

Anales de Mecánica de la Fractura

TEXTO DE LAS COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL

**XXXI ENCUENTRO DEL
GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA**

Número 31

San Lorenzo del Escorial

2, 3 y 4 de abril de 2014



Anales de Mecánica de la Fractura

Texto de las comunicaciones presentadas en el

XXXI ENCUENTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA

2, 3 y 4 de abril de 2014
San Lorenzo del Escorial, Madrid

©ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA
Editado por la Secretaría del Grupo Español de Fractura

“Reservados todos los derechos para todos los países. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea electrónico o de cualquier otro, sin previa autorización escrita por parte de la Editorial”

Depósito legal: B-9110-2014

I.S.S.N: 0213-3725

Coordinación Editorial: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Barcelona

Impresión: Artes Gráficas Torres. Huelva, 9 – 08940 Cornellá de Llobregat, Barcelona

Fecha impresión: Abril 2014

INFLUENCIA DE UN RECUBRIMIENTO DE VINILO EN LA TENSIÓN DE FRACTURA DEL VIDRIO EN ENSAYOS DE ANILLOS CONCÉNTRICOS CON GRAN SUPERFICIE

C. Huerta¹, A. Pacios¹, S.Saboya¹, J. Alonso¹, F. Capel²

¹ETSI Industriales, UPM, c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid, España

E-mail: mariaconsuelo.huerta@upm.es

²Instituto de Cerámica Vidrio, CSIC, c/ Kelsen, 5, Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid, España

RESUMEN

El comportamiento post-rotura de los vidrios laminados es uno de los temas que están siendo investigados para explicar la capacidad de carga remanente tras la rotura de la primera lámina. En investigaciones previas se ha observado que en el caso de impacto humano en vidrios recocidos se llega a una capacidad hasta 3 veces superior, sin explicación clara del comportamiento estructural del conjunto. Para realizar un acercamiento a la resistencia a la rotura del vidrio laminado se ha planificado una campaña de ensayos de rotura con anillos concéntricos de grandes superficies en vidrio recocido, termoendurecido y templado, con dos series adicionales de vidrio recocido y termoendurecido con una capa de butiral adherida justo después del proceso de fabricación. Para realizar la comparación de las distribuciones de Weibull de las distintas tensiones de rotura se utiliza un proceso iterativo basado en la distribución real de tensiones obtenida con un modelo de elementos finitos ajustado con datos experimentales. Las comparaciones finales muestran un aumento apreciable de la resistencia (45%) en el caso de vidrios recocidos, y menor en el de los termoendurecidos (25%).

ABSTRACT

The post-fracture behavior of the laminated glasses is one of the research topics that are being studied to explain the load capacity after the break of the first sheet. Previous experimental work have shown, that in case of human impact in annealed glasses, the capacity of bearing load it can be up to 3 times higher without clear explanation of the structural behavior of the plate. To make an approximation to the post-fracture resistance, a experimental program to test annealed, heat-tempered and toughened glass plates has been prepared. Two additional series of annealed and heat-tempered, with a layer of polyvinyl butyral adhered just after the manufacturing process, have also been incorporated. Coaxial Double Ring with large test surface areas Coaxial Double Ring with large test surface areas is the standard that has been followed. To make the comparison of Weibull's distributions of the different fracture stress, an iterative process based on the actual stress distribution obtained with a finite elements model updated with experimental results has been used. Final comparisons show a great stress improvement for the annealed glass plates (45 %), and a minor increment for the heat-tempered (25 %).

PALABRAS CLAVE: Tensión fractura vidrio, vidrio laminado, anillos concéntricos, postrotura.

1. INTRODUCCIÓN

Además de las condiciones normales de los vidrios sanos, que son los que se consideran en diseño, es importante conocer el comportamiento post-rotura en términos de resistencia residual, rigidez o capacidad de carga para poder garantizar un nivel de seguridad. Tanto para elementos de placa como para vigas el intercalarlo de vinilo juega un papel relevante en el comportamiento mecánico [1].

Los resultados obtenidos en una campaña de ensayos de impacto humano en vidrios laminados recocidos,

realizada según la norma UNE-EN 12600 han mostrado una resistencia adicional importante en la rotura de la segunda lámina [2]. Por ejemplo, la cara de tracción de un vidrio laminado de 5+5 mm rompe a una altura del péndulo de 250 mm, mientras que la rotura completa se alcanza a 1200 mm. En el caso de 3+3 mm y 4+4 mm la rotura completa se produce con el triple de altura a la que se rompe la primera lámina.

Con el fin de analizar dicho fenómeno, se han realizado una serie de ensayos de rotura con dobles anillos concéntricos con gran superficie de sollicitación en las instalaciones del ICV del CSIC, incorporando dos series

adicionales de probetas de vidrio monolítico de 300 x 300 mm y 5 mm de espesor. Como primera aproximación se ha cubierto una de las caras de la placa con un film de butiral de polivinilo (PVB) evitando el contacto con el ambiente pocos días después de la obtención de la plancha base tanto en probetas recocidas con termo endurecidas. Este ensayo, junto con los ensayos de viga y anillos concéntricos con pequeña superficie de sollicitación son los que se utilizan para la determinación de la tensión de rotura del material [3, 4].

En el artículo se presentan los resultados comparativos de las tensiones de rotura propuestas por la norma y las probabilidades de fallo asociadas así como el modelo de elementos finitos (MEF) utilizado para el ajuste de las características del material. Dicho modelo ha sido fuertemente contrastado con los resultados de una placa de aluminio, que tiene igual módulo de elasticidad que el vidrio, instrumentada con captadores de desplazamientos y bandas extensométricas. A dicha placa se le ha aplicado la misma carga que a las de vidrio con control de presiones de acuerdo a la norma (UNE-EN 1288-2) que define una presión adimensional dependiente de la rigidez de la placa y del nivel de carga del anillo [5]. La norma establece que para realizar ensayos con anillos concéntricos dobles con grandes superficies de sollicitación y conseguir un estado tensional prácticamente constante en la zona interior al anillo de carga, es necesario la aplicación de una presión que la uniformice, especialmente en los casos más flexibles en los que aparece comportamiento no lineal importante.

Para minimizar las diferencias en el tratamiento de los resultados se utiliza un procedimiento iterativo en la obtención de los parámetros de la función de distribución acumulada de la tensión de rotura [6]. Se ajustan los resultados directos de los ensayos (carga-presión-probabilidad de rotura) a través de un MEF que permite una estimación de las áreas efectivas reales de cada espécimen. Los parámetros finales para la tensión de rotura mejoran la estimación de la probabilidad de la carga de rotura de cada probeta respecto a los obtenidos con los definidos con la tensión de la norma [6, 7, 8].

2. CAMPAÑA DE ENSAYOS

Para profundizar en el estudio de la rotura del vidrio laminado se ha comenzado con la posible influencia de la lámina de PVB, utilizándose los resultados de la campaña experimental realizada entre el Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC y la ETSII de la UPM [6, 9]. Se han ensayado 5 series de placas de 300 mm x 300 mm x 5 mm del mismo vidrio con anillos concéntricos y grandes superficies de sollicitación, siguiendo la norma EN 1288-2 [5]. Se ha utilizado series de probetas de vidrio recocido (CL-A, 28 probetas), recocido con el film (CL-AF, 26 probetas), termoendurecido (CL-H, 27 probetas), termoendurecido

con film (CL-HF, 30 probetas) y templado CL-T, (27 probetas). Se ha utilizado un radio interior para aplicación de la carga de 90 mm y un radio para el apoyo exterior de 120 mm. El área de referencia nominal (A_{ref}) para las tensiones que se obtengan es de 25447 mm².

En la figura 1 se muestra el dispositivo utilizado con una placa rota con la capa de PVB en la cara de tracción.



Figura 1. Ensayo en probeta recocida con PVB (CL-AF-11; Rotura 12,5 kN).

Tal como se ha comentado, la realización de los ensayos presenta una dificultad especial ya que, como consecuencia de los grandes desplazamientos que aparecen, es necesario incorporar una presión de homogeneización de las tensiones que viene definida en la norma en términos adimensionales (ecuaciones 1, 2 y 3) siendo necesario ajustar en dos tramos los puntos adimensionales de referencia establecidos en la norma. Se ha incorporado al ensayo un control automático de la presión de homogeneización de la cámara que se adapta a los dos tramos de funcionamiento que, para las dimensiones utilizadas, se corresponden con una fuerza máxima de 15 kN el primero y 50 kN el segundo.

$$F = F^* \frac{E h^4}{r_{3m}^2 (1 - \nu^2)} \tag{1}$$

$$p = p^* (F^*) \frac{E h^4}{r_{3m}^4 (1 - \nu^2)} \tag{2}$$

$$\sigma = \sigma^* (F^*) \frac{E h^4}{r_{3m}^4 (1 - \nu^2)} \tag{3}$$

Para comprobar el conjunto, (montaje del ensayo, el control de presiones y la adecuación de las expresiones propuesta por la norma) se ha realizado un ensayo de caracterización con una placa de aluminio que tiene similares características elásticas que el vidrio (E), siendo la mayor diferencia el coeficiente de Poisson (μ).

La comprobación de la adecuación de los ensayos a la norma se realiza contrastando los resultados medidos y los obtenidos con el modelo de elementos finitos de ¼

de la placa de aluminio, análogo al presentado en [10, 11], al que se le incorpora el ancho (8 mm) y la rigidez (5 kN/mm) de las juntas de los anillos de carga. En la figura 2 se muestra, para carga creciente, la tensión radial en el centro de la placa registrada en los ensayos y la calculada con la expresión de la norma. Además se incluyen, en líneas de puntos, la tensión radial obtenida con el MEF en el centro de la placa y en líneas discontinuas la tensión radial obtenida en el anillo de carga.

En la figura 3 se muestran las microdeformaciones radiales y tangenciales en el centro y en el anillo de carga medidas y obtenidas con el MEF (línea discontinua). Además, en el eje secundario se recoge, el desplazamiento de la esquina de placa obtenido con el MEF (línea discontinua) y el medido con un LVDT.

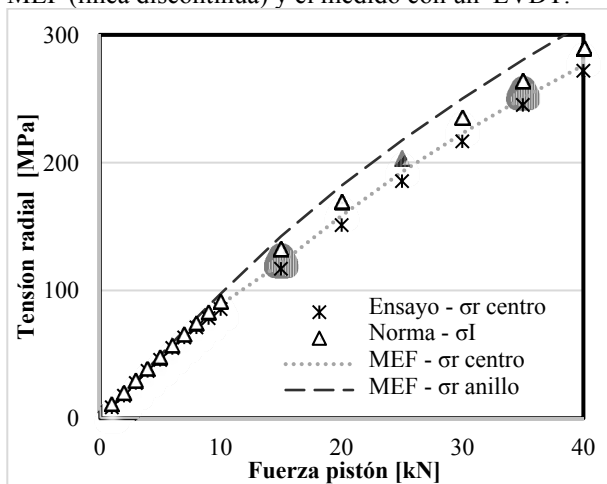


Figura 2. Tensión radial en la placa de aluminio: valores de ensayo, norma y MEF.

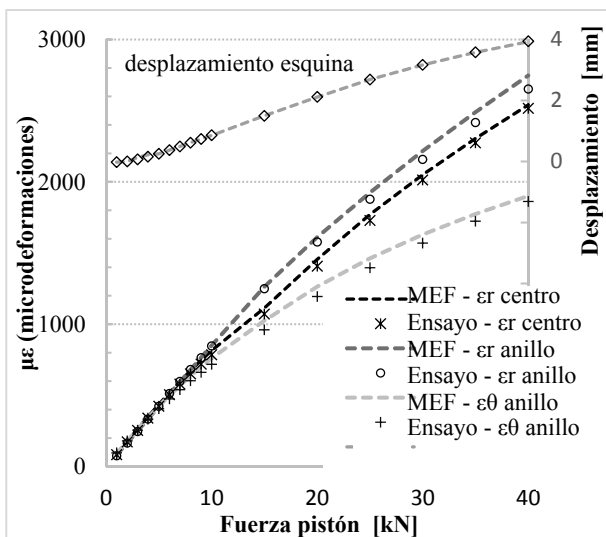


Figura 3. Microdeformaciones y desplazamiento de la esquina de la placa de aluminio: ensayo y modelos.

Las figuras 2 y 3 muestran la adecuación del ensayo a la norma y a los valores calculados con el modelo que se podrá utilizar para conocer la distribución de tensiones en toda la placa.

Con el procedimiento de ensayos puesto a punto se rompieron alrededor de 110 probetas. Como muestra se presentan, en la figura 4, dos probetas con carga de rotura de 15 kN aproximadamente correspondientes a vidrio recocido (CL-A-21) y con film (CL-AF-23). No se detectan grandes diferencias en la morfología de la rotura, hecho extrapolable a más de 15 probetas fotografiadas en cada caso, por lo que no parece que el comportamiento ante la rotura se modifique por la presencia del vinilo.

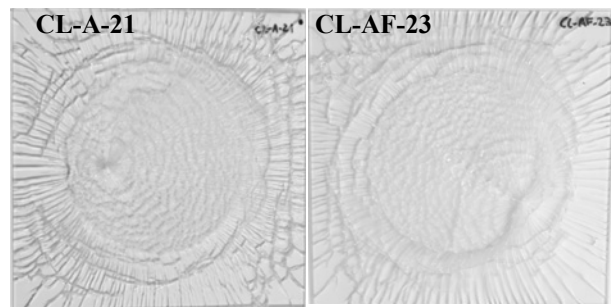


Figura 4. Probetas de vidrio recocido tras la rotura.

3. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ROTURA

3.1. Determinación según norma

Como punto de partida se presentan en la figura 5 la función de distribución (fdd) de la probabilidad de fallo de la tensión de rotura obtenida con el procedimiento establecido en la norma en el que se estima la probabilidad de fallo de la probeta *i* con la expresión (4).

$$P_f(i) = \left[\frac{(i-0,3)}{(N+0,4)} \right] \quad (4)$$

Donde N es el total de probetas ensayadas.

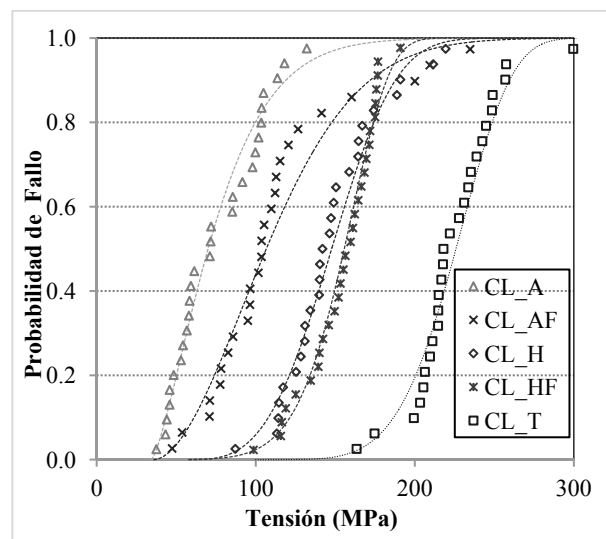


Figura 5. Función de distribución de la tensión de rotura obtenida directamente de la norma.

En la tabla 1 se recogen los parámetros de la distribución de Weibull ajustada en cada caso para un área de referencia correspondiente al radio nominal de aplicación de la carga (25455 mm²) [12].

Se observan tensiones más altas y con mayor dispersión en los casos con PVB, tanto en los vidrios recocidos como termoendurecidos.

Los datos obtenidos en la probetas termoendurecidas (CL-HF) presentan, en el diagrama logarítmico, una curvatura de signo contrario al resto de los casos (ver figura 8). Este es el motivo por el que el valor del parámetro de localización (λ) es nulo y el factor de forma (β) es mayor que en el resto de los vidrios.

Tabla 1. Tensiones de la norma: distribución de Weibull para un área de referencia correspondiente al radio nominal de aplicación de la carga (25455 mm²)

| | λ [MPa] | δ [MPa] | β | R^2 |
|-------|-----------------|----------------|---------|-------|
| CL-A | 34,32 | 46,50 | 1,39 | 0,98 |
| CL-AF | 35,88 | 86,40 | 1,84 | 0,96 |
| CL-H | 55,89 | 102,60 | 3,32 | 0,96 |
| CL-HF | 0,00 | 163,35 | 7,60 | 0,98 |
| CL-T | 98,52 | 136,82 | 5,12 | 0,94 |

En este punto, se puede decir que la capa de PVB mejora las tensiones de rotura, especialmente en el caso de vidrios recocido. Al corresponder los resultados al mismo tipo de ensayos y probetas de iguales dimensiones, este primer análisis es una buena indicación de los resultados finales. En cualquier caso, se procede a incorporar el efecto del área de referencia aparente en cada probeta consecuencia de la distribución real de las tensiones para cada carga.

3.2. Incorporación del modelo MEF para el cálculo

Para poder hacer una comparación más congruente entre las tensiones anteriores se sigue el procedimiento básico propuesto por Przybilla et al. [8] y ampliado por Huerta et al. [10, 11], utilizando la expresión 5 para extrapolar la probabilidad de fallo a distintas áreas por ejemplo la de un elemento del modelo (ΔA). Además se considera que la probabilidad de fallo de cada probeta ensayada es única, independientemente de que su valor sea conocido. Para unificar las áreas de referencia entre ellas se varía el valor de la tensión de rotura (σ_{Ai}^r) estimada por la norma modificándola en función del área aparente en cada caso con la expresión 6 acorde a lo que realizan otros autores [3].

$$P_{f,\Delta A}(\sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{\Delta A}{A_{ref}} \left(\frac{\sigma - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{Ai}^r = \lambda + (\sigma_{Aref}^r - \lambda) \left(\frac{A_{ref}}{A_i} \right)^{1/\beta} \quad (6)$$

El paso siguiente consiste en tomar como medida de comparación la probabilidad de fallo de los especímenes

obtenidos en el ensayo, es decir la función de distribución de la carga de rotura. Utilizando los parámetros de distribución de Weibull para las tensiones de rotura y el modelo de elementos finitos contrastado con la placa de aluminio, se estima la probabilidad de fallo de cada probeta. Para ello se aplican las ecuaciones (5) y (6), calculando el producto de la probabilidad de supervivencia de los elementos en los que se divide el modelo obteniéndose la probabilidad de fallo como la diferencia con 1.

$$P_{s,k} = [P_{s,Aref}]^n = \left[1 - P_{f,Aref}(\sigma) \right]^{\Delta A_k / A_{ref}} \quad (7)$$

$$P_{f,i} = 1 - \prod_k P_{s,k} \quad (8)$$

En la figura 6 se observan los contornos de probabilidad de supervivencia en el modelo de elementos finitos (1/4 de placa) para dos probetas de vidrio recocido con cargas de rotura muy similar, la diferencia es que la cubierta con capa de vinilo (CL-AF-23) tiene una probabilidad de supervivencia de 0,35, mientras que sin vinilo (CL-A-21) baja hasta 0,05. Puesto que la distribución de tensiones es prácticamente la misma, la diferencia estriba en la fdd de la tensión de rotura.

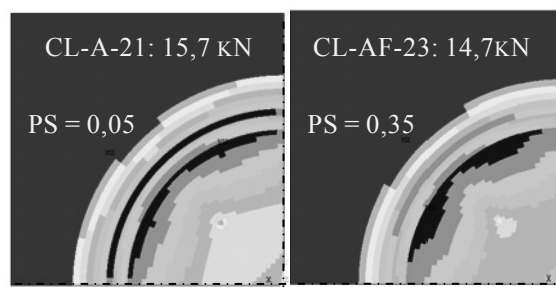


Figura 6. Contorno de probabilidad de supervivencia para probetas de vidrio recocido, con y sin vinilo, con cargas de rotura similar.

4. PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA FDD

El procedimiento que se propone es análogo al presentado por Huerta et al. [11], pero en este caso se parte de un ajuste de la fdd de la carga de rotura a una distribución de Weibull utilizando la técnica de ajuste de máxima verosimilitud para asignar la probabilidad de fallo a cada probeta. El objetivo es encontrar una fdd de tensiones que, a través del modelo, proporcione una probabilidad de fallo para la probeta similar a la de ensayo.

Para ello en cada iteración se estima el área eficaz de cada probeta que mejora el ajuste, y se modifica la tensión asignada a dicha probeta con la ecuación 6 para realizar un nuevo ajuste de la fdd de tensiones, que se realiza también con la técnica de ajuste de máxima verosimilitud. Analizando las diferencias en los contornos de probabilidad de supervivencia para distintas cargas de rotura se puede entender que el área eficaz de cada probeta puede ser diferente.

Iteraciones sucesivas permiten ajustar una fdd de la tensión de rotura que produce una probabilidad de la carga de rotura muy similar a la estimada para los ensayos. En la figura 7 se recoge la probabilidad de fallo de la carga de rotura estimada con los datos de ensayo y la obtenida con el MEF y los valores de dos distribuciones de Weibull para la tensión de rotura: la correspondiente a la estimación de la norma (tabla 1) y la correspondiente a la iteración final del método propuesta (tabla 2). Se puede observar que estas últimas (en línea de puntos) presentan una mejor aproximación.

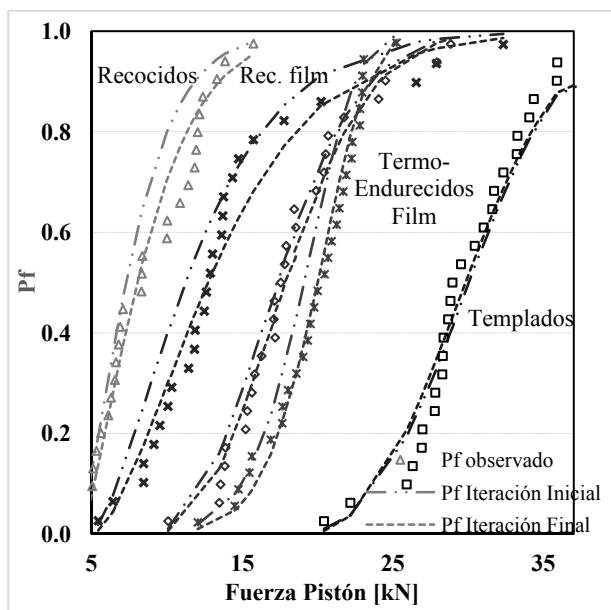


Figura 7. Probabilidad de fallo de la carga de rotura: experimental, modelos inicial y final ajustado.

La base del método es la estimación del área efectiva de cada probeta. En la Tabla 3 se refleja el valor promedio para todas las series, que es muy parecido al área de referencia en todas las series, mientras que la desviación típica es mayor en el caso de probetas con film de vinilo ya que en el proceso de colocación del film pueden existir diferencias que crean una dispersión en los datos medidos.

Tabla 2. Áreas efectivas ajustadas para las probetas: valores medios y desviación típica.

| | CL_A | CL_AF | CL_H | CL_HF | CL_T |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_m(\text{mm}^2)$ | 25374 | 25408 | 25387 | 25291 | 25398 |
| Des. | 2,3% | 5,0% | 2,4% | 3,9% | 2,5% |

Extrapolando la tensión de rotura en cada probeta de acuerdo al área ajustada se obtiene la fdd de la tensión de rotura final. Los parámetros de Weibull para el área de 25455 mm² son los presentados en la tabla 4.

Finalmente en la figura 8 se representan las fdd de tensiones de rotura en la primera y última iteración para los 5 grupos de probetas así como las estimadas por la norma. Se puede observar que el film de PVB mejora la resistencia de forma apreciable en el vidrio recocido mientras que en el termo endurecido la diferencia es menor e incluso para valores altos de la tensión se cambia la tendencia.

Tabla 3. Distribución de Weibull final para las tensiones de rotura.

| Probetas | λ [MPa] | δ [MPa] | β |
|----------|-----------------|----------------|---------|
| CL-A | 39,08 | 48,56 | 1,35 |
| CL-AF | 45,77 | 87,51 | 1,64 |
| CL-H | 78,33 | 82,03 | 2,57 |
| CL-HF | 0,00 | 168,33 | 9,65 |
| CL-T | 152,81 | 78,90 | 2,82 |

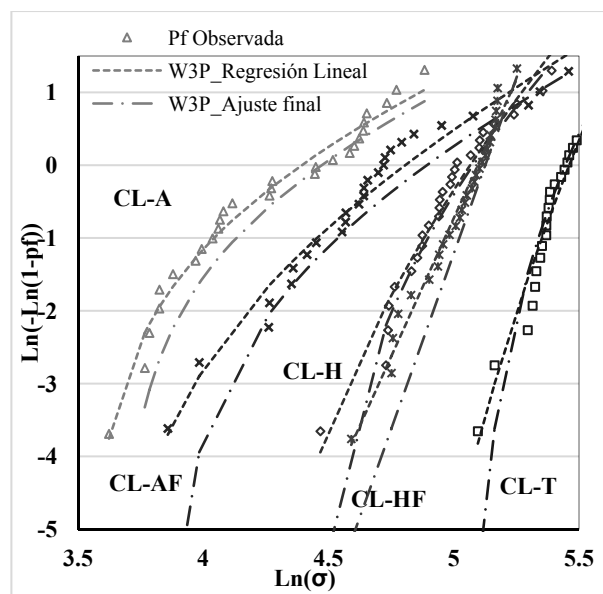


Figura 8. Funciones de distribución de las tensiones de rotura: experimental, ajuste inicial del Weibull y ajuste fina con el método propuesto.

Para concretar las diferencias se reflejan en la tabla 4 los valores de tensiones, para un 5% de probabilidad de fallo y un 95% de intervalo de confianza, obtenidos con un ajuste de Weibull de 2 parámetros con la distribución inicial (tabla 1) y la final (tabla 3) [12]. Se puede observar que en las probetas recocidas hay un 45% de resistencia superior con film (CL-AF / CL-A) y un 25% para las termo-endurecidas (CL-HF / CL-H). Además los valores obtenidos con el procedimiento propuesto son mayores que los estimados directamente de la norma.

Tabla 4. Tensiones de rotura [MPa] para pf=5%

| | CL-A | CL-AF | CL-H | CL-HF | CL-T |
|---------|------|-------|------|-------|------|
| Inicial | 31 | 44 | 90 | 109 | 170 |
| Final | 34 | 50 | 96 | 124 | 172 |

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha completado un método que permite refinar la fdd de tensión de rotura del vidrio obtenida con las estimaciones de tensión y de probabilidad de la norma. Se basa en la estimación de la probabilidad de fallo de la carga de rotura de las probetas, con un modelo de elementos finitos contrastado, y la comparación con la experimental. La clave es asignar un área efectiva a cada probeta de forma que se recoja tanto el efecto de la distribución de tensiones como los posibles errores inherentes al ensayo. Además, se ha optado por un ajuste de máxima verosimilitud de las funciones de Weibull para reducir el efecto del número limitado de probetas. El método se ha aplicado a 5 grupos de probetas de vidrio y se han obtenido resultados congruentes con campañas anteriores.

Uno de los objetivos específicos de la campaña era profundizar en la resistencia adicional que presentan los vidrios laminados tras la rotura de la primera lámina. Como se ha visto, el simple hecho de cubrir el vidrio con una hoja de PVB ha mejorado la resistencia a la rotura de forma muy apreciable (hasta 45%) en el caso del vidrio recocido. En el vidrio temoendurecido hay mejoras para las resistencia bajas desapareciendo casi la influencia para las altas. Esto hace pensar que el fenómeno físico que está permitiendo las mejorías de resistencia es la disminución del efecto de *corrosión bajo tensión* cuando se cubre el vidrio al poco tiempo de ser fabricado. En el caso de vidrios laminados dicha protección es muy superior por lo que la tensión de rotura también podría mejorar en la lámina de *interface* respecto a la cara que queda al aire.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación recibida en la convocatoria del Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental para la realización del proyecto BIA 2011-28959-C02-02.

REFERENCIAS

- [1] Belis, J., Depauw, J., Callewaert, D., Delincé, D. y Van Impe, R. *Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature*. Engineering Failure Analysis 16 ,pp. 1866–1875, 2009.
- [2] Pacios-Alvarez, A., Huerta, M.C., Sánchez, J. y Calle, A., *Post-fracture behavior of laminated plates after human impact test*. COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass, Edit. J. Belis, C. Louter, D. Mocibib, ISBN 978-1-138-00044-5, pp 165-172, 2013.
- [3] Schula, S., Schneider, J., Vandebroek, M. y Belis, J., *Fracture strength of glass, engineering testing methods and estimation of characteristic values*.

COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass, Edit. J. Belis, C. Louter, D. Mocibib, ISBN 978-1-138-00044-5, pp 223-234, 2013.

- [4] Guidance for European Structural Design of Glass Components. Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, Report EUR 26439, 2014.
- [5] EN-1288-2:2000 Glass in building. Determination of bending strength of glass. Part 2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas.
- [6] Huerta, M.C., Pacios-Álvarez, A., Lamela-Rey, M.J., Fernández-Canteli, A., *Influence of experimental test type on the determination of probabilistic stress distribution*. Glass Performance Days, Tampere, Finlandia, pp. 371-374, 2011.
- [1] García Menéndez, M., Przybilla, C., Lamela Rey, M.J., Fernández Canteli, A., Huerta, M.C., Pacios, A., *Análisis numérico y experimental de elementos de vidrio laminado utilizando un modelo probabilístico de diseño*. XVIII Encuentro del Grupo Español de Fractura. Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. II, pp. 541-546, 2011.
- [8] Przybilla, C., Fernández-Canteli, A., Castillo Ron, E., *Deriving the primary cumulative distribution function of fracture stress for brittle materials 3-4 point bending tests*. Journal of the European Ceramic Society, 31 (4), pp. 451-460, (2010)
- [9] Postigo, S., Pacios, A., Huerta, C., y Capel, F., *Seguridad ante impacto humano de acristalamientos en edificaciones: resistencia mecánica por anillos concéntricos*. Anales de la Mecánica de Fractura, vol 2, pp 645-648, 2007.
- [10] Huerta, M.C., Pacios, A., Germán, A., Lamela, M.J., Fernández Canteli, A. y Capel, F. *Improving with FEM the glass fracture stress obtained from coaxial double ring test*, COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass, Edit. J. Belis, C. Louter, D. Mocibib, ISBN 978-1-138-00044-5, pp 189-196, 2013.
- [11] Huerta, M.C., Pacios, A., Germán, A., Lamela, M.J., Fernández Canteli, A. y Capel, F., *Obtención de la tensión de fractura del vidrio en ensayos de anillos concéntricos utilizando MEF*. XVIII Encuentro del Grupo Español de Fractura. Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. II, pp. 501-506, 2013.
- [12] UNE-EN 12603:2003 Vidrio para la edificación. Proc.s para ajuste y de intervalos de confianza de resistencia del vidrio con distribución de "Weibull".