
Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

En la mayoría de los casos, el análisis forense del origen de la rotura, también conocido como el origen de la fractura, puede proporcionar información útil sobre la fractura del vidrio y, a menudo, la causa raíz de la fractura. Si se obtiene el origen de la rotura, el análisis realizado por expertos a menudo puede proporcionar:

- El modo de falla; como por flexión excesiva, rotura térmica, tensión pura, torsión, desprendimiento de viruta, etc.,
- El nivel de estrés o tensión en el que se produjo la fractura del vidrio y
- La causa de la fractura, por ejemplo, impacto, aplastamiento o excavaciones causadas por el contacto de vidrio a vidrio o vidrio a metal, astillas, daños en los bordes o superficies, o arañazos.

Este documento analiza varios modos de falla y está destinado a proporcionar al usuario un método con el cual se puede determinar un cálculo de los niveles de tensión que causaron la fractura.

El vidrio, como muchos materiales quebradizos, se rompe o falla cuando las tensiones se acercan o exceden la resistencia final del material. Hay dos modos principales de falla del vidrio. Fractura por estrés inducido térmicamente (diferencia de temperatura dentro del vidrio) y fractura debida a las fuerzas de tracción desarrolladas como resultado de flexión o impacto (mecánico).

Una causa común de fractura es el daño al borde del vidrio. El daño en los bordes puede reducir significativamente la resistencia del vidrio en más del 50% y, por lo tanto, su capacidad para resistir cargas tanto térmicas como mecánicas. El vidrio con daños en los bordes existentes podría funcionar durante cualquier período de tiempo hasta que la combinación necesaria de estrés térmico y / o condiciones de carga mecánica se junten y provoquen la fractura.

Trazabilidad de origen

El primer paso en el análisis de roturas es determinar el origen o la ubicación donde se inició la fractura. La ubicación del origen de la fractura a menudo se puede determinar si las piezas de la lámina rota se pueden retener o volver a ensamblar en su orientación previa a la fractura. Las líneas de fractura llamadas "líneas de Wallner" comienzan en el origen y se irradian a lo largo de las ramas de fractura. Cuando se produce una fractura debido a bordes deficientes o dañados, el origen de la fractura estará en el borde del vidrio donde estaba presente el daño. La dirección de la fractura se puede determinar examinando las líneas en la cara de la fractura, como se muestra en los tres ejemplos diferentes de la página siguiente.

Ya sea recocido, semi-templado, totalmente templado térmicamente o reforzado químicamente, independientemente del modo de falla, las fracturas siempre se proyectan en la cara cóncava de estas marcas. Las tres muestras en la Foto 1 se rompieron todas de izquierda a derecha como se muestra.

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés



Dirección de propagación de la fractura

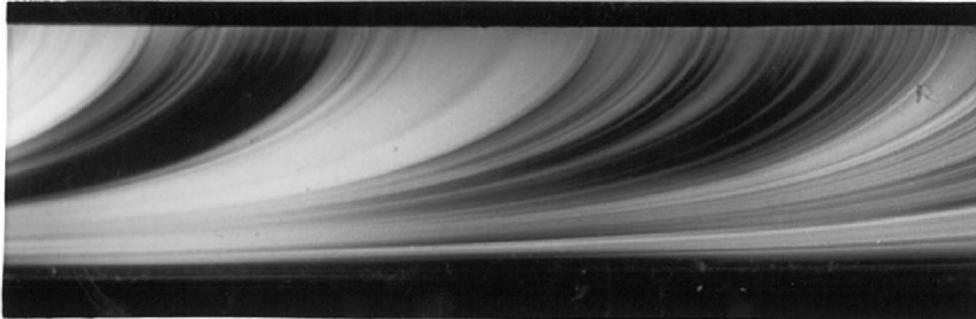


Foto 1A. - Cara de fractura producida por flexión (vista de borde)



Dirección de propagación de la fractura

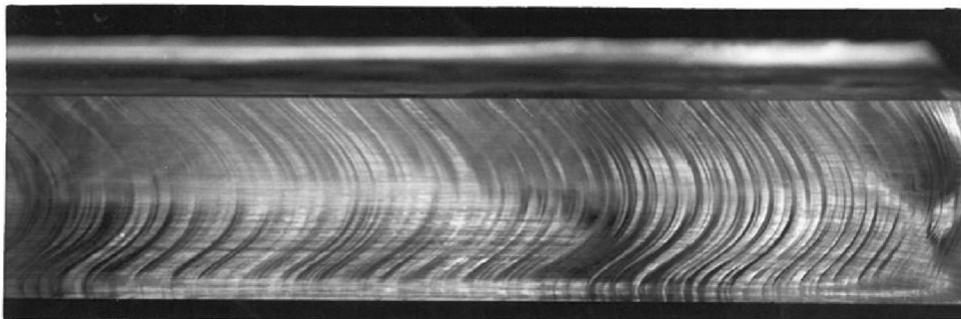


Foto 1B. - Cara de fractura producida por diferencia de temperatura (vista de borde)

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés



Dirección de propagación de la fractura

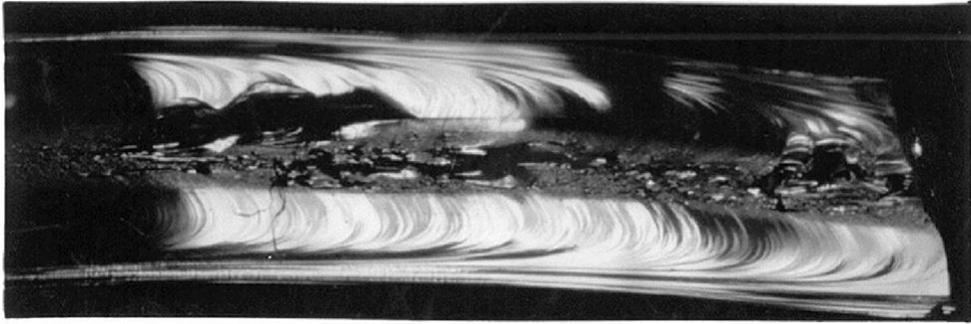


Foto 1C. - Cara de fractura de vidrio templado completo de 7/32" (vista de borde)

Nota: La cara de la fractura de fractura no siempre revela marcas de líneas de fractura tan distintas como las que se muestran en las fotos anteriores, particularmente con fracturas de flexión por tensión de baja tensión por debajo de 1500 psi (10,4 M Pa) que son típicas de daños que se observan con frecuencia debido a rasguños, excavaciones, astillas y aplastar. Sin embargo, las marcas de la línea de fractura suelen ser suficientes en algún lugar a lo largo de la cara de fractura de una sección rota de vidrio para determinar la dirección de propagación de la fractura.

Al examinar la dirección de la línea de fractura en los bordes de las piezas individuales, se puede hacer un diagrama como el ejemplo que se muestra en la Figura 1.

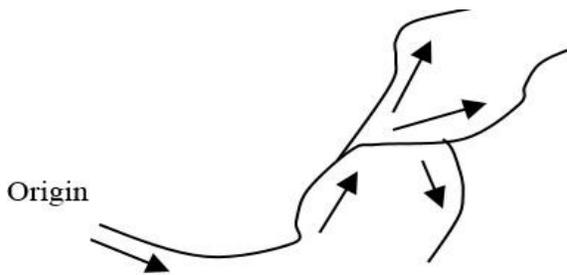


Figura 1 - Dirección de la línea de fractura (vista en planta de superficie)

El origen puede obtenerse mediante:

1. Dibujando flechas para indicar la dirección de la línea de fractura. Estas flechas apuntan a la cara cóncava de las marcas de onda de fractura en el borde.
2. Rastreando flechas de punta a cola hasta el origen de la ruptura.

Una vez que se establece el origen, el modo de falla a menudo se puede determinar haciendo algunas observaciones del vidrio que rodea inmediatamente la fuente de fractura.

Modos de fallo

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

Estrés térmico

Las fracturas por tensión térmica normalmente se originan en el borde del vidrio y forman ángulos de casi 90 ° tanto con el borde como con la superficie del vidrio. Las Figuras 2A y 2B ilustran dos patrones de fractura típicos asociados con el vidrio sometido a tensión térmica. Estos modos térmicos de falla se pueden definir con más detalle en categorías de tensión de alta y baja tensión.

La fractura por bajo estrés térmico se indica mediante una sola línea de fractura que comienza desde el origen en el borde y se propaga ~ 2 pulgadas (5 cm) o más antes de ramificarse en más líneas de fractura. La fractura térmica de baja tensión a menudo ocurre debido a bordes de vidrio dañados.

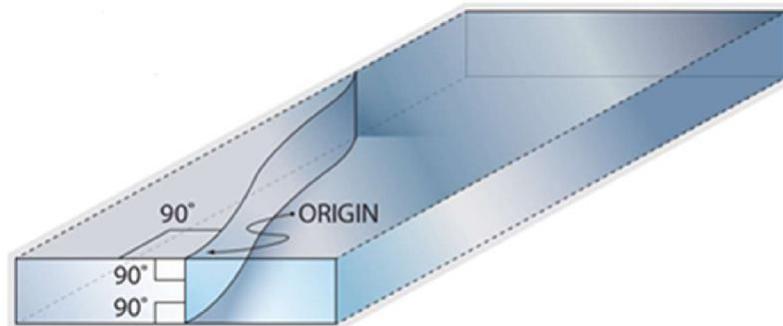


Figura 2A. - Fractura térmica de bajo estrés

La fractura por alta tensión térmica se indica mediante una única fractura en el origen que se ramifica en más fracturas dentro de las 2 pulgadas (5 cm) del borde. Esto indica que las condiciones del entorno y / o las condiciones del acristalamiento están causando un alto estrés térmico (por ejemplo, sombreado exterior extensivo en partes del acristalamiento, rejillas de calefacción ubicadas entre el vidrio y los dispositivos de sombreado interior, cortinas cerradas de color claro ubicadas a 2 pulgadas del vidrio, vidrio en concreto macizo, piedra u otro marco similar, etc.).

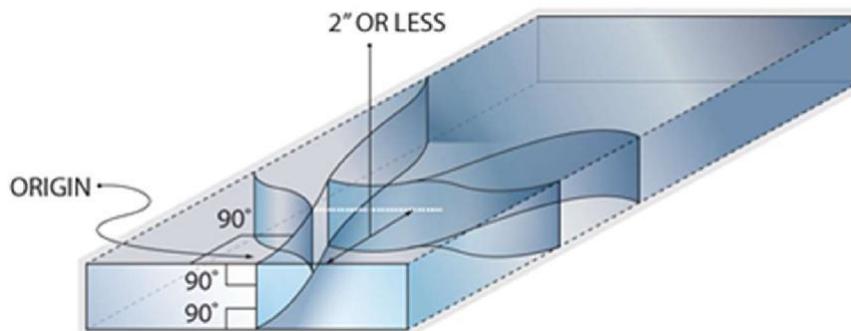


Figura 2B. - Fractura térmica de alto estrés

Nota: En aplicaciones de acristalamiento arquitectónico, el potencial de fractura térmica aumenta con temperaturas más frías y particularmente, pero no necesariamente, cuando se combina con la luz solar.

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

El documento técnico de Vitro, TD-109 Actualización de estrés térmico, analiza el estrés térmico y el análisis de estrés térmico con mucho más detalle. Vitro también proporciona una calculadora de estrés térmico en línea que se puede encontrar en:

<http://technicalresources.vitroglazings.com/thermalstress/>

Estrés mecánico

Otro modo de falla encontrado es el de la tensión mecánica aplicada. Como se indica en la Figura 3, el origen de la fractura no está a 90 ° del borde del vidrio, por lo que se trata de una fractura por tensión por flexión. Además, esta ruptura se propaga más de dos pulgadas como una fractura de una sola línea desde el origen que apunta a una ruptura de baja tensión. Las fracturas mecánicas de baja tensión a menudo se producen al doblarse a menos de 1,500 psi (10,4 Mpa).

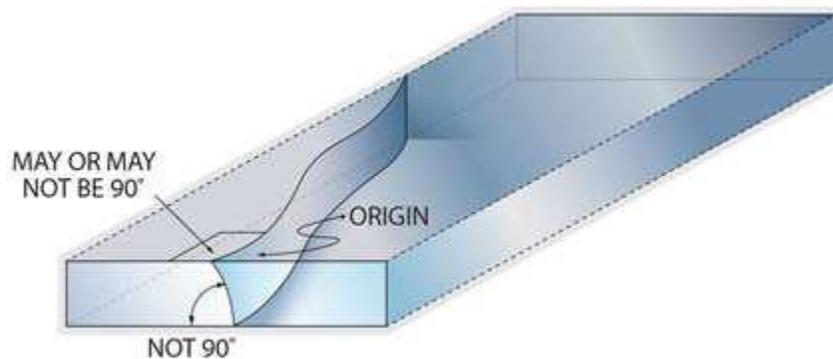


Figura 3A. - Fractura de tensión de bajo estrés

Este es el tipo de fractura más experimentado por los fabricantes de ventanas residenciales y unidades aislantes. El origen se encuentra en áreas dañadas del borde o superficies cercanas al borde, como aplastamiento, excavaciones, rayones o astillas. En muchos casos, la fractura del vidrio dañado ocurre después de que ocurrió el daño inicial del borde, como en los *stacks* de unidades aislantes, operaciones de guillotina o más tarde, después de que se haya instalado la ventana. El examen del origen puede revelar arañazos, excavaciones, aplastamientos, astillas o bordes débiles debido a un corte deficiente demostrado por dientes de tiburón profundos o imperfecciones en el borde. Consulte el Documento técnico de Vitro 119 - Calidad de los bordes cortados para obtener más información.

Por último, las fracturas mecánicas de alta tensión suelen ser las más fáciles de identificar, ya que las fracturas múltiples emanan del punto de impacto en forma de telaraña. El patrón de fractura, que se muestra en la Figura 3B, es una señal reveladora de que el borde o la superficie del vidrio ha sido golpeado con un objeto extraño con un alto nivel de fuerza.

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

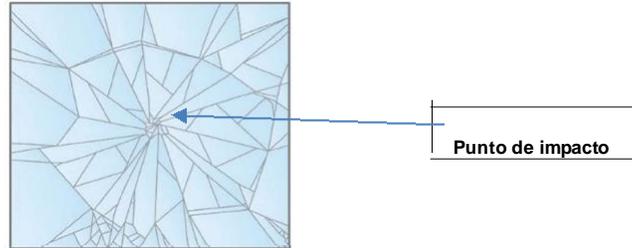


Figura 3B. - Fractura de tensión mecánica de alta tensión

Cálculo de la tensión utilizando características de velocidad de propagación de grietas

Nota: Usando una potente fuente de luz puntual con una lupa de 7 a 10 aumentos (por ejemplo, la lupa de medición Bausch & Lomb, número de catálogo 81-34-35) será necesaria para las siguientes técnicas de análisis definitivo del origen de la fractura.

Una grieta se propaga a través del vidrio con una velocidad creciente a medida que se aleja del origen. La foto de abajo define tres apariencias que se encuentran comúnmente.

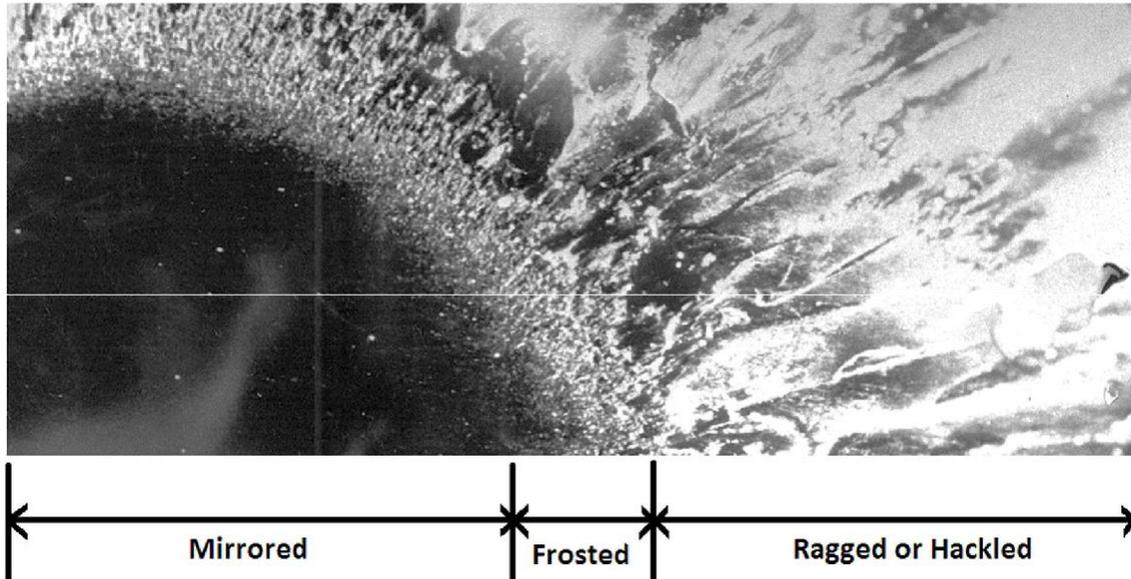


Foto 2. - Cara de fractura (vista de borde)

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

Cerca del punto de origen, la cara de la fractura es lisa y similar a un espejo (velocidad de la fisura baja), pero a medida que aumenta la velocidad de propagación con un mayor esfuerzo de tensión, la apariencia de la cara de la fractura se congela (en una banda) y luego se rasga o corta. Las ramas se desarrollan en el área irregular y la secuencia comienza de nuevo. El radio del espejo del origen de la fractura se define como el radio de la parte lisa de la cara de la fractura medido a 90 ° desde la dirección de la tensión de tensión aplicada.

El análisis del radio del espejo del origen de la fractura puede proporcionar un cálculo del nivel de tensión que provocó la fractura, además de las posibles causas de la fractura. Los radios de espejo (R), se presentan en una variedad de formas como se ve en las Figuras 4A y 4B.

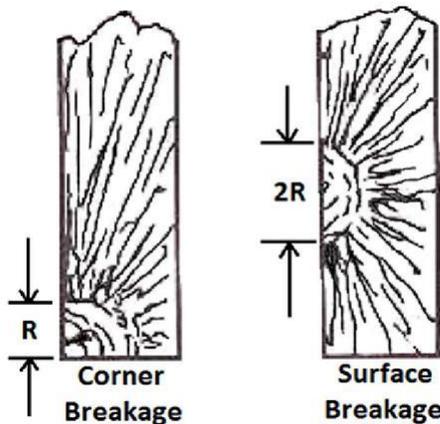


Figura 4A. - Radios de espejo de alta tensión

Los dos bocetos de la Figura 4A muestran los orígenes de la fractura por tensiones de alta tensión, por ejemplo, fracturas por tensión térmica o por flexión. Cuando las fracturas por tensión alta se originan en una superficie, el área lisa incluye un cuadrante doble (segundo boceto desde la izquierda). El radio del espejo es la mitad de la cara de fractura lisa que se muestra como 2R en el dibujo.

Los dos bocetos de la Figura 4B ilustran los orígenes de las fracturas provocadas por la flexión. Tenga en cuenta que la apariencia de la cara de la fractura puede ser completamente diferente, porque en la flexión, la tensión varía a lo largo del espesor del vidrio acercándose a cero en el eje neutro. Para tensiones elevadas que provocan fracturas, el radio del espejo de la zona lisa es pequeño.

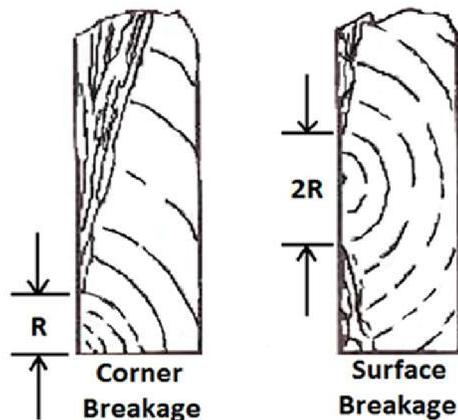


Figura 4B. - Radios de espejo de baja tensión

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

Para vidrio más delgado o cuando la tensión de fractura es baja, el área lisa del radio del espejo se extiende profundamente en una zona de tracción más baja. El área lisa es radial y el radio del espejo es mayor. Los dos bocetos de la Figura 4B representan los orígenes de fractura del vidrio delgado que se rompe con tensiones de flexión bajas. Se forma una cara de fractura suave en todo el lado del origen de la fractura. Para la fractura del borde, se forma una sola cuña esmerilada, para la fractura de la superficie; es evidente una cuña doble esmerilada.

Nota: El radio del espejo es independiente del espesor del vidrio.

Se ha establecido una relación entre el radio de la superficie del espejo del origen y la tensión de tracción que provocó la fractura. Esta relación se conoce en la industria como Ecuación de Vitro / Orr. Para el vidrio flotado procesado de Vitro, la relación entre la tensión de fractura y el radio del espejo también se puede expresar utilizando la siguiente ecuación o gráfico donde R, como se muestra en las figuras anteriores, se mide en pulgadas:

$$= \frac{1950}{\sqrt{R}}$$

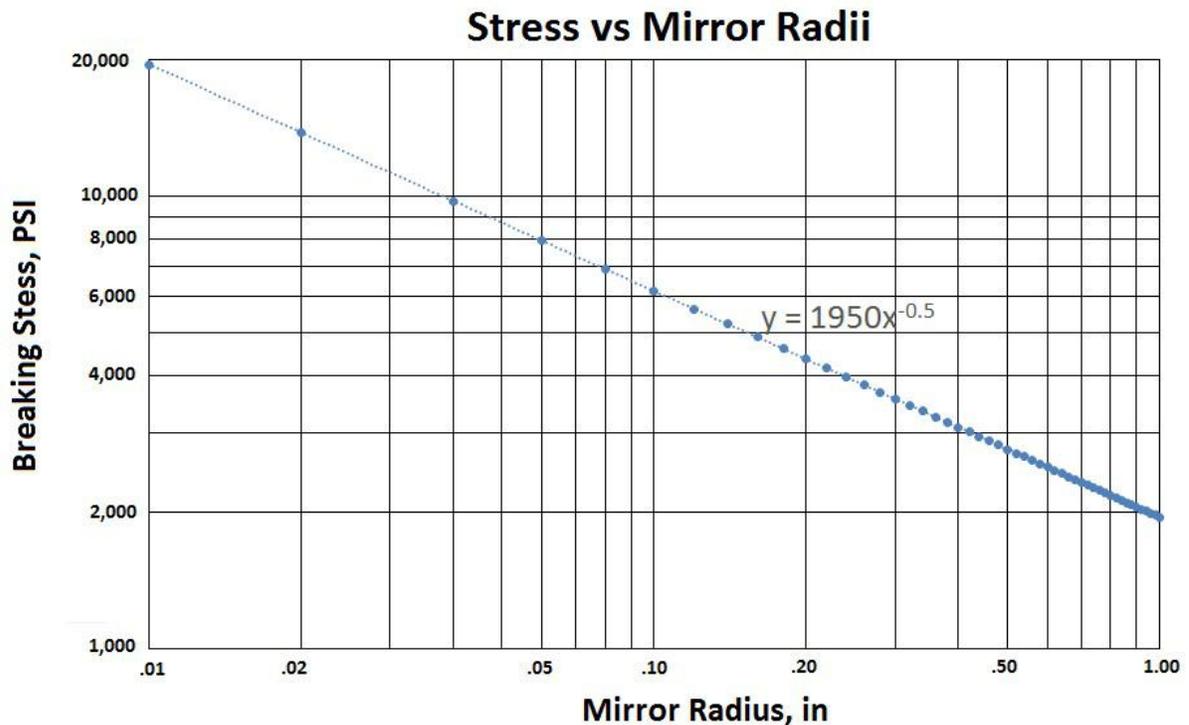


Figura 5. - Relación estrés-radio

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

La fotografía 4 muestra un ejemplo del origen de la fractura y el radio del espejo del origen de la fractura en la esquina de un vidrio de 1/4 de pulgada (6 mm) de espesor.

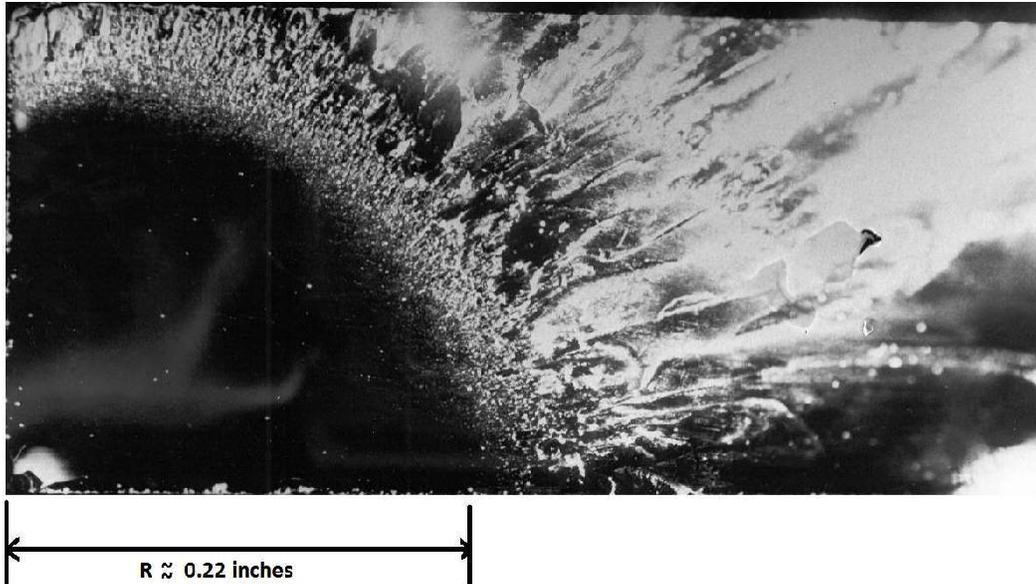


Foto 4. - Radio de espejo (vista de borde)

$$\sigma_{stress} = 1950 / \sqrt{R} = 1950 / \sqrt{0.22} = 4,157 \approx 4,200 \text{ PSI}$$

Usando la metodología descrita anteriormente, esta ruptura parece haber ocurrido con un esfuerzo de ruptura alto de aproximadamente 4200 psi (29 MPa). Este es un ejemplo de fractura por tensión, posiblemente con alta carga térmica. El nivel de tensión de fractura de 4200 psi también indica que los bordes del vidrio tenían una calidad de borde de corte relativamente buena y que no había daños en los bordes. Consulte el Documento técnico de Vitro 119: Directrices para la calidad del borde cortado para obtener más información.

El análisis del origen de la fractura es una metodología definitiva para eliminar el "misterio" de la fractura del vidrio. Gran parte de la información presentada aquí se relaciona con características distintivas asociadas con tensiones de fractura superiores a 1,500 psi (10,4 MPa). Con tensiones de fractura elevadas, las marcas de la cara de la fractura, la dirección de la fractura, la ubicación del origen y el análisis del radio del espejo son más evidentes y proporcionan información precisa y detallada sobre la causa de la fractura. Por el contrario, las marcas de la cara de la fractura menos definitivas o evidentes, la dirección de la fractura, la ubicación del origen y el radio del espejo sugieren un esfuerzo de ruptura bajo que normalmente es el resultado de un daño preexistente del vidrio.

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

Impacto de la tensión térmica del esmalte cerámico cocido y la frita de plata

Pueden inducirse tensiones adicionales cuando un sustrato se recubre con una frita o esmalte cerámico cocido. Este estrés puede deberse a un desajuste del coeficiente de expansión térmica (CTE) entre el vidrio y la frita o comportamientos viscoelásticos incompatibles. La frita se expande o contrae más rápido que el sustrato de vidrio cuando se calienta o se enfría, lo que genera tensiones que pueden empujar más allá de sus puntos de ruptura. Esta tensión de tensión puede reducir la resistencia básica del vidrio hasta en un 40% para la frita de esmalte y un 70% para la frita de plata. Se debe tener cuidado de igualar estrechamente el CTE (según lo determinado por ASTM E831) de la frita con el del sustrato de vidrio. Se puede encontrar una aproximación del estrés inducido utilizando la siguiente metodología:

La tensión residual inducida entre dos capas en un sistema se puede modelar como:

Donde,

$$\sigma_A = \frac{1}{\delta_A} \left(\frac{1 - \nu_A}{\delta_A E_A} + \frac{1 - \nu_B}{\delta_B E_B} \right)^{-1} \cdot \int_{T_0}^{T_1} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) \delta T$$

$$\begin{array}{ll} \sigma = \text{Stress on the frit} & E = \text{Young's modulus} \\ \nu = \text{Poisson's ratio} & \alpha = \text{CTE} & T = \text{Ambient Temperature} \end{array}$$

(Los subíndices A y B se refieren a la frita y al sustrato respectivamente)

Suponiendo que el sustrato es mucho más grueso que la frita y los CTE son lineales, esta ecuación se simplifica a:

Para vidrio flotado
Vitro,

$$\alpha_B = 8.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} \text{ (} 4.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

La introducción de las propiedades del material dadas por el fabricante de la frita en esta ecuación proporcionará un cálculo razonable de la tensión en la frita. La magnitud de la tensión en el vidrio será la misma, pero en la dirección opuesta. Hay dos métodos o experimentos adicionales que pueden determinar la compatibilidad de la frita con el sustrato de vidrio. Medir la tensión en el vidrio en la interfaz frita / vidrio y realizar pruebas de anillo concéntrico con el esmalte y compararlo con la resistencia básica del vidrio. La foto 8 es un ejemplo de una fractura térmica de alta tensión que se origina en la interfaz vidrio / frita.

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés



Foto 8. - Fractura térmica en Frita

Otras fuentes de fractura e información adicional están disponibles a través del departamento de Servicio Técnico de Vitro.

REFERENCIAS:

1. Informe de servicio técnico de Vitro # 130 - Recomendaciones de instalación Vidrios de Color y Reflectivos.
2. Leighton Orr - Análisis práctico de fracturas en ventanas de vidrio - Investigación de materiales y estándares, Volumen 12, No. 1, Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales.
3. Actualización de tensión térmica de Vitro, 1998.
4. Póster Vitro: directrices para la calidad de los bordes cortados

Lectura adicional sugerida para la práctica de la ingeniería de científicos e ingenieros:

1. Fractografía de cerámica y vidrios, George D. Quinn, Guía de prácticas recomendadas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, SP 960-16, 2007

Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés

TABLA HISTÓRICA		
ARTICULO	FECHA	DESCRIPCIÓN
Publicación original	Diciembre de 1995	
Revisión # 1	15/1/2002	Revisado & transferido a TD-110
Revisión # 2	9/9/2014	Encabezado actualizado en la pág. 2
Revisión # 3	7/9/2016	Fotografías y figuras mejoradas; agregado CTE discusión y varias otras actualizaciones de texto.
Revisión # 4	04/10/2019	Actualizado al formato y logotipo de Vitro
Revisión # 5	24/01/2019	Actualizado el logotipo y formato de Vitro.
Revisión # 6	7/5/2019	Actualice a la descripción de algunas fotos y cifras.
Revisión # 7	17/12/20	Se eliminó la referencia a TD-111.

Este documento tiene como objetivo informar y ayudar al lector en la aplicación, uso y mantenimiento de los productos Vitro Vidrio Arquitectónico. El rendimiento y los resultados reales pueden variar según las circunstancias. Vitro no ofrece garantía alguna en cuanto a los resultados que se obtengan del uso de la totalidad o parte de la información aquí proporcionada, y por la presente se exime de cualquier responsabilidad por lesiones personales, daños a la propiedad, insuficiencia del producto o cualquier otro daño de cualquier tipo o naturaleza que surge del uso por parte del lector de la información contenida en este documento.