores de placa de vidrio recocido.

7.3.4 MPFCV como función de la duración de la carga

Cuando la duración de la presión uniforme que obra perpendicular al plano de la placa sea diferente de 3 segundos, emplee la Tabla 7.4, la cual se obtiene del análisis de una placa para distintas duraciones de carga:

Tabla 7.4 Factores de duración de carga	
Duración	Factor
3 s.	1.00
5 s.	0.97
1 min.	0.83
30 min	0.67
1 hr.	0.64
24 hrs	0.53
1 semana	0.47
1 mes	0.43
1 año	0.36
20 años	0.30

La predicción de falla de un panel de vidrio ante carga lateral uniforme de larga duración, es un tema de estudio que debe ser evaluado no solo con los factores de la Tabla 7.4, ya que hay aspectos en el comportamiento de una fisura que difieren ante tal condición de carga y que no están incluidos dentro del modelo de predicción de falla de cortinas de vidrio desarrollado en este capítulo.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es investigar una metodología que permita predecir la resistencia de falla de elementos estructurales de vidrio, que sea aplicable para el diseño de cortinas de vidrio para fachadas de edificios ubicados en la República Mexicana. Como resultado de las actividades desarrolladas se obtienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- ♦ Se reconoce que el vidrio es un material de la industria de la construcción con la capacidad de resistir mecánicamente los efectos de diversas acciones demandantes (peso propio, viento, impacto, etc.), a pesar de tener un comportamiento frágil y aleatorio de su resistencia de falla.
- ♦ Las conexiones más apropiadas para el diseño de cortinas de vidrio son las que se construyen a base de un sistema estable de montantes y travesaños, porque brindan la mayor capacidad de sujeción de los paneles de vidrio, incluso después de su ruptura, que es esencial para su fácil reemplazo, pero sobre todo para evitar la caída de fragmentos con riesgo de daño hacia las personas.
- ♦ El MPVÚ desarrollado en Europa por Haldimann, M. (2006) es el método más avanzado actualmente para el diseño de elementos estructurales de vidrio bajo carga arbitraria, el cual se fundamenta en la mecánica de la fractura elástica y en la teoría de probabilidad. Sin embargo, es una propuesta compleja que requiere de gran cantidad de conceptos para su manejo como método de diseño.
- ♦ La densidad de probabilidad de Weibull es el modelo más adecuado para estimar la probabilidad de falla de materiales frágiles como el vidrio.
- ♦ El parámetro de intensidad de esfuerzo crítico K_{IC} , el cual depende de E , define el comportamiento esperado en las grietas presentes en la superficie del vidrio. Por lo que el ingeniero de la práctica profesional, puede seguir alguna de las siguientes recomendaciones:
 - a. El módulo de elasticidad como propiedad mecánica del vidrio, se determina de forma confiable de pruebas CDA en condiciones inertes, donde es evitado el crecimiento subcrítico de grieta en ensayos de vidrio.
 - b. Las normas de diseño deben precisar el valor del módulo de elasticidad en el vidrio para las condiciones de carga de diseño, evitando que se sobrestime la resistencia en el vidrio y con esto, evitar también el riesgo de daño sobre las personas.
 - c. Como parte de un buen diseño estructural, una práctica adicional será siempre necesaria para la determinación del módulo de elasticidad en laboratorio sobre muestras representativas de vidrio para garantizar el buen desempeño estructural de los elementos de vidrio durante su vida útil.
- ♦ Los esfuerzos de falla determinados con la ecuación 6.6 (ASTM C1499-05) son lo suficientemente precisos y confiables para ser empleados en el cálculo de los parámetros

de condición ambiental de la superficie del vidrio (m_0 y θ_0), los cuales son los parámetros necesarios para desarrollar el MPFCV.

- ♦ La teoría de grandes deformaciones es el método apropiado para estimar el comportamiento de placas de vidrio simplemente apoyadas en sus cuatro bordes para estudiar diferentes relaciones de aspecto, altura entre ancho (a/b , donde $a > b$) y espesor.
- ♦ El MPFCV permite calcular en forma exacta la predicción de la resistencia de falla de placas de vidrio recocido simplemente apoyadas en sus cuatro bordes ante carga lateral uniforme con duración de 3 segundos, mediante gráficos de diseño para 12 espesores nominales diferentes.
- ♦ Un valor de $E = 74$ GPa queda justificado para el diseño de elementos estructurales de vidrio ante acciones de corta duración (1s, 3s, 60s, 120s, etc.).
- ♦ La relación modular m_r dentro de las ecuaciones 6.11 y 6.14 contribuye a considerar un valor de E confiable como propiedad del vidrio para el diseño estructural, ante los diversos valores del módulo de elasticidad, por ejemplo, los producidos experimentalmente por diferentes tasas de esfuerzo.
- ♦ Los parámetros de la condición inerte de la superficie del vidrio (β_{inerte} , θ_{inerte}) se determinan experimentalmente a una tasa de esfuerzo mayor que 20 MPa/s, los cuales se sustituyen en las ecuaciones 6.9 y 6.10, para representar de forma confiable los parámetros de las condiciones ambientales de la superficie del vidrio (m_0 , θ_0) para el diseño estructural.
- ♦ Los parámetros de condición no inerte de la superficie del vidrio (β_{NoI} , θ_{NoI}) se determinan experimentalmente a una tasa de esfuerzo menor que 20 MPa/s, los cuales se sustituyen en las ecuaciones 6.12 y 6.13, para representar las condiciones ambientales de la superficie de un elemento de vidrio a las que se verá sometido durante su vida útil. En ocasiones el diseño puede resultar conservador bajo esta condición de parámetros ambientales (m_0 , θ_0), porque estos se determinan con el crecimiento subcrítico de grieta durante los ensayos, pero pueden ser especialmente adecuados para aquellos elementos de vidrio:
 - a. Donde se les preste poco mantenimiento.
 - b. Donde se les presente condiciones de agua y humedad.
 - c. Donde se presenten acciones de duración e intensidad diversa.
 - d. Cuando sean expuestos a las condiciones climáticas del medio ambiente.
- ♦ Las ecuaciones 6.15, 6.16 y 6.17, se relacionan paramétricamente con el MPFCV para facilitar la labor de calcular las predicciones de falla para más placas de vidrio.
- ♦ La predicción de carga de falla de los paneles de vidrio como función de E , se estima aproximadamente a través del factor igual a $\sqrt{m_r}$ (donde m_r es la relación modular para el vidrio), el cual se multiplica por la resistencia de falla que se obtiene de las gráficas de diseño del MPFCV (Figuras 7.22 a 7.33), para brindar la posibilidad de evitar el cálculo de los esfuerzos principales en el plano del panel. Sin embargo, se deben tener presentes la recomendación siguiente:
 - Se recomienda usar esta metodología para predecir la resistencia de paneles de vidrio recocido sin restricción alguna, siempre y cuando el valor del módulo de

elasticidad sea menor o igual que 74 GPa. Cuando el valor de E sea mayor que 74 GPa se recomienda emplear la resistencia de falla calculada con $E = 74$ GPa y multiplicada por un factor de reducción de resistencia, representativo de la variación de los esfuerzos principales contra E , sección 7.3.3.

- ♦ El módulo de elasticidad como propiedad del vidrio afecta la estimación de la deflexión máxima del centro de un panel, por lo tanto se propone una ecuación generada del ajuste de los resultados obtenidos con un polinomio que muestra una muy buena aproximación a los resultados esperados, sección 7.3.3.

Referencias

- Aben H., Anton J., Errapart A. et al.** On Non-Destructive Residual Stress Measurement in Glass Panels, *Estonian Journal of Engineering*, 16 (2), 150–156, 2010.
- ANSYS 2012.** ANSYS v14.5 (programa de elemento finito). Ansys, Inc, EUA, 2012. <http://www.ansys.com/>
- ASTM C 1499-05.** Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, American Society for Testing Materials, 2005.
- ASTM E 1300-12a.** Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Building. American Society for Testing Materials, 2004.
- ASTM E 1300-94.** Standard Practice for Determining the Minimum Thickness and Type of Glass Required to Resist a Specific Load. American Society for Testing Materials, 1994.
- Beason, W. L.** A Failure Prediction Model for Window Glass, Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Texas, EUA, 1980.
- Beason, W. L. y Morgan, J. R.** Glass Failure Prediction Model, *Journal of structural Engineering*, julio de 1984.
- Beason, W. L., Kohutek, T. L. y Bracci, J. M.** Basis for ASTM E 1300 Annealed Glass Thickness Selection Charts, *Journal of Structural Engineering*, febrero de 1998.
- Berd, Richard A.** *Architectura Glass to Resist Seismic and Extreme Climatic Events*, CRC Press LLC, EUA, 2009, ISBN 978-1-84569-369-5.
- Bernard, F. y Daudeville, L.** Point Fixings in Annealed and Tempered Glass Structures: Modeling and Optimization of Bolted Connections, *Engineering Structures*, 31, 946-955, 2009.
- Bourhis E. L.** *Glass Mechanics and Technology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemania, 2008, ISBN 978-3-527-31549-9.
- CAN/CGSB-12.20-M89.** Structural Design of Glass for Buildings. Canadian General Standards Board, 1989.
- Costa, S., Miranda, M., Varum, H. y Teixeira-Dias, F.** On the Evaluation of the Mechanical Behaviour of Structural Glass Elements, Universidad de Aveiro, Portugal, 2001.
- Crisinel, M., Eekhout, M., Haldimann, M. y Visser, R.** EU COST C13 - Final Report - Glass and Interactive Building Envelopes, IOS Press, Netherlands, 2007, ISBN 978-1-58603-709-3.

- EN 1288-2.** Glass in building– Determination of the Bending Strength of Glass – Parte 2: Coaxial Double Ring Test on Flat Specimens with Large Test Surface Areas, junio de 2000.
- EN 1374-1.** Vidrio para la Edificación – Diseño de los Acristalamientos- Parte 1: Base General de Cálculo, Comité Europeo de Normalización, enero de 1999.
- FEMA E-74.** Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide, Federal Emergency Management Agency, febrero de 2011.
- Garg, N. K.** Guidelines for Use of Glass in Buildings, NEW AGE, EUA, 2007, ISBN 978-81-224-2635-9.
- Griffith, A. A.** The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions, of Royal of London, Series A, volume 221, 163–198, 1920.
- Haldimann, M.** Fracture Strength of Structural Glass Elements – Analytical and Numerical Modelling, Testing and Design, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Lausana, Suiza, 2006.
- Haldimann, M., Luible, A. y Overed, M.** Structural Use of Glass, Structural Engineering Documents, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, Suiza, 2008. ISBN: 978-3-85748-119-2.
- Ignacio, P.** El Vidrio Estructural, Bisagra, España, 2000, ISBN 84-931320-2-0.
- K.W. A., Lai B. y Chan S.L.,** Concept of Nonlinear Analysis and Design of Glass Panels, RED Façade Consultant Ltd, 2005.
- Khorasani, N.** Design Principles for Glass Used Structurally, Department of Building Science, Universidad de Lund, EUA, 2004.
- Lee Huei-Huang.** Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14 – Theory, Application, Case Studies, Schroff Development Corporation, 2012.
- Leitch, K. K.** Structural Glass Technology: Systems and Applications, Tesis de Maestría, Universidad de Brown, Instituto de Tecnología de Massachusetts, EUA, junio, 2005.
- Lindqvist, M.** Structural Glass Strength Prediction on Edge Flaw Characterization, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Lausana, Suiza, 2013.
- Madenci E. y Guven, I.** The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Springer, EUA, 2006, ISBN-10: 0-387-28289-0.
- Matlab 2012. Matlab 7.14** (lenguaje de programación). The MathWorks, Inc., 2012. URL <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- Nie, X. y Chen ,W. W.** Effect of Loading Rate and Surface Conditions on the Flexural Strength of Borosilicate Glass, The American Ceramic Society, 92 (6), 1287 -1295, 2009.
- NOM-146-scfi-2001.** Norma Oficial Mexicana, Productos de Vidrio-Vidrio de Seguridad Usado en la Construcción-Especificaciones y Métodos de Prueba, 2001.

- Overend, M.** Recent Developments in Design Methods for Glass Structures, Inglaterra, diciembre, 2009.
- Porter, M.** Aspects of Structural Design with Glass, Tesis doctoral, Universidad de Oxford, EUA, 2001.
- Porter, M. y Houlsby, G.T.** Development of Crack Size and Limit State Design Methods for Edge-Abraded Glass Members, Universidad de Oxford, Department of Engineering Science, 1999.
- Postigo, S., Pacios, A., Huerta C. y Capel, F.** Seguridad ante Impacto Humano de Acristalamientos en Edificaciones: Resistencia Mecánica por Anillos Concéntricos, volumen 2, Madrid, España, 2007.
- 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.
- Reid, S. G.** Effect of Spatial Distribution of Flaws on Glass Ring-on-Ring Test Strengths, International Forum on Engineering Decision Making, Lake Louise, Canada, 2006.
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D. et al.** Glass Construction Manual, 2nd revised and expanded edition, Birkhäuser, Munich, Alemania, 2007, ISBN 978-3-7643-8122-6.
- Vandebroek, M., Belis, J., Louter, C. y Tendeloo, G. V.** Experimental Validation of Edge Strength Model for Glass with Polished and Cut Edge Finishing, Engineering Fracture Mechanics, 96, 480–489, 2012.
- Ventsel, E. y Krauthammer, T.** Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications, Marcel Dekker AG, New York, EUA, 2001, ISBN: 0-8247-0575-0.
- Wang, C.H.** Introduction to Fracture Mechanics, Airframes and Engines Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, julio de 1996.
- Wikipedia.** Wikipedia – La Enciclopedia Libre. 2006. URL <http://www.wikipedia.org/>.
- Wurm, J.** Glass Structures Design and Construction of Self-Supporting Skins, Birkhäuser, Alemania, 2007, ISBN 978-3-7643-7608-6.
- Zammit, K. y Overend, M.** Increasing the Design Strength of Glass – Fractography and Stress Testing, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, España, 2009.

Información y Datos de Pruebas de Laboratorio

A.1 Pruebas coaxiales de doble anillo sobre vidrio recocido nuevo

La serie de pruebas coaxiales de doble anillo sobre vidrio recocido nuevo fueron llevadas a cabo en una máquina universal Instron-5500R a una tasa de carga de 79 kN/s y bajo una temperatura ambiente promedio de 19.6 °C.

Tabla A.1 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 3 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor mm	Tiempo Seg.	Deflexión mm	Carga N	Deflexión mm	Esfuerzo de falla ^ψ (MPa)
M_1_3mm	3.06	1.13	0.73	1488.36	0.83	93.65
M_2_3mm	2.96	1.40	0.90	1838.80	1.03	123.25
M_3_3mm	3.00	2.18	1.49	2867.87	1.60	187.13
M_4_3mm	2.99	1.81	1.30	2379.94	1.33	156.86
M_5_3mm	2.97	1.47	1.17	1931.99	1.08	128.62
M_6_3mm	2.90	1.07	0.91	1408.43	0.79	98.35
M_7_3mm	2.95	1.79	1.35	2361.06	1.32	159.87
M_8_3mm	2.90	1.99	1.44	2617.03	1.46	182.74
M_9_3mm	2.88	1.47	-	1935.50	1.08	137.04
M_10_3mm	2.90	1.72	-	2259.13	1.26	158.30

^ψ Media = 151.48 MPa, desviación estándar = 26.17 MPa y coeficiente de variación = 0.17

Tabla A.2 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 4 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor mm	Tiempo Seg.	Deflexión mm	Carga N	Deflexión mm	Esfuerzo de falla ^ψ (MPa)
M_1_4mm	3.97	3.90	1.37	5133.56	1.49	191.28
M_2_4mm	3.95	1.71	0.72	2250.55	0.65	84.71
M_3_4mm	3.975	1.96	0.80	2576.91	0.75	95.78
M_4_4mm	3.935	3.68	1.32	4846.17	1.40	183.80
M_5_4mm	3.96	2.72	1.00	3576.76	1.03	133.94
M_6_4mm	3.92	2.01	0.80	2647.08	0.77	101.16
M_7_4mm	3.88	2.63	-	3465.38	1.00	135.18
M_8_4mm	3.925	1.65	-	2166.33	0.63	82.58
M_9_4mm*	4.09	1.04	-	1367.91	0.40	48.02

^ψ Media = 126.36 MPa, desviación estándar = 40.95 Mpa y coeficiente de variación = 0.32

Tabla A.3 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 5 mm en condiciones cercanas a las inertes.						
Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor	Tiempo	Deflexión	Carga	Deflexión	Esfuerzo de falla ^Ψ (MPa)
	mm	Seg.	mm	N	mm	
M_1_5mm	5.055	6.52	1.32	8588.08	1.36	197.37
M_2_5mm	5.06	3.27	0.74	4306.24	0.68	98.77
M_4_5mm**	4.94	8.06	1.53	10618.20	1.68	255.52
M_5_5mm	5	4.87	1.03	6416.69	1.01	150.73
M_6_5mm	4.935	3.95	0.83	5201.96	0.82	125.44
M_7_5mm	4.95	5.57	1.11	7336.90	1.16	175.84
M_8_5mm	4.97	3.90	0.83	5136.87	0.81	122.13
M_9_5mm	4.98	2.97	0.65	3914.90	0.62	92.70
M_10_5mm	4.95	4.15	-	5460.59	0.86	130.87
^Ψ Media = 136.72 MPa, desviación estándar = 35.54 MPa y coeficiente de variación = 0.26						

Tabla A.3 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 5 mm en condiciones cercanas a las inertes.						
Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor	Tiempo	Deflexión	Carga	Deflexión	Esfuerzo de falla ^Ψ (MPa)
	mm	Seg.	mm	N	mm	
M_1_6mm	5.845	5.04	0.75	6629.80	0.73	113.96
M_2_6mm	5.845	5.37	0.80	7072.81	0.78	121.58
M_3_6mm	5.745	8.46	1.20	11142.72	1.23	198.26
M_4_6mm	5.76	7.85	1.15	10336.76	1.15	182.96
M_5_6mm	5.815	8.63	1.22	11357.51	1.26	197.25
M_6_6mm**	5.695	10.71	1.44	14095.87	1.56	255.23
M_7_6mm	5.685	5.47	0.81	7205.13	0.80	130.92
M_8_6mm	5.695	6.49	0.95	8544.60	0.95	154.71
M_9_6mm	5.635	9.12	-	12004.18	1.33	222.01
M_10_6mm	5.685	9.34	-	12297.18	1.36	223.45
^Ψ Media = 172.35 MPa, desviación estándar = 39.02 MPa y coeficiente de variación = 0.23						

Tabla A.5 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 8 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor	Tiempo	Deflexión	Carga	Deflexión	Esfuerzo de falla ^ψ
	mm	Seg.	mm	N	mm	(MPa)
M_1_8mm	8.05	11.46	0.82	15090.54	0.85	136.75
M_2_8mm*	7.865	5.19	0.46	6832.50	0.38	64.86
M_3_8mm	7.865	6.35	0.52	8364.43	0.47	79.41
M_4_8mm	7.835	10.73	0.78	14121.82	0.79	135.10
M_5_8mm	7.85	11.42	0.86	15034.45	0.84	143.28
M_6_8mm	8.11	12.54	0.90	16510.58	0.92	147.42
M_7_8mm	8.17	8.25	0.59	10868.80	0.61	95.62
M_8_8mm	8.245	9.25	-	12185.41	0.68	105.27
M_9_8mm	8.17	8.05	-	10603.26	0.59	93.29
M_10_8mm	8.225	9.86	-	12988.21	0.73	112.75

^ψ Media = 116.89 MPa, desviación estándar = 23.02 MPa y coeficiente de variación = 0.20

Tabla A.6 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 10 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor	Tiempo	Deflexión	Carga	Deflexión	Esfuerzo de falla ^ψ
	mm	Seg.	mm	N	mm	(MPa)
M_1_10mm	9.91	16.62	0.87	21877.12	0.90	130.82
M_2_10mm	9.675	17.74	0.92	23361.01	0.96	146.56
M_3_10mm	9.71	12.64	0.68	16640.44	0.68	103.65
M_4_10mm*	9.645	7.28	0.42	9585.48	0.39	60.51
M_5_10mm	9.685	10.93	0.59	14394.52	0.59	90.12
M_6_10mm	9.7	16.84	0.86	22177.57	0.91	138.42
M_7_10mm	9.745	13.94	0.76	18358.90	0.75	113.53
M_8_10mm	9.63	8.71	-	11465.66	0.47	72.61
M_9_10mm	9.63	12.89	-	16973.85	0.70	107.49
M_10_10mm	9.635	11.88	-	15642.60	0.64	98.95

^ψ Media = 117.11 MPa, desviación estándar = 20.24 MPa y coeficiente de variación = 0.17

Tabla A.7 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 12 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor mm	Tiempo Seg.	Deflexión mm	Carga N	Deflexión mm	Esfuerzo de falla ^Ψ (MPa)
M_1_12mm	12.16	22.53	0.88	29664.33	0.90	117.81
M_2_12mm	11.975	22.70	0.89	29886.38	0.91	122.39
M_3_12mm	12.155	16.05	0.67	21133.87	0.64	84.00
M_4_12mm	12.055	21.41	0.83	28184.72	0.86	113.90
M_5_12mm	12.04	16.24	0.65	21386.02	0.65	86.64
M_6_12mm	12.23	16.99	0.70	22373.20	0.68	87.84
M_7_12mm	12.28	17.72	0.67	23329.75	0.71	90.85
M_8_12mm	11.965	21.36	-	28121.92	0.86	115.36
M_9_12mm*	11.96	8.60	-	11322.34	0.35	46.48
M_10_12mm	11.9	21.24	-	27964.13	0.85	115.97

^Ψ Media = 105.01 MPa, desviación estándar = 14.18 MPa y coeficiente de variación = 0.135

Tabla A.8 Datos de pruebas para vidrio recocido nuevo de 19 mm en condiciones cercanas a las inertes.

Clave	Laboratorio				Norma C1499-05	
	Espesor mm	Tiempo Seg.	Deflexión mm	Carga N	Deflexión mm	Esfuerzo de falla ^Ψ (MPa)
M_1_19mm	18.67	45.57	1.20	60001.09	1.24	101.09
M_2_19mm	18.555	46.09	1.15	60684.59	1.25	103.51
M_3_19mm	18.5	32.66	0.98	42998.27	0.89	73.78
M_4_19mm	18.62	52.55	1.38	69187.69	1.43	117.19
M_5_19mm	18.495	35.40	1.01	46615.11	0.96	80.03
M_6_19mm	18.71	44.69	1.01	58845.41	1.21	98.72
M_7_19mm	18.68	40.24	1.09	52978.31	1.09	89.16
M_8_19mm	18.475	29.39	-	38690.34	0.80	66.57
M_9_19mm	18.715	25.21	-	33199.59	0.68	55.66
M_10_19mm	18.55	29.30	-	38577.19	0.79	65.84

^Ψ Media = 85.77 MPa, desviación estándar = 19.61 MPa y coeficiente de variación = 0.23

Muestras Fotográficas de Pruebas de Laboratorio

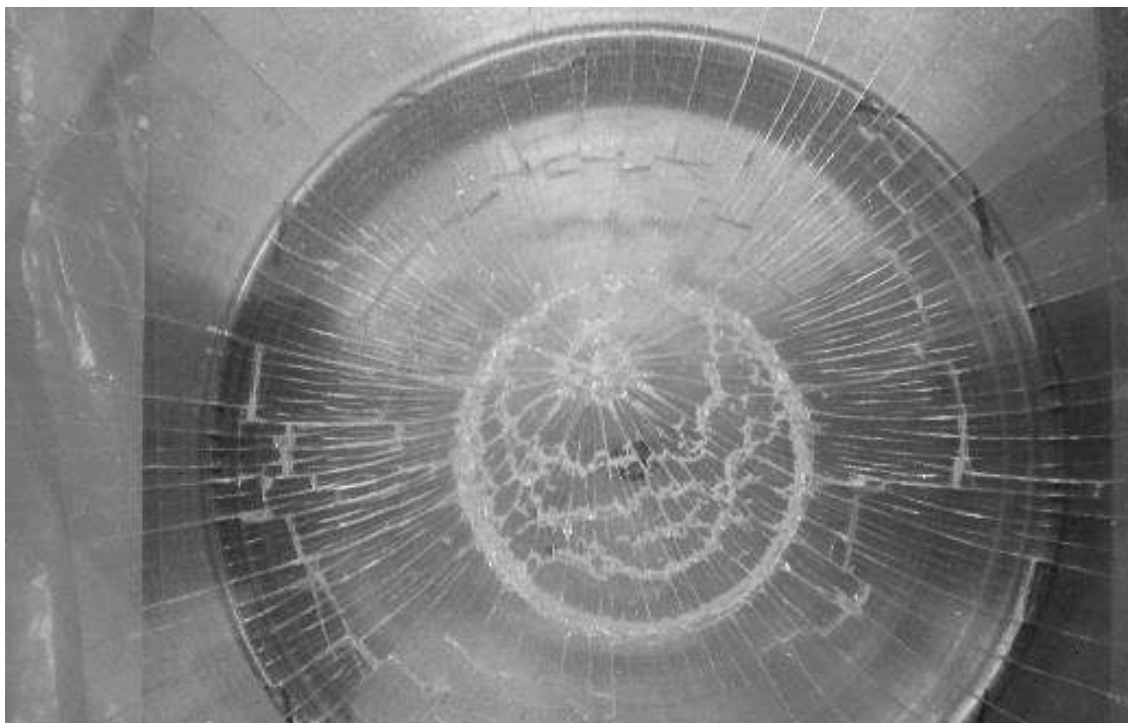


Figura B.1 Patrón de grietas de falla de la muestra 8 de vidrio recocido de 3 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.44 mm, carga de falla = 2617.03 N y esfuerzo de falla = 182.74 MPa.

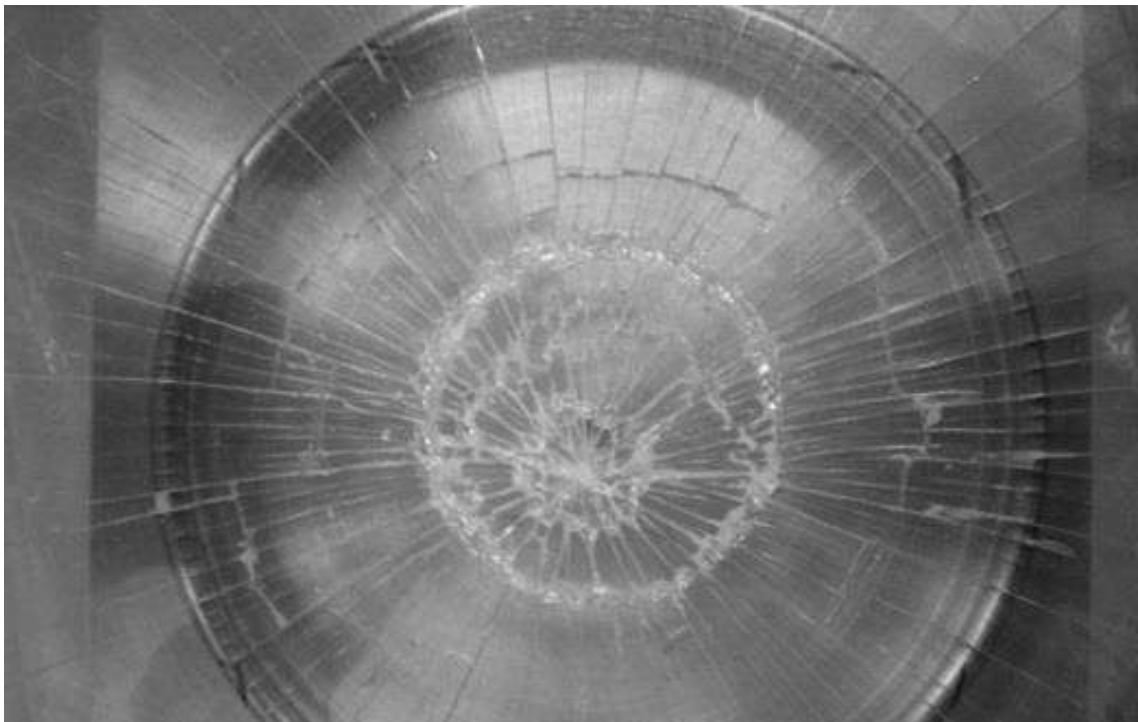


Figura B.2 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 4 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.00 mm, carga de falla = 3576.76 N y esfuerzo de falla = 133.94 MPa.

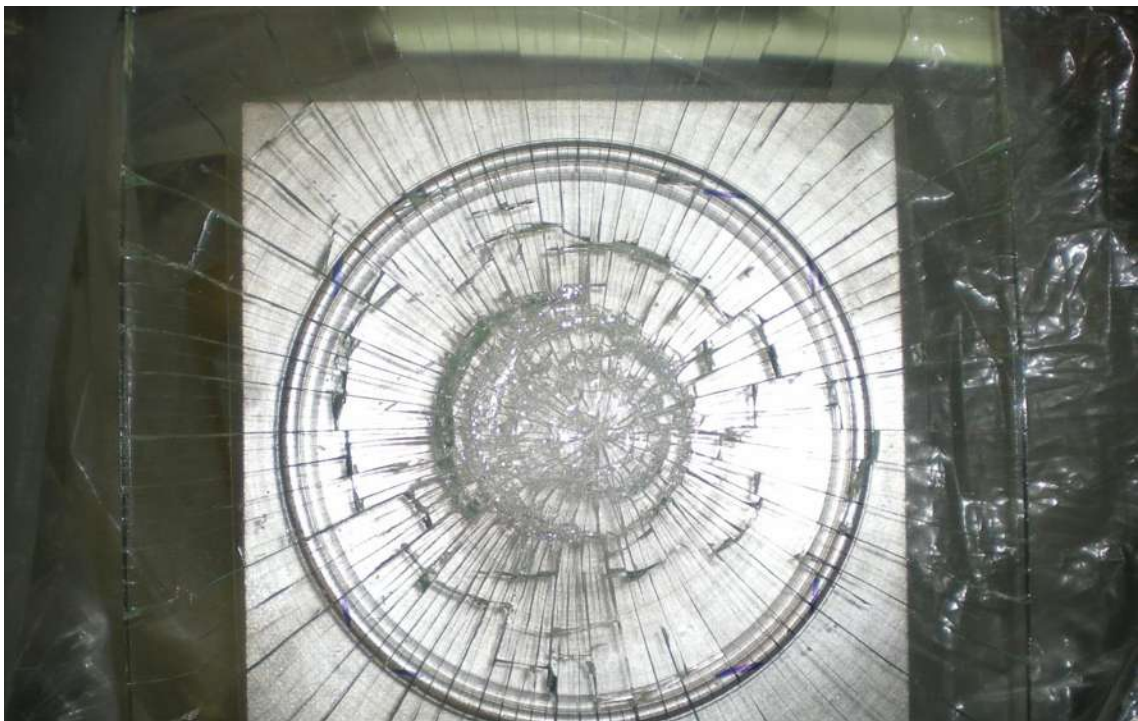


Figura B.3 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 5 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.03 mm, carga de falla = 6416.69 N y esfuerzo de falla = 150.73 MPa.

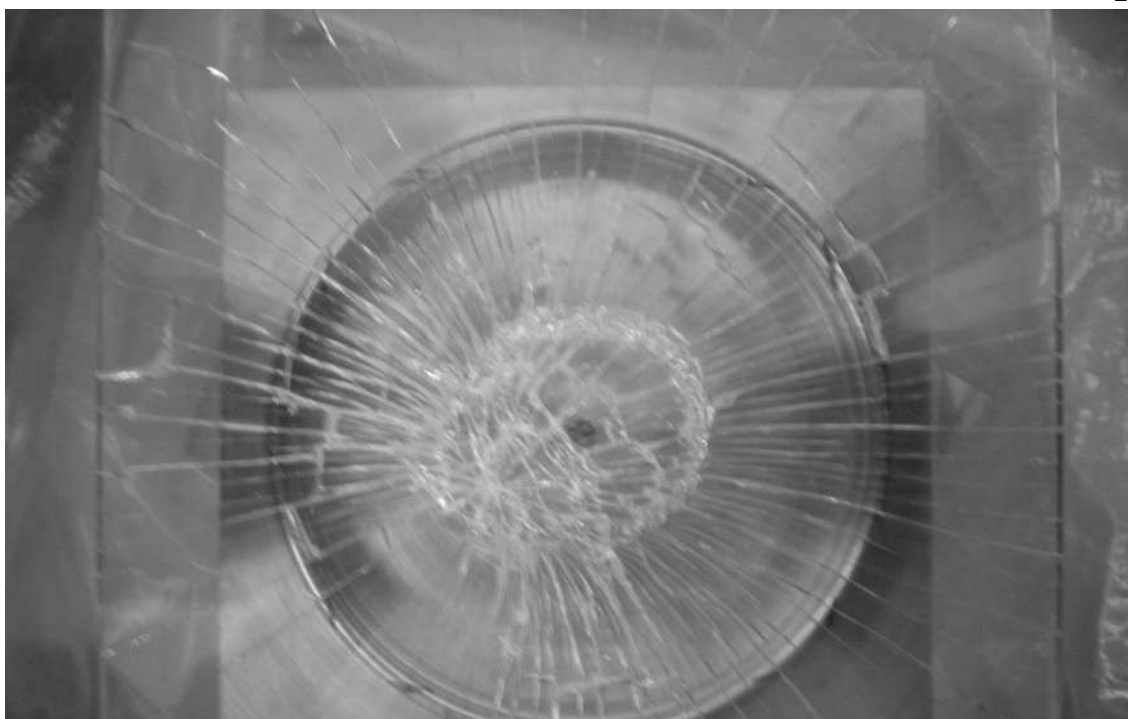


Figura B.4 Patrón de grietas de falla de la muestra 2 de vidrio recocido de 6 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.80 mm, carga de falla = 7072.81 N y esfuerzo de falla = 121.58 MPa.



Figura B.5 Patrón de grietas de falla de la muestra 4 de vidrio recocido nuevo de 8 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.78 mm, carga de falla = 14121.82 N y esfuerzo de falla = 135.10 MPa.

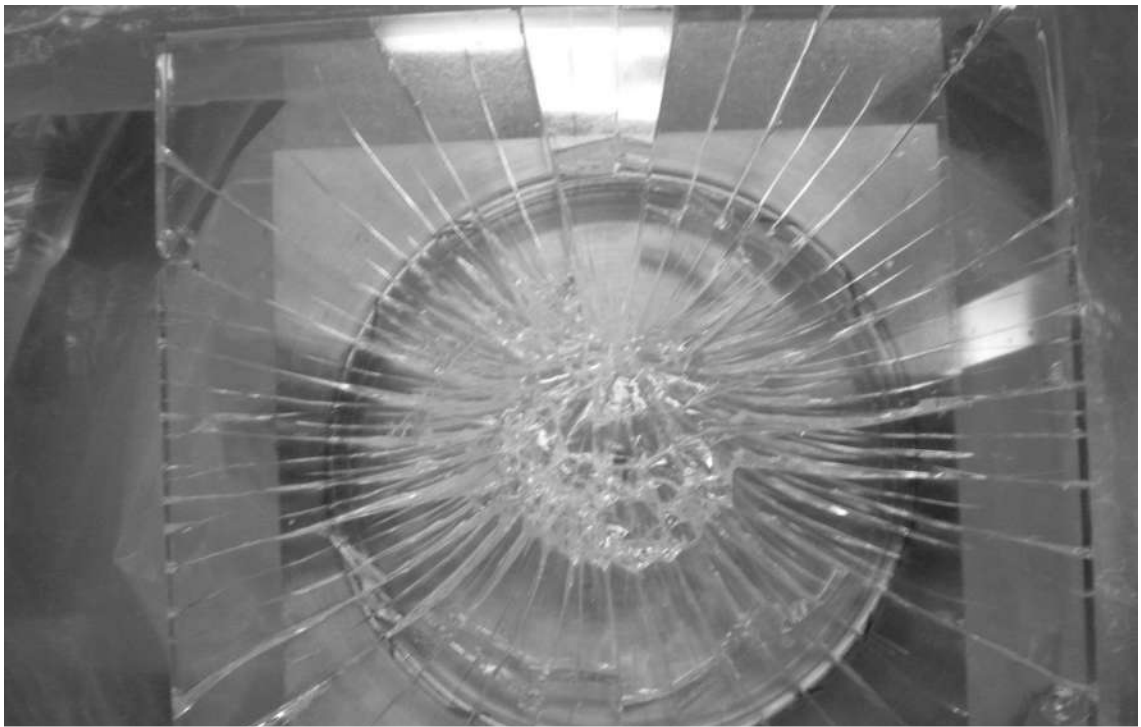


Figura B.6 Patrón de grietas de falla de la muestra 3 de vidrio recocido de 10 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.68 mm, carga de falla = 16640.44 N y esfuerzo de falla = 103.65 MPa.

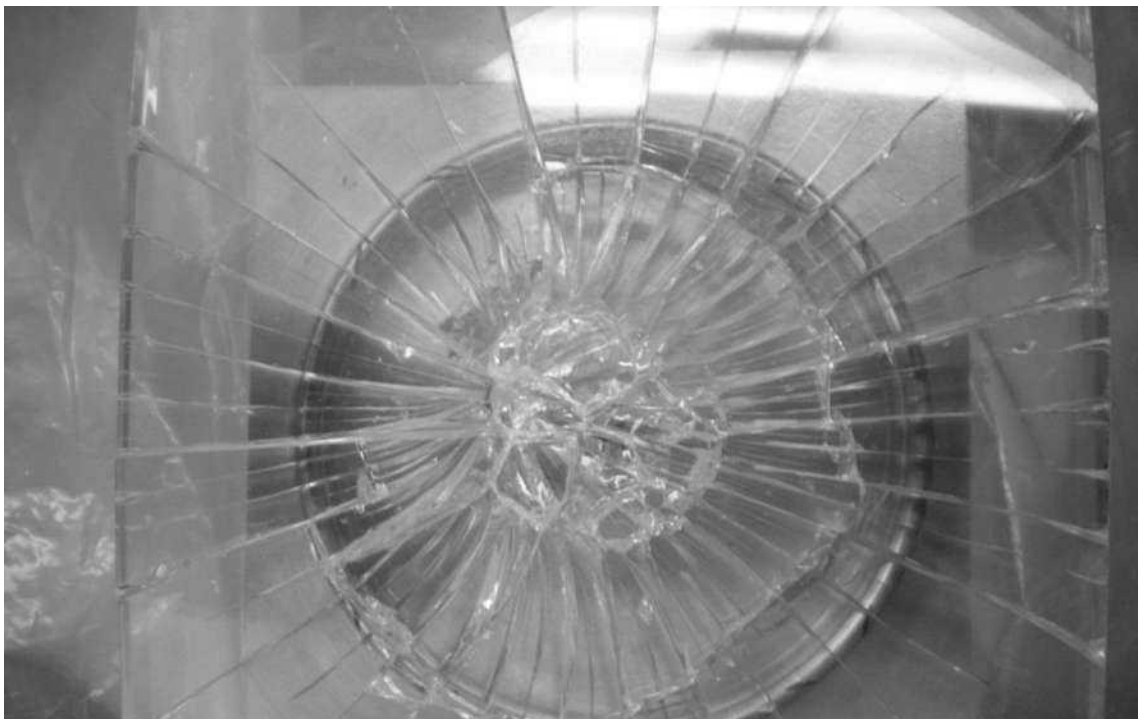


Figura B.7 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 12 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 0.65 mm, carga de falla = 21386.02 N y esfuerzo de falla = 86.64 MPa.



Figura B.8 Patrón de grietas de falla de la muestra 5 de vidrio recocido de 19 mm de espesor. Otros de sus datos son: deflexión = 1.01 mm, carga de falla = 46615.11 N y esfuerzo de falla = 80.03 MPa.

Resultados del MPFCV

Nota: El número asignado sobre las dimensiones de cada una de las placas de vidrio de las Tablas C.1 a C.12, corresponde al nombre de archivo de cada una de las curvas de fragilidad anexadas dentro del CD.

Tabla C.1 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 2.5 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	4.281	2.625	1.716	1.203	0.892	0.692	0.556	0.458	0.293	0.224
$P_{f,0.0012}$	3.207	1.966	1.286	0.900	0.668	0.519	0.417	0.343	0.220	0.167
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	3.323	1.976	1.262	0.877	0.650	0.463	0.360	0.272	0.210	
$P_{f,0.0012}$	2.491	1.480	0.945	0.657	0.487	0.347	0.270	0.203	0.157	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	2.668	1.629	1.033	0.717	0.531	0.335	0.251			
$P_{f,0.0012}$	1.999	1.220	0.775	0.537	0.398	0.251	0.188			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	2.180	1.396	0.890	0.640	0.457	0.269				
$P_{f,0.0012}$	1.634	1.046	0.667	0.480	0.343	0.202				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	1.825	1.238	0.795	0.551						
$P_{f,0.0012}$	1.367	0.927	0.596	0.413						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	1.563	1.113	0.725	0.458						
$P_{f,0.0012}$	1.170	0.834	0.543	0.343						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	1.373	1.011	0.673							
$P_{f,0.0012}$	1.029	0.758	0.504							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	1.232	0.921	0.631							
$P_{f,0.0012}$	0.924	0.690	0.473							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	1.128	0.861								
$P_{f,0.0012}$	0.845	0.646								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	1.048	0.790								
$P_{f,0.0012}$	0.785	0.592								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	0.983	0.729								
$P_{f,0.0012}$	0.736	0.547								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	0.951	0.632								
$P_{f,0.0012}$	0.712	0.473								
a/b = 7	41	54								
largo	3.500	5.625								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	0.914	0.594								
$P_{f,0.0012}$	0.685	0.445								

Tabla C.2 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 3 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	4.873	3.167	2.132	1.523	1.137	0.884	0.709	0.584	0.375	0.320
$P_{f,0.0012}$	3.651	2.373	1.598	1.141	0.852	0.662	0.531	0.438	0.281	0.240
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	3.725	2.418	1.593	1.118	0.831	0.645	0.518	0.379	0.307	
$P_{f,0.0012}$	2.790	1.811	1.194	0.838	0.623	0.483	0.388	0.284	0.230	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	2.929	1.988	1.310	0.915	0.678	0.526	0.322			
$P_{f,0.0012}$	2.196	1.490	0.981	0.686	0.508	0.394	0.241			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	2.374	1.686	1.130	0.788	0.584	0.345				
$P_{f,0.0012}$	1.779	1.263	0.847	0.590	0.438	0.258				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	2.004	1.458	1.008	0.704						
$P_{f,0.0012}$	1.501	1.093	0.756	0.527						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	1.751	1.270	0.916	0.641						
$P_{f,0.0012}$	1.312	0.952	0.686	0.481						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	1.579	1.119	0.844							
$P_{f,0.0012}$	1.183	0.839	0.632							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	1.457	0.994	0.782							
$P_{f,0.0012}$	1.091	0.744	0.586							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	1.372	0.895								
$P_{f,0.0012}$	1.028	0.670								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	1.309	0.814								
$P_{f,0.0012}$	0.981	0.609								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	1.259	0.751								
$P_{f,0.0012}$	0.943	0.562								
a/b = 6.5	40	53		a/b = 7	41	54				
largo	3.250	5.250		largo	3.500	5.625				
ancho	0.500	0.750		ancho	0.500	0.750				
$P_{f,0.008}$	1.233	0.664		$P_{f,0.008}$	1.207	0.629				
$P_{f,0.0012}$	0.923	0.497		$P_{f,0.0012}$	0.905	0.471				

Tabla C.3 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 4 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
P _{f,0.008}	6.824	3.959	2.902	2.147	1.642	1.291	1.042	0.860	0.723	0.470
P _{f,0.0012}	5.111	2.965	2.176	1.610	1.230	0.968	0.781	0.644	0.541	0.352
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
P _{f,0.008}	4.763	3.066	2.217	1.611	1.216	0.948	0.761	0.627	0.452	
P _{f,0.0012}	3.569	2.299	1.660	1.207	0.911	0.710	0.571	0.470	0.339	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
P _{f,0.008}	3.742	2.440	1.822	1.327	0.995	0.774	0.531			
P _{f,0.0012}	2.803	1.829	1.365	0.995	0.746	0.580	0.398			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	3.149	1.981	1.545	1.144	0.858	0.568				
P _{f,0.0012}	2.359	1.484	1.158	0.857	0.643	0.426				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	2.800	1.657	1.337	1.020						
P _{f,0.0012}	2.097	1.241	1.002	0.763						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	2.578	1.425	1.164	0.921						
P _{f,0.0012}	1.932	1.067	0.873	0.691						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	2.437	1.261	1.025							
P _{f,0.0012}	1.827	0.945	0.768							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	2.338	1.141	0.911							
P _{f,0.0012}	1.753	0.855	0.682							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	2.267	1.055								
P _{f,0.0012}	1.699	0.790								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	2.209	0.990								
P _{f,0.0012}	1.655	0.741								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	2.156	0.941								
P _{f,0.0012}	1.616	0.705								
a/b = 6.5	40	53		a/b = 7	41	54				
largo	3.250	5.250		largo	3.500	5.625				
ancho	0.500	0.750		ancho	0.500	0.750				
P _{f,0.008}	2.129	0.876		P _{f,0.008}	2.096	0.859				
P _{f,0.0012}	1.596	0.657		P _{f,0.0012}	1.569	0.643				

Tabla C.4 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 5 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	10.215	4.743	3.470	2.714	2.125	1.698	1.390	1.155	0.974	0.710
$P_{f,0.0012}$	7.649	3.553	2.602	2.032	1.592	1.271	1.041	0.865	0.730	0.532
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	6.706	3.532	2.693	2.071	1.598	1.266	1.024	0.846	0.711	
$P_{f,0.0012}$	5.027	2.649	2.018	1.552	1.198	0.949	0.768	0.634	0.533	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	5.298	2.766	2.163	1.703	1.313	1.038	0.837			
$P_{f,0.0012}$	3.969	2.072	1.620	1.275	0.984	0.778	0.627			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	4.579	2.262	1.766	1.445	1.132	0.887				
$P_{f,0.0012}$	3.430	1.695	1.324	1.083	0.848	0.664				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	4.177	1.942	1.478	1.249						
$P_{f,0.0012}$	3.131	1.454	1.108	0.936						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	3.918	1.730	1.266	1.088						
$P_{f,0.0012}$	2.935	1.297	0.949	0.815						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	3.747	1.592	1.113							
$P_{f,0.0012}$	2.806	1.193	0.834							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	3.616	1.496	0.999							
$P_{f,0.0012}$	2.708	1.121	0.749							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	3.519	1.431								
$P_{f,0.0012}$	2.637	1.072								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	3.432	1.382								
$P_{f,0.0012}$	2.572	1.036								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	3.352	1.347								
$P_{f,0.0012}$	2.512	1.009								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	3.313	1.296								
$P_{f,0.0012}$	2.482	0.971								
a/b = 7					41	54				
largo					3.500	5.625				
ancho					0.500	0.750				
$P_{f,0.008}$					3.259	1.277				
$P_{f,0.0012}$					2.441	0.957				

Tabla C.5 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 6 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	14.675	6.774	4.944	3.876	3.044	2.437	1.990	1.655	1.398	1.150
$P_{f,0.0012}$	10.993	5.074	3.703	2.904	2.281	1.826	1.492	1.240	1.047	0.861
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	9.634	5.034	3.841	2.966	2.296	1.815	1.469	1.215	1.023	
$P_{f,0.0012}$	7.221	4.707	2.878	2.222	1.719	1.359	1.101	0.910	0.766	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	7.610	3.947	3.081	2.439	1.889	1.490	1.203			
$P_{f,0.0012}$	5.704	2.956	2.309	1.829	1.415	1.116	0.901			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	6.584	3.235	2.519	2.069	1.632	1.289				
$P_{f,0.0012}$	4.931	2.425	1.887	1.551	1.222	0.966				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	6.009	2.784	2.110	1.789						
$P_{f,0.0012}$	4.506	2.087	1.580	1.340						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	5.640	2.486	1.810	1.557						
$P_{f,0.0012}$	4.225	1.863	1.356	1.167						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	5.397	2.292	1.595							
$P_{f,0.0012}$	4.045	1.717	1.195							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	5.206	2.157	1.435							
$P_{f,0.0012}$	3.904	1.617	1.075							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	5.065	2.065								
$P_{f,0.0012}$	3.794	1.548								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	4.945	1.997								
$P_{f,0.0012}$	3.703	1.497								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	4.828	1.946								
$P_{f,0.0012}$	3.618	1.458								
a/b = 6.5	40	53		a/b = 7	41	54				
largo	3.250	5.250		largo	3.500	5.625				
ancho	0.500	0.750		ancho	0.500	0.750				
$P_{f,0.008}$	4.770	1.874		$P_{f,0.008}$	4.693	1.845				
$P_{f,0.0012}$	3.574	1.403		$P_{f,0.0012}$	3.515	1.383				

Tabla C.6 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 8 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	26.023	10.377	6.206	4.826	4.007	3.338	2.791	2.357	2.013	1.748
$P_{f,0.0012}$	19.513	7.780	4.652	3.617	3.004	2.503	2.090	1.766	1.509	1.309
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	16.783	6.984	4.614	3.740	3.106	2.549	2.104	1.543	1.493	
$P_{f,0.0012}$	12.579	5.232	3.459	2.804	2.326	1.910	1.575	1.156	1.119	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	13.250	5.508	3.616	2.976	2.527	2.097	1.732			
$P_{f,0.0012}$	9.929	4.128	2.708	2.229	1.893	1.570	1.297			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	11.539	4.713	2.963	2.418	2.107	1.792				
$P_{f,0.0012}$	8.649	3.531	2.220	1.811	1.578	1.342				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	10.595	4.262	2.552	2.026						
$P_{f,0.0012}$	7.937	3.193	1.912	1.518						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	9.979	3.976	2.278	1.747						
$P_{f,0.0012}$	7.481	2.979	1.707	1.308						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	9.564	3.788	2.102							
$P_{f,0.0012}$	7.167	2.838	1.574							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	9.239	3.650	1.978							
$P_{f,0.0012}$	6.919	2.735	1.481							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	8.986	3.548								
$P_{f,0.0012}$	6.737	2.658								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	8.773	3.462								
$P_{f,0.0012}$	6.573	2.596								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	8.570	3.394								
$P_{f,0.0012}$	6.420	2.542								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	8.470	3.279								
$P_{f,0.0012}$	6.344	2.455								
a/b = 7					41	54				
largo					3.500	5.625				
ancho					0.500	0.750				
$P_{f,0.008}$					8.333	3.229				
$P_{f,0.0012}$					6.249	2.420				

Tabla C.7 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 10 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
P _{f,0.008}	40.644	15.986	8.487	5.803	4.691	4.026	3.482	3.008	2.607	2.287
P _{f,0.0012}	30.441	11.981	6.355	4.344	3.516	3.018	2.610	2.252	1.953	1.713
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
P _{f,0.008}	26.200	10.369	5.821	4.311	3.632	3.132	2.682	2.289	1.966	
P _{f,0.0012}	19.625	7.770	4.362	3.228	2.721	2.346	2.010	1.714	1.472	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
P _{f,0.008}	20.661	8.196	4.584	3.380	2.872	2.527	2.195			
P _{f,0.0012}	15.485	6.138	3.437	2.531	2.152	1.894	1.644			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	18.006	7.119	3.888	2.770	2.332	2.081				
P _{f,0.0012}	13.496	5.334	2.913	2.077	1.748	1.559				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	16.541	6.525	3.488	2.385						
P _{f,0.0012}	12.391	4.888	2.614	1.786						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	15.581	6.140	3.233	2.129						
P _{f,0.0012}	11.683	4.598	2.422	1.595						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	14.933	5.878	3.071							
P _{f,0.0012}	11.198	4.403	2.300							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	14.429	5.675	2.952							
P _{f,0.0012}	10.815	4.252	2.211							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	14.041	5.522								
P _{f,0.0012}	10.518	4.139								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	13.704	5.391								
P _{f,0.0012}	10.267	4.039								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	13.385	5.287								
P _{f,0.0012}	10.035	3.959								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	13.233	5.109								
P _{f,0.0012}	9.913	3.829								
a/b = 7					41	54				
largo					3.500	5.625				
ancho					0.500	0.750				
P _{f,0.008}					13.016	5.031				
P _{f,0.0012}					9.751	3.768				

Tabla C.8 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 12 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	58.376	23.009	11.899	7.407	5.480	4.568	4.000	3.543	3.138	2.786
$P_{f,0.0012}$	43.743	17.230	8.909	5.550	4.106	3.421	3.000	2.654	2.351	2.088
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	37.671	14.839	7.805	5.158	4.086	3.524	3.114	2.746	2.429	
$P_{f,0.0012}$	28.219	11.118	5.847	3.865	3.059	2.640	2.335	2.057	1.820	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	29.734	11.712	6.169	4.058	3.195	2.779	2.535			
$P_{f,0.0012}$	22.273	8.781	4.623	3.039	2.394	2.082	1.899			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	25.891	10.205	5.333	3.420	2.600	2.256				
$P_{f,0.0012}$	19.409	7.640	3.996	2.561	1.946	1.691				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	23.810	9.369	4.869	3.046						
$P_{f,0.0012}$	17.828	7.017	3.648	2.283						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	22.424	8.824	4.570	2.810						
$P_{f,0.0012}$	16.809	6.610	3.424	2.104						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	21.499	8.456	4.372							
$P_{f,0.0012}$	16.111	6.334	3.275							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	20.762	8.169	4.220							
$P_{f,0.0012}$	15.567	6.117	3.161							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	20.208	7.949								
$P_{f,0.0012}$	15.142	5.955								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	19.733	7.757								
$P_{f,0.0012}$	14.778	5.812								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	19.277	7.604								
$P_{f,0.0012}$	14.448	5.697								
a/b = 6.5	40	53		a/b = 7	41	54				
largo	3.250	5.250		largo	3.500	5.625				
ancho	0.500	0.750		ancho	0.500	0.750				
$P_{f,0.008}$	19.047	7.349		$P_{f,0.008}$	18.743	7.244				
$P_{f,0.0012}$	14.272	5.511		$P_{f,0.0012}$	14.038	5.425				

Tabla C.9 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 16 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
P _{f,0.008}	103.059	40.776	21.038	12.757	8.920	7.100	6.116	5.448	4.888	4.379
P _{f,0.0012}	77.274	30.545	15.763	9.558	6.684	5.319	4.585	4.079	3.661	3.279
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
P _{f,0.008}	66.665	26.318	13.655	8.566	6.390	5.355	4.731	4.241	3.792	
P _{f,0.0012}	49.995	19.710	10.231	6.416	4.788	4.011	3.544	3.177	2.840	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
P _{f,0.008}	52.682	20.778	10.798	6.767	5.009	4.197	3.738			
P _{f,0.0012}	39.454	15.572	8.091	5.068	3.751	3.141	2.799			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	45.931	18.104	9.384	5.797	4.182	3.430				
P _{f,0.0012}	34.402	13.557	7.028	4.344	3.131	2.570				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	42.234	16.633	8.605	5.249						
P _{f,0.0012}	31.635	12.470	6.451	3.931						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	39.821	15.671	8.096	4.899						
P _{f,0.0012}	29.844	11.738	6.066	3.669						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	38.175	15.019	7.758							
P _{f,0.0012}	28.624	11.250	5.809							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	36.878	14.506	7.491							
P _{f,0.0012}	27.643	10.867	5.607							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	35.898	14.119								
P _{f,0.0012}	26.891	10.588								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	35.059	13.792								
P _{f,0.0012}	26.272	10.323								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	34.253	13.512								
P _{f,0.0012}	25.653	10.133								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	33.856	13.069								
P _{f,0.0012}	25.357	9.785								
a/b = 7					41	54				
largo					3.500	5.625				
ancho					0.500	0.750				
P _{f,0.008}					33.309	12.867				
P _{f,0.0012}					24.977	9.637				

Tabla C.10 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 19 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	48
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
P _{f,0.008}	144.739	57.419	29.649	17.740	11.782	8.668	7.063	6.099	5.396	5.007
P _{f,0.0012}	108.483	43.042	22.215	13.274	8.816	6.440	5.212	4.459	4.074	3.601
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	49	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
P _{f,0.008}	93.744	37.072	19.135	11.522	7.975	6.151	5.194	4.589	4.162	
P _{f,0.0012}	70.261	27.772	14.312	8.606	5.973	4.518	3.932	3.346	3.094	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22				
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	74.128	29.248	15.107	9.120	6.209	4.802				
P _{f,0.0012}	55.552	21.927	11.284	6.808	4.584	3.472				
a/b = 2.5	23	24	25	26	42	43				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	64.680	25.480	13.148	7.925	5.278	4.043				
P _{f,0.0012}	48.472	19.104	9.842	5.931	4.021	3.024				
a/b = 3	27	28	29	44	45					
largo	1.500	2.250	3.000	3.750	4.500					
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500					
P _{f,0.008}	59.509	23.420	12.086	7.206	4.795					
P _{f,0.0012}	44.598	17.536	9.055	5.332	3.468					
a/b = 3.5	30	31	32	50						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	56.120	22.088	11.346	6.779						
P _{f,0.0012}	42.063	16.521	8.465	5.077						
a/b = 4	33	34	46							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	53.812	21.163	10.908							
P _{f,0.0012}	40.324	15.856	8.142							
a/b = 4.5	35	36	47							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	52.007	20.429	10.489							
P _{f,0.0012}	38.979	15.297	7.878							
a/b = 5	37	51								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	50.615	19.905								
P _{f,0.0012}	37.942	14.914								
a/b = 5.5	38	52								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	49.420	19.409								
P _{f,0.0012}	37.047	14.526								
a/b = 6	39	53								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	48.291	19.055								
P _{f,0.0012}	36.191	14.249								
a/b = 6.5	40	54								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	47.732	18.391								
P _{f,0.0012}	35.770	13.778								
a/b = 7					41	55				
largo					3.500	5.625				
ancho					0.500	0.750				
P _{f,0.008}					46.984	18.136				
P _{f,0.0012}					35.202	13.557				

Tabla C.11 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 22 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
P _{f,0.008}	193.025	76.745	39.744	23.780	15.614	11.119	8.548	7.058	6.156	5.544
P _{f,0.0012}	144.664	57.550	29.776	17.813	11.694	8.331	6.402	5.287	4.614	4.155
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
P _{f,0.008}	125.177	49.618	25.629	15.373	10.245	7.528	6.054	5.218	4.686	
P _{f,0.0012}	93.762	37.168	19.198	11.525	7.681	5.636	4.534	3.911	3.509	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
P _{f,0.008}	99.139	39.186	20.242	12.144	8.089	5.933	4.748			
P _{f,0.0012}	74.255	29.368	15.155	9.099	6.061	4.443	3.555			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
P _{f,0.008}	86.566	34.135	17.630	10.575	7.022	5.079				
P _{f,0.0012}	64.850	25.572	13.221	7.920	5.262	3.803				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	79.681	31.394	16.206	9.703						
P _{f,0.0012}	59.712	23.516	12.142	7.270						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
P _{f,0.008}	75.134	29.604	15.278	9.138						
P _{f,0.0012}	56.278	22.170	11.440	6.849						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	72.073	28.370	14.635							
P _{f,0.0012}	53.983	21.273	10.964							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
P _{f,0.008}	69.644	27.412	14.137							
P _{f,0.0012}	52.180	20.536	10.589							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	67.818	26.679								
P _{f,0.0012}	50.825	20.006								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	66.230	26.045								
P _{f,0.0012}	49.587	19.511								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
P _{f,0.008}	64.698	25.549								
P _{f,0.0012}	48.478	19.146								
a/b = 6.5	40	53		a/b = 7	41	54				
largo	3.250	5.250		largo	3.500	5.625				
ancho	0.500	0.750		ancho	0.500	0.750				
P _{f,0.008}	63.989	24.693		P _{f,0.008}	62.933	24.319				
P _{f,0.0012}	47.956	18.502		P _{f,0.0012}	47.144	18.223				

Tabla C.12 Predicción de falla (en kPa) de placas de vidrio recocido nuevo simplemente apoyadas en sus cuatro bordes de 25 mm de espesor. Las dimensiones de los paneles están en metros.

a/b = 1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	42
largo	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750
$P_{f,0.008}$	248.112	98.847	51.247	30.702	20.114	14.150	10.568	8.376	7.020	6.141
$P_{f,0.0012}$	185.803	74.023	38.383	23.005	15.076	10.602	7.916	6.276	5.261	4.604
a/b = 1.5	9	10	11	12	13	14	15	16	43	
largo	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250	2.625	3.000	3.375	3.750	
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	
$P_{f,0.008}$	161.089	63.950	33.087	19.821	13.067	9.324	7.163	5.907	5.122	
$P_{f,0.0012}$	120.723	47.927	24.785	14.844	9.787	6.982	5.365	4.427	3.835	
a/b = 2	17	18	19	20	21	22	44			
largo	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000			
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000			
$P_{f,0.008}$	127.700	50.497	26.120	15.642	10.314	7.357	5.645			
$P_{f,0.0012}$	95.702	37.831	19.556	11.716	7.729	5.516	4.230			
a/b = 2.5	23	24	25	26	45	55				
largo	1.250	1.875	2.500	3.125	3.750	4.375				
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750				
$P_{f,0.008}$	111.587	44.040	22.751	13.628	8.970	6.377				
$P_{f,0.0012}$	83.624	32.991	17.045	10.209	6.715	4.779				
a/b = 3	27	28	29	46						
largo	1.500	2.250	3.000	3.750						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	102.722	40.519	20.920	12.522						
$P_{f,0.0012}$	77.044	30.354	15.677	9.379						
a/b = 3.5	30	31	32	47						
largo	1.750	2.625	3.500	4.375						
ancho	0.500	0.750	1.000	1.250						
$P_{f,0.008}$	96.937	38.198	19.717	11.795						
$P_{f,0.0012}$	72.639	28.638	14.766	8.842						
a/b = 4	33	34	48							
largo	2.000	3.000	4.000							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	93.042	36.612	18.892							
$P_{f,0.0012}$	69.675	27.445	14.152							
a/b = 4.5	35	36	49							
largo	2.250	3.375	4.500							
ancho	0.500	0.750	1.000							
$P_{f,0.008}$	89.930	35.373	18.250							
$P_{f,0.0012}$	67.316	26.519	13.676							
a/b = 5	37	50								
largo	2.500	3.750								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	87.525	34.439								
$P_{f,0.0012}$	65.590	25.795								
a/b = 5.5	38	51								
largo	2.750	4.125								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	85.441	33.621								
$P_{f,0.0012}$	64.004	25.207								
a/b = 6	39	52								
largo	3.000	4.500								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	83.527	32.988								
$P_{f,0.0012}$	62.588	24.691								
a/b = 6.5	40	53								
largo	3.250	5.250								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	82.597	31.890								
$P_{f,0.0012}$	61.861	23.873								
a/b = 7	41	54								
largo	3.500	5.625								
ancho	0.500	0.750								
$P_{f,0.008}$	81.246	31.399								
$P_{f,0.0012}$	60.868	23.519								

Información en CD