

# Testes de resistência pós-quebra para aplicações de vidro laminado em coberturas

## Sumário

O design e o desempenho estrutural do vidro laminado em aplicações de cobertura, como marquises e clarabóias, é de grande importância pois tem um impacto direto na segurança dos ocupantes de um edifício e dos funcionários que fazem a manutenção. Para aplicações desse tipo, a resistência pós-quebra da composição de vidro laminado é de extrema importância. A resistência pré-quebra pode ser prevista com razoável precisão por pacotes de software baseados na técnica MEF (Elementos Finitos), como o SJ Mepla, que permite que o usuário introduza propriedades mecânicas de interlayers viscoelásticos juntamente com as do vidro — que ajuda na diferenciação, baseada no tipo de interlayer, da resistência estrutural pré-quebra e da otimização do design. No entanto, a resistência pós-quebra do vidro é ainda uma área desconhecida, uma vez que modelos analíticos para essa investigação são inconclusivos até o momento, sendo os testes destrutivos a única solução confiável. Testes de impacto que simulam a queda acidental de um funcionário de manutenção foram realizados para se avaliar a resistência de "colapso" de composições de vidro laminado com fixação pontual feitas com interlayers variados, ou seja, PVB, Ionômero, PVB rígido e EVA. Além disso, testes de resistência pós-quebra com duração média (30 min. ou mais) — executados de acordo com o novo conjunto de requerimentos estabelecidos pela Norma Alemã pr DIN 18008-6 — foram conduzidos sob temperatura abaixo de zero (-20 °C), temperatura ambiente (21 °C) e temperaturas elevadas de 50 °C. Foram também feitas medições da deflexão para estimar os valores de módulo da composição laminada quebrada.

## Autores:

Malvinder Singh Rooprai  
Ingo Stelzer

## Introdução

O vidro laminado apresenta uma melhora significativa na resistência pós-quebra em comparação com uma camada de vidro monolítico. Os fragmentos de vidro ficam aderidos aos interlayers e, assim, uma certa capacidade estrutural remanescente é obtida conforme os fragmentos de vidro "arqueiam" ou se assentam no lugar. Essa capacidade depende da fragmentação do vidro e aumenta com o aumento do tamanho dos fragmentos. Dessa forma, elementos de vidro laminado alcançam uma capacidade estrutural remanescente particularmente alta quando feitos de vidro semitemperado ou recozido que se partem em grandes fragmentos. O comportamento pós-quebra depende, além disso, do material do interlayer. O interlayer mais comum é o PVB, cujas propriedades mecânicas dependem grandemente da temperatura e duração da carga aplicada. À temperatura ambiente, o PVB é flexível, apresentando um alongamento no momento de quebra

Tipo de interlayer	Densidade	Módulo de Young a 50 °C, por 1 hora de carga	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Expansão Térmica	Tensão de Tração
Ionômero	850 Kg/m <sup>3</sup>	12,6 MPa	0,5	1,25x10 <sup>-4</sup> /°C	44 MPa
PVB	1070 Kg/m <sup>3</sup>	0,16 MPa	0,5	2,2x10 <sup>-4</sup> /°C	25 MPa
PVB rígido	1081 Kg/m <sup>3</sup>	1,86 MPa	0,5	1,6x10 <sup>-4</sup> /°C	35 MPa

Tabela 1: Comparação das Propriedades Mecânicas do Ionômero, PVB & PVB rígido

de mais de 250%. Sob temperaturas mais altas e cargas de durações maiores, a transferência dos esforços cortantes é grandemente afetada. A baixa rigidez do interlayer de PVB resulta no "efeito membrana" (Fig. 1) logo assim que o vidro se quebra, ocorrendo até mesmo em aplicações verticais por causa do peso próprio do painel, e especialmente com painéis de tamanhos grandes e com o mínimo de suportes. Os interlayers Ionôméricos da Kuraray (originalmente desenvolvidos pela DuPont) foram criados com o objetivo de alcançar maior rigidez, maior resistência à temperatura e maior resistência ao rompimento em aplicações de rótulas em sistemas de fixação pontual — o que contribui para que se alcance uma resistência pós-quebra superior e redundância de design.

As tabelas acima mostram a comparação das propriedades mecânicas dos interlayers Ionômero Ionomérico, PVB & PVB rígido.

A resistência pós-quebra é significativamente afetada pelo padrão de quebra das camadas de vidro, pelas condições de suporte e pela temperatura. O padrão de quebra do vidro pode ser uma grande variável até mesmo para o mesmo tipo de vidro — o que torna a modelagem analítica de sua resistência pós-quebra uma tarefa praticamente impossível. Por essa razão, os engenheiros precisam se basear em testes destrutivos para fazer essa análise. A resistência pós-quebra pode ser categorizada da seguinte forma:

1. Resistência pós-quebra imediata contra o "colapso"
2. Teste de resistência pós-quebra com duração média (Mais de 30 min. De acordo com a pr DIN 18008-6)

Testes separados foram conduzidos para ambos os tipos de resistência, e os mesmos testes foram apresentados neste estudo.

## Resistência pós-quebra imediata contra o "colapso"

Testes de impacto foram realizados na Intertek ATI Inc. York, Pensilvânia. Um saco macio pesando 100 Kg (peso típico de um funcionário de manutenção mais suas ferramentas e equipamentos de mobilização) foi solto de uma altura de 1,2 m a uma temperatura de teste de 50 °C. O método do teste simula uma carga potencial desde de a instalação e/ou funcionários de manutenção em condições de perigo e assistência imediata. Os painéis foram condicionados a 50 °C durante 1 hora antes do teste. A área do teste foi enclausurada com painéis isolados



Fig.1: O Efeito Membrana



Fig. 2 (a & b): Aplicação de marquise sem enquadramento (suportes pontuais) sob carga estática

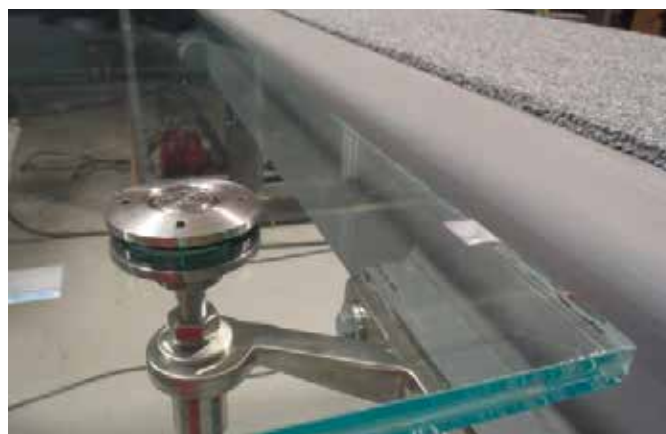


Fig. 4: O laminado de EVA não ofereceu resistência de "colapso"

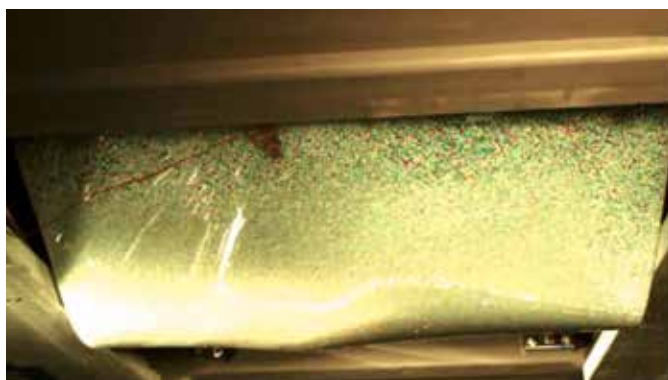


Fig. 3: O laminado Ionomérico ofereceu resistência de "colapso"

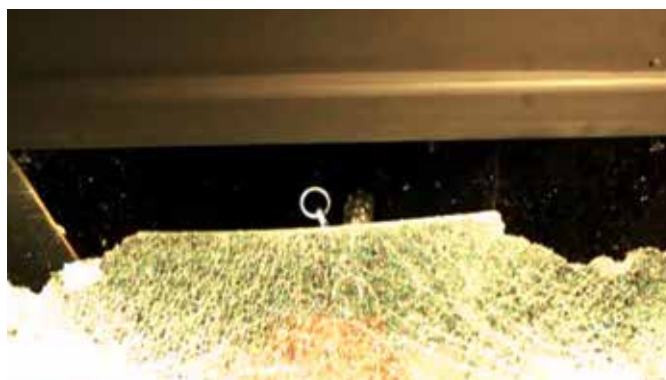


Fig. 6: O laminado de PVB rígido não ofereceu resistência de "colapso"

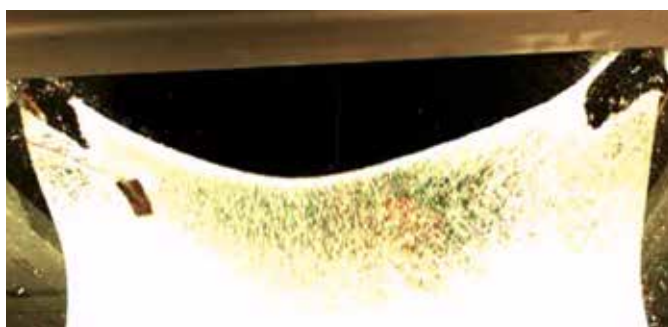


Fig. 5: O laminado de PVB não ofereceu resistência de "colapso"

para garantir que não houvesse variação nos resultados do teste causados pela temperatura. Os painéis insulados foram removidos momentos antes do impacto.

A Fig. 2a mostra como o laminado feito com o interlayer Ionomérico proporcionou uma barreira contra o objeto de impacto sob carga estática. O objeto de impacto foi removido após 15 minutos sem que se observasse nenhum rompimento do interlayer nas rótulas (Fig. 2b). No teste de impacto subsequente, este laminado oferece resistência de "colapso" (Fig. 3), enquanto que os laminados feitos com EVA, PVB e PVB rígido nas Fig. 4, 5 e 6, respectivamente, colapsaram logo assim que o objeto de impacto atingiu o vidro, e não foi capaz de agir como uma barreira.

Teste de resistência pós-quebra com duração média (30 min. ou mais)

### Requerimentos das Normas Técnicas

A Norma Alemã pr DIN 18008-6 (Vidros em Edificações - Regras de Design & Construção - Requerimentos adicionais para envidraçamentos sobre os quais se caminha em casos de procedimentos de manutenção), em

fevereiro de 2015, tornou os requerimentos para o desempenho pós-quebra de envidraçamentos de cobertura, que são acessíveis para manutenção e limpeza, muito mais rígidos do que antes. A nova regulamentação exige que a composição de vidro laminado suporte um peso de 100 kg por pelo menos 30 min. antes da quebra da camada superior do vidro. Primeiro, o painel é submetido a um impacto de um pneu duplo que pesa 50 kg, solto de uma altura de 900 mm. Em sequência, foi imposta uma carga de 100 kg durante 30 min. sobre uma área de 200 x 200 mm. Após a quebra da camada superior de vidro, o elemento de vidro deve ficar por inteiro em seus suportes por pelo menos 30 min. O teste é um sucesso se o espécime não deslizar dos suportes, se o impacto não penetrar o vidro laminado e se nenhum fragmento perigoso despençar<sup>2</sup>.

Testes de resistência pós-quebra em painéis de vidro (1,5 m x 2,0 m) com fixação pontual para uma aplicação típica de marquise foram conduzidos na Universidade das Forças Armadas em Munique, Alemanha. Nove painéis de vidro com cada um dos 4 interlayers diferentes – Ionomero (1,52 mm & 0,89 mm), PBV rígido (1,52 mm) e PVB (1,52 mm) – foram preparados para serem testados em 3 cenários de temperatura diferentes. O objetivo era saber qual composição laminada com qual tipo de interlayer conse-



## Testes de resistência pós-quebra para aplicações de vidro laminado em coberturas



Fig. 7: Configuração do Teste de Pós-quebra

guiria passar nos requerimentos estabelecidos pela norma pr DIN 18008-6 em 3 temperaturas diferentes (-20 °C, +21 °C e +50 °C). Três painéis foram testados para cada cenário de temperatura. Uma tentativa foi feita para se descobrir a capacidade máxima dos laminados. No entanto, os aparatos do teste tinham a limitação de aplicar a carga máxima de

400 kg. Os laminados foram condicionados por pelo menos 3 horas para cada cenário de temperatura. A câmara de teste tinha um mecanismo de controle de temperatura que ia de -25 °C a +25 °C. As composições laminadas com todos os diferentes tipos de interlayer foram fortes o suficiente para resistir ao impacto contra qualquer quebra. Assim, a camada superior dos laminados, em cada caso, teve que ser quebrada manualmente com um golpe no centro. A seguir, foi aplicado um bloco de concreto de 100 kg sobre o painel de vidro durante 30 min. O objetivo do teste era descobrir o limite máximo de desempenho pós-quebra, então a carga foi aumentada até atingir 400 kg em incrementos de 100 kg, com um intervalo de 15 min. entre cada incremento de carga.

Laminados feitos com os interlayers Ionômero Ionomérico e PVB rígido suportaram essa carga de 400 Kg sem que ocorresse colapso, sob as temperaturas de -20 °C e + 21 °C (Fig. 8). Já na Fig. 9, o laminado de PVB não conseguiu suportar a carga imposta de 100 kg a 21 °C, colapsando em poucos segundos após a aplicação da carga, devido ao rompimento do interlayer nas rótulas.



Fig. 8: Carga de 400 Kg sobre laminado Ionomérico a 21 °C

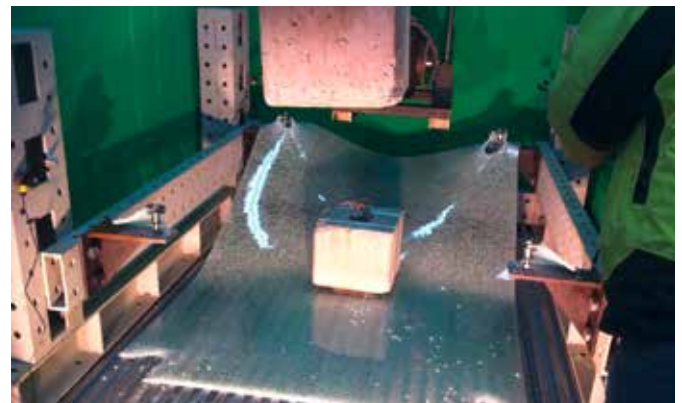


Fig. 9: Laminado com PVB em colapso com carga de 100 Kg a 21 °C

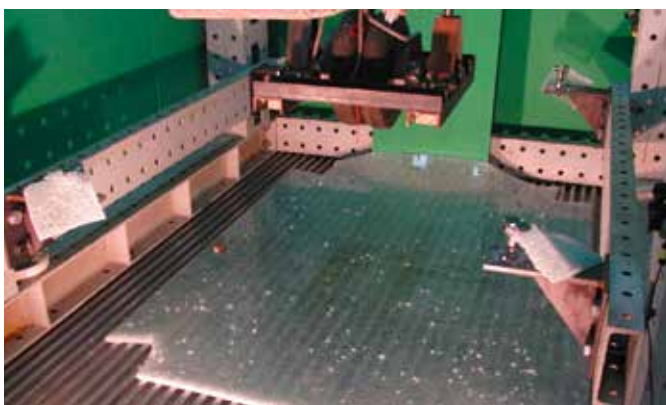


Fig. 10: Laminado de PVB colapsou a 50 °C

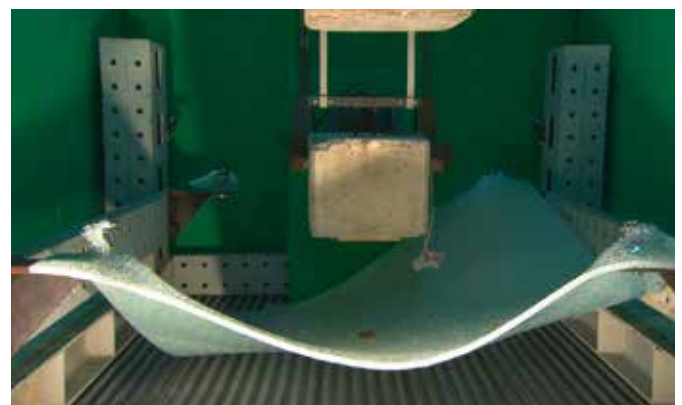


Fig. 11: Laminado de PVB rígido colapsou a 50 °C



Fig. 12: Laminado Ionomérico de 0,89 mm colapsou com 200 kg

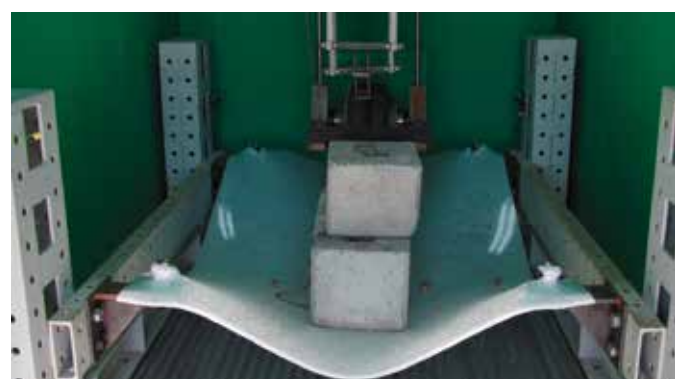


Fig. 13: Laminado Ionomérico de 1,52 mm colapsou com 300 kg

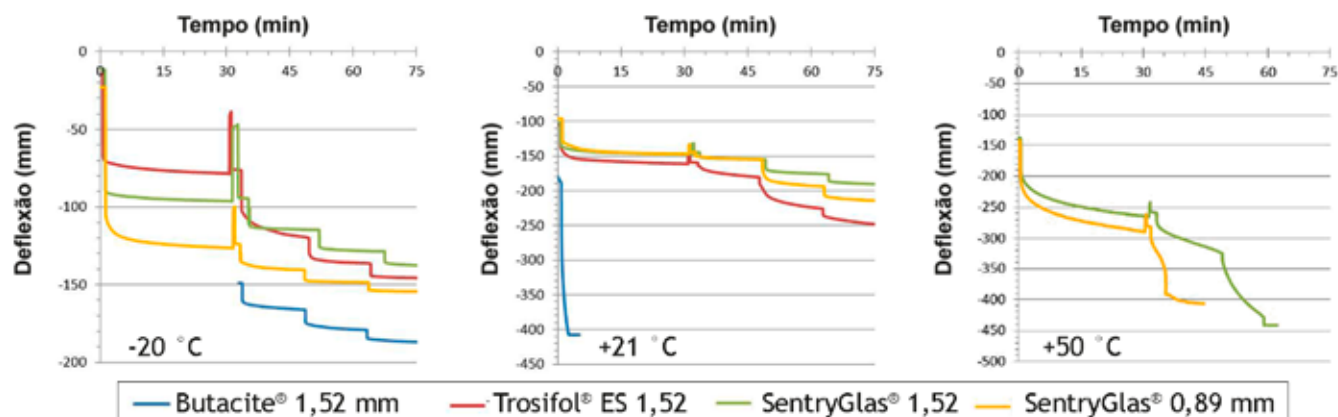


Fig. 14:  
Deflexão vs. Tempo a -20 °C

Fig. 15:  
Deflexão vs. Tempo a +21 °C

Fig. 16:  
Deflexão vs. Tempo a +50 °C

À temperatura elevada de 50 °C, as composições laminadas quebradas feitas de PVB e PVB rígido não foram capazes de suportar o seu peso próprio e colapsaram (Fig. 14 & Fig. 15) logo após a quebra de ambos interlayers.

Enquanto isso, a composição laminada feita com o interlayer ionomérico suportou um peso de 100 kg por mais de 30 min. e entrou em colapso quando a carga foi incrementada para 200 kg. (Fig. 12). De forma semelhante, o laminado ionomérico de 1,52 pôde suportar uma carga de 200 kg por mais de 30 min. após a quebra, e colapsou quando a carga foi incrementada para 300 kg (Fig. 13).

### Medições de Deflexão para módulo de estimativa do laminado quebrado

As medições de deflexão foram feitas durante o teste para todos os três cenários de temperatura com o objetivo de se fazer uma estimativa reversa dos valores de módulo da composição laminada. A -20 °C, o laminado ionomérico de 1,52 mm demonstrou a menor deflexão após 30 min. (Fig. 14), enquanto que a +21 °C, os laminados ionoméricos, assim como o laminado com interlayer de PVB rígido, tiveram um desempenho muito melhor do que o laminado de PVB comum (Fig. 15). A +50 °C,

os laminados com interlayer Ionoplástico SentryGlas® tiveram um desempenho superior ao do PVB rígido (Fig. 16).

### Conclusões

1. A -20 °C, laminados feitos com os 4 interlayers testados, ou seja, ionomérico de 0,89 mm, ionomérico de 1,52 mm PVB de 1,52 mm e PVB Rígido de 1,52 mm, passam nos requerimentos de resistência pós-quebra da nova Norma Alemã pr DIN 18008-6.
2. A -20 °C, todos os 4 interlayers testados tinham resistência máxima para suportar mais de 400 Kg, pois não houve colapso do painel causado pelo rompimento do interlayer nas rótulas.
3. A 21 °C, os laminados com os Interlayers Ionoméricos e PVB rígido passam nos requerimentos da norma DIN 18008-6, mas o laminado com PVB não passa.
4. A 21 °C, os laminados com Ionomérico de 0,89 mm e 1,52 mm tiveram resistência pós-quebra quase idênticas até por volta de 45 min. após a quebra.
5. Para regiões de clima tropical onde a temperatura ambiente é de mais de 45 °C, laminados feitos com o interlayer Ionomérico atingem e superam os requerimentos da norma pr DIN 18008-6.

### Referências

1. Structural Engineering Documents 10, Structural Use of Glass - Matthias Haldimann, Andreas Luible, Mauro Overend, ISBN 978-3-85748-119-2, 2008, Páginas 14-15.
2. Structural Engineering Documents 10, Structural Use of Glass - Matthias Haldimann, Andreas Luible, Mauro Overend, ISBN 978-3-85748-119-2, 2008, Página 172.

### **CENTRAIS DE ATENDIMENTO REGIONAIS:**

Kuraray Europe GmbH  
Business Area PVB  
Mülheimer Straße 26  
53840 Troisdorf, Germany  
Phone: +49 (0) 22 41/25 55 - 220  
E-Mail: trosifol@kuraray.eu

Kuraray America, Inc.  
Applied Bank Center  
2200 concord Pike, Suite 1100  
Wilmington, Delaware 19803  
Phone: +1 800 635 3182