XII CBPE 2021
XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Ensaios laboratoriais de lajes em vidro estrutural: estudo comparativo com normas internacionais de referência

Patricia Bonilha[1,2], Rui Camposinhos[2], Alfonso Pappalardo[1], Diogo Ribeiro[3]
[1] Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil
[2] Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal
[3] CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal
patricia.sanvito.bonilha@gmail.com, rdc@isep.ipp.pt, alfonso.pappalardo@mackenzie.br, drr@isep.ipp.pt

Resumo
O uso do vidro na construção tem sido cada vez maior em função de sua sustentabilidade, estética e funcionalidade. Até o início do século XX, o vidro era utilizado apenas como elemento de vedação, porém com o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação, passou a ser possível utilizá-lo como elemento estrutural. O vidro mais utilizado para este fim é o laminado, que é constituído por lâminas de vidro mescladas com material aderente. Quando comprimido apresenta uma elevada resistência, porém, quando tracionado, apresenta em torno de 3 a 7% da resistência à compressão. O presente artigo apresenta uma investigação sobre o material vidro e sua aplicabilidade em elementos estruturais. Além da caraterização das suas propriedades mecânicas, são detalhados os princípios gerais do dimensionamento de painéis de vidro estrutural a partir das normas norte-americanas ASTM E1300 (2016), ASTM E2751 (2017) e da norma europeia EN 16612 (2019), uma vez que no Brasil não existem ainda normas que abordem este assunto. Além da análise normativa, foram ensaiados três protótipos de vidro temperado laminado com três camadas de vidro simulando um comportamento de laje com cargas perpendiculares ao seu plano. O objetivo principal dos ensaios foi avaliar o comportamento do vidro submetido à esforços de flexão. Por fim, foi realizada uma análise comparativa das cargas de ruptura obtidas nos testes de laboratório e das cargas resistentes estimadas pelas normas demonstrando que estas apresentam valores conservativos.

Palavras-chave
Vidro estrutural; ensaios laboratoriais; normas internacionais; análise comparativa.

1. Introdução
O vidro estrutural pode ser utilizado em pilares, vigas e lajes, garantindo estabilidade à estrutura. Descoberto no ano 5000 aC, o vidro surgiu por meio de um processo acidental no qual comerciantes fenícios misturaram nitrato de sódio e areia de praia ao lado do fogo, gerando um líquido incolor e viscoso. Posteriormente, vários métodos de produção foram desenvolvidos, desde o sopro até o método atual denominado de *float*. O vidro é considerado um material amorfo, cujo principal constituinte é a areia de sílica, podendo apresentar propriedades mecânicas distintas conforme a sua composição. A tipologia mais adequada para o vidro estrutural é o laminado, que é constituído por lâminas de vidro intercaladas com camadas de materiais aderentes. Por ser um assunto atual, não existem muitas normas específicas para o seu dimensionamento. Conforme observado nos estudos de Torres (2015), a escassez de normas nacionais sobre o assunto causa limitações na aplicação do vidro sendo necessário recorrer a normas internacionais. Vários projetos foram desenvolvidos e construídos utilizando vidro estrutural. Alguns exemplos de aplicação são o Skydeck em Chicago, o Skywalk no Grand Canyon, a piscina de vidro na Market Square Tower no Texas, a entrada do empreendimento Riserva Golf no Rio de Janeiro e as famosas lojas da Apple, tal como a de Convent Garden em Londres e a da 5ª Avenida de Nova York, com estruturas, escadas e passarelas de vidro. As vantagens da utilização do vidro são o aproveitamento da luz natural, a economia de energia e sua resistência enquanto material estrutural. Além disso, é um material 100% reciclável. Outro benefício é ser pré-fabricado, garantindo a redução de desperdícios nas obras. Porém, apesar de ser um material muito utilizado na construção civil, é ainda uma tecnologia recente no âmbito da aplicação estrutural e que requer mais estudos e regulamentações. Este trabalho tem como objetivo estudar os critérios de dimensionamento de elementos estruturais de vidro.

Em específico destina-se a estudar as propriedades mecânicas e o comportamento do vidro estrutural quando solicitado a esforços de flexão, além de avaliar as diretrizes de normas internacionais para o projeto de vidro estrutural. O estudo envolve a realização de testes de laboratório em placas de vidro laminado submetidas a esforços de flexão e a comparação dos seus resultados com os resultados provenientes das diretrizes normativas.

2. Vidro estrutural

O projeto de vidro estrutural exige o estudo das suas propriedades e o conhecimento das diretrizes das normas. O vidro é um material inorgânico, obtido pelo resfriamento brusco de uma massa em fusão, que durante o processo de endurecimento adquire rigidez sem a formação de cristais em sua estrutura química, o que permite classificá-lo como um material amorfo. O vidro é um material que apresenta um comportamento linear elástico perfeito, ou seja, nunca apresenta deformações permanentes. Além disso, quando supera a sua carga resistente, rompe de forma frágil, sem aviso. A resistência à compressão do vidro é bastante superior a sua resistência à tração. O vidro apresenta boa resistência a substâncias agressivas e por isso é um material com uma adequada durabilidade para a construção civil. Existem diversos tipos de vidro que, de acordo com a sua composição e processamento, são classificados em: plano, laminado, semi temperado, temperado, duplo ou aramado. O vidro laminado é composto por duas ou mais lâminas de vidro coladas por meio de material aderente. Este vidro é classificado como vidro de segurança, pois ao se quebrar os estilhaços tendem a ficar colados na camada de material aderente. O vidro temperado por sua vez, é submetido a um tratamento térmico, no qual tensões são introduzidas adequadamente, melhorando sua resistência. As desvantagens do vidro temperado são que não pode ser perfurado após o tratamento e não apresenta resistência pós ruptura, pois se quebra em pequenos pedaços. O tipo mais adequado de vidro para uso estrutural é o vidro laminado temperado, o qual é composto por chapas de vidro temperado coladas com material aderente.

2.1 Propriedades

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do vidro em um contexto geral.

Tabela 1– Propriedades do vidro (Adapt. Haldimann *et al,* 2008; Henriques, 2010 e NBR NM 294, 2004).

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	2500	kg/m³
Dureza	6,0 to 6,5	Mohs
Modulo de Young (E)	70,0 to 71,7	GPa
Coeficiente de Poisson	0,20 to 0,23	
Resistência à tração	30 to 70	MPa
Resistência à compressão	1000	MPa
Calor específico	720 to 795	J/Kg°C
Condutividade térmica	0,72 to 1,00	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Dilatação linear	9	$10^{-6} \cdot °C^{-1}$

É importante observar que as propriedades apresentadas estão sujeitas a alterações conforme a composição do vidro, processo de fabricação e tratamento após a fabricação.

2.2 Camada aderente

O vidro laminado é composto por chapas de vidro e camadas aderentes. Essas camadas são produzidas com polímeros, que possuem propriedades viscoelásticas. Além de colar um vidro no outro, a camada aderente tem outras funções, nomeadamente: i) em caso de ruptura, não influencia a outra chapa de vidro e mantém os estilhaços colados na camada aderente garantindo a segurança do elemento; ii) transmite as tensões de uma chapa para a outra e aumenta a rigidez do conjunto. Existem alguns tipos de materiais aderentes. O mais comum é o polivinilbutiral (PVB) devido ao seu custo benefício. Existem outros materiais no mercado, como o SentryGlasPlus (SGP) da DuPont, que proporciona melhores propriedades para o vidro laminado, pois influencia no comportamento elástico, apresentando Módulos de Young e de Cisalhamento mais altos que o PVB, porém, é mais caro. As principais propriedades do PVB são apresentadas na Tabela 2. A folha de PVB tem geralmente uma espessura de 0,38 mm e a camada aderente pode ser composta por mais de uma folha, tornando o conjunto mais espesso.

Tabela 2– Propriedades do material aderente PVB (Henriques, 2010).

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	1,075	g/cm³
Módulo de Cisalhamento	0 to 4	GPa
Coeficiente de Poisson	0,5	
Resistência à tração	20	MPa
Dilatação linear	80	$10^{-6}\cdot°C^{-1}$

3. Ensaios laboratoriais

Os ensaios laboratoriais tiveram como principal objetivo avaliar o comportamento mecânico de lajes em vidro estrutural submetidas a esforços de flexão. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Acústicos, Dinâmicos e Estatísticos (LAEDE) em São Paulo, Brasil, em maio de 2019.

3.1 Configuração experimental

Os ensaios de laboratório consistiram em testar três protótipos de vidro laminado temperado constituídos por três chapas de vidro. Os protótipos apresentavam as seguintes dimensões: 1600 mm de comprimento, 200 mm de largura e 33,04 mm de espessura. Cada chapa de vidro apresentava uma espessura igual a 10 mm intercaladas com 1,52 mm de PVB. O ensaio foi realizado utilizando um atuador servo-hidráulico. Este atuador controlava a carga aplicada no centro de uma viga de distribuição em aço que estava centralizada com o protótipo de vidro. Por sua vez esta viga transferia a carga do atuador para os seus dois apoios que estavam equidistantes em relação ao centro da laje, gerando na zona central um estado de flexão pura. Os ensaios foram realizados conforme o aparato experimental ilustrado na Figura 1.

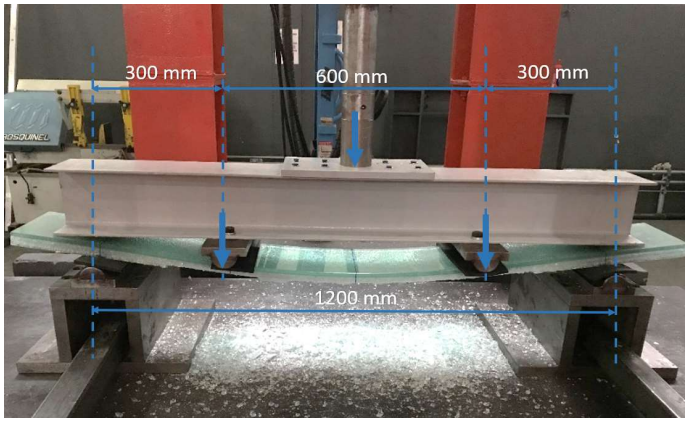

Figura 1 – Configuração experimental (BONILHA, 2019).

3.2 Resultados

O primeiro protótipo foi testado com uma velocidade média de 7 N/s e os seguintes com 47,7 N/s. A carga no primeiro protótipo foi mantida constante durante 10 minutos para verificar o efeito de fluência. A ruptura do primeiro protótipo levou todas as placas a se partirem e houve o desprendimento entre a primeira e a segunda chapa de vidro. A terceira chapa transformou-se em pó, permanecendo colada ao PVB apenas nos apoios, conforme ilustrado na Figura 2. Os dois últimos protótipos tiveram modos de ruptura muito semelhantes. A primeira placa permaneceu intacta e as placas seguintes se romperam, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 2 – Ruptura do primeiro protótipo (BONILHA, 2019).

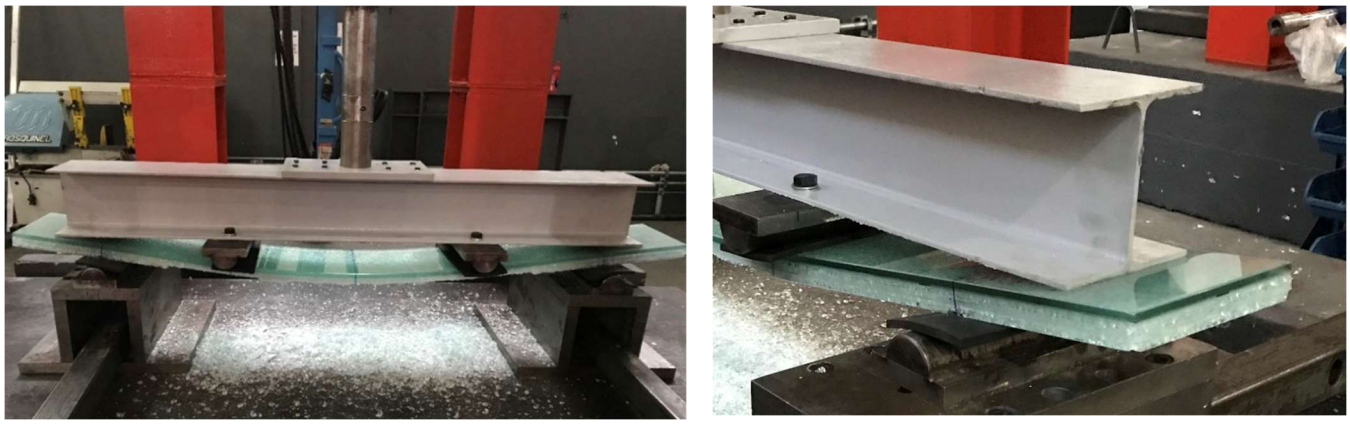

Figura 3 – Ruptura do segundo e terceiro protótipos (BONILHA, 2019).

A Figura 4 mostra o aspecto dos protótipos do primeiro e do segundo ensaio após a ruptura. No caso do Protótipo 2, a laje retornou à sua posição inicial após a retirada da carga evidenciando o comportamento elástico do material. Em todos os ensaios a terceira chapa na seção de meio vão se transformou em pó após a ruptura, permanecendo colada ao PVB apenas nos apoios. Isso aconteceu porque esta é a placa que estava sujeita às tensões de tração mais elevadas.

Figura 4 – Aspecto do protótipo após a ruptura (BONILHA, 2019).

O resumo dos resultados dos protótipos ensaiados é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3– Valores dos parâmetros resistentes obtidos nos testes de laboratório (BONILHA, 2019).

	Velocidade de aplicação de carga	Carga de ruptura	Tensão	Deslocamento na ruptura	Deformação na ruptura (εu)
	[N/s]	[kN]	[MPa]	[mm]	[‰]
Protótipo 1	7,0	28,0	122,1	17,6	1,7
Protótipo 2	47,7	34,0	146,5	21,1	2,1
Protótipo 3	47,7	32,0	135,8	19,6	1,9

Para estimar as tensões de ruptura e correspondentes deformações, foram utilizadas as espessuras efetivas admitindo uma transferência total do cisalhamento através da camada aderente e considerando um Módulo de Young igual a 70GPa. Os gráficos de tensão versus deformação (σ–δ) para os vários protótipos são apresentados na Figura 5.

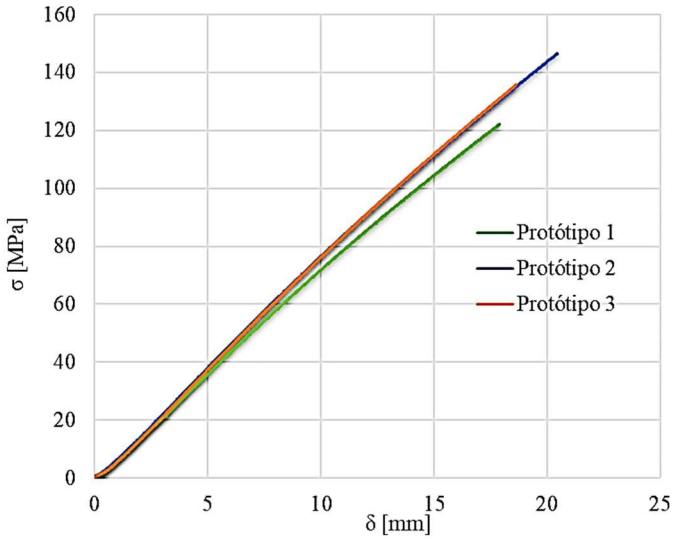

Figura 5 – Curvas tensão-deformação (σ–δ) dos protótipos (BONILHA, 2019).

4. Normas internacionais para o dimensionamento de vidro estrutural

O projeto de vidro estrutural é especificado em diversas normas internacionais nomeadamente nas normas americanas ASTM E2751 (2017) e ASTM E1300 (2016), além da norma europeia EN 16612 (2013). A norma americana foi desenvolvida baseada no método das tensões admissíveis, enquanto a europeia foi desenvolvida baseada no método dos estados limites. Neste trabalho, os valores admissíveis e os valores limites últimos serão referidos como valores resistentes.

4.1 Normas Americanas

A norma ASTM E2751 (2017) recomenda que o procedimento de cálculo do vidro estrutural deve ser desenvolvido com base em conceitos de mecânica das estruturas ou análise de elementos finitos. Por sua vez, na norma ASTM E1300 (2016) é mencionado que as cargas resistentes podem ser estimadas a partir de dois métodos. O primeiro, no qual se foca o presente trabalho, é denominado Procedimento Analítico, enquanto o segundo é denominado de Procedimento Básico. No Procedimento Analítico o cálculo é realizado através da determinação da espessura efetiva do vidro para tensão e deformação. Esse método pode ser aplicado para vidros laminados, com chapas de espessuras iguais ou diferentes e leva em consideração a transferência de cisalhamento pelo material aderente. As tensões resistentes devem ser verificadas na Tabela 4 para o respectivo tipo de vidro e duração da carga.

Tabela 4 – Tensões admissíveis no vidro estrutural (Adaptado da ASTM E2751, 2017).

Tipo de Vidro	3 segundos	10 minutos	60 minutos	Permanente
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Recozido	18,3	132,0	11,7	5,7
Semi-Temperado	36,5	30,9	29,2	20,3
Temperado	73,0	65,3	63,0	49,4

4.2 Norma Europeia

A EN16612 (2019) determina as cargas resistentes através de um Método Simplificado. Devem ser verificadas duas condições: as tensões para o estado limite último (ELU) e a deformações para o estado limite de serviço (ELS). De forma análoga à ASTM E1300 (2016), a espessura efetiva do vidro laminado é usada para determinação da resistência. A principal diferença é que o coeficiente que representa a transferência de cisalhamento (ω) devido ao material aderente é determinado de acordo com a rigidez da família a que esse material pertence e a duração do carregamento. As tensões resistentes devem ser calculadas para o vidro temperado de acordo com a Equação (1).

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v \cdot (f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;V}} \quad (1)$$

onde k_{mod} é o fator de duração de carga, k_{sp} é o fator para o tipo de superfície do vidro, k_v é o fator de fortalecimento do vidro temperado, $f_{g;k}$ é o valor caraterístico da tensão de flexão para o vidro comum, igual a 45 N/mm^2, e o $f_{b;k}$ é o valor caraterístico da tensão de flexão para o vidro reforçado, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tensão de flexão característica para o vidro reforçado (Adaptado da EN16612, 2019).

Vidro por produto (qualquer composição)	Valores para resistência à flexão característica (fb,k) para vidro reforçado processado a partir de:		
	vidro de segurança temperado termicamente de acordo com a EN 1250 e vidro de segurança temperado termicamente embebido de acordo com a EN 14179	vidro termoendurecido de acordo com a EN 1863	vidro reforçado quimicamente de acordo com a EN 12337
vidro float ou folha de vidro desenhada	120 N/mm²	70 N/mm²	150 N/mm²
vidro estampado	90 N/mm²	55 N/mm²	100 N/mm²
float esmaltado ou folha de vidro desenhada	75 N/mm²	45 N/mm²	-
vidro estampado esmaltado	75 N/mm²	45 N/mm²	-

4.3 Resumo comparativo das prescrições normativas

A Tabela 6 apresenta as principais expressões para o dimensionamento de vidro estrutural de acordo com as normas americana e europeia. É possível perceber que as normas são bastante similares, diferenciando-se apenas na apresentação do fator de transferência de cisalhamento que na ASTM é calculado pela expressão apresentada nessa tabela, enquanto na norma EN é classificado de acordo com a família à qual o material aderente pertence, podendo o seu valor variar entre 0 e 1. Para os mesmos valores de fator de transferência de cisalhamento, ambas normas apresentam os mesmos valores de espessura efetiva de tensão e deformação.

Tabela 6 – Tabela comparativa (BONILHA, 2019).

	ASTM Método Analítico	EN Método Simplificado
Espessura efetiva de deformação	$h_{ef;w} = \sqrt[3]{{h_1}^3 + {h_2}^3 + 12\mathrm{r} \cdot I_s}$	$h_{ef;w} = \sqrt[3]{\Sigma\, {h_k}^3 + 12 \cdot \omega \cdot (\Sigma h_k \cdot {h_{m,k}}^2)}$
Espessura efetiva de tensão	$h_{1;ef;\sigma} = \sqrt{\frac{{h_{ef;w}}^3}{h_1 + 2 \cdot \mathrm{r} \cdot h_{s;2}}}$	$h_{ef;\sigma;j} = \sqrt{\frac{{h_{ef;w}}^3}{h_j + 2 \cdot \omega \cdot h_{m;j}}}$
Fator de transferência de cisalhamento	$\mathrm{r} = \frac{1}{1 + 9.6 \cdot \frac{E \cdot I_S \cdot h_v}{G \cdot {h_s}^2 \cdot a^2}}$	$\omega \rightarrow$ *tabelado na norma EN*16612 (2019)
Tensão	$\sigma_{max} = \frac{M}{W}$ *onde* $\mathrm{W} = \frac{\mathrm{b} \cdot \mathrm{h}^2}{6}$	
Deformação	$\delta\mathrm{máx} = \frac{5 \cdot \mathrm{p} \cdot \mathrm{L}^4}{384 \cdot \mathrm{E} \cdot \mathrm{I}}$ *onde* $\mathrm{I} = \frac{\mathrm{b} \cdot \mathrm{h}^3}{12}$	

4.3 Valores resistentes estimados pelas diretrizes normativas

Os cálculos das cargas resistentes foram realizados com base em ambas diretrizes normativas. Os valores destas grandezas foram estimados pelo Método Analítico da ASTM e pelo Método Simplificado da EN a partir

das tensões resistentes de cada norma, desconsiderando os coeficientes de segurança. Os valores foram calculados para duração de carga de 3 segundos e 10 minutos. O fator de transferência de cisalhamento tem um grande impacto na espessura efetiva calculada pelas diretrizes normativas. Devido à incerteza de quanto o PVB iria transferir de cisalhamento de uma chapa de vidro para a outra, foram estimadas as cargas resistentes para fatores de transferência nulo e total. A Tabela 7 apresenta a espessura efetiva para tensão e para deformação considerando o fator de transferência de cisalhamento (Γ ou ω) igual a 0 e 1.

Tabela 7– Espessuras efetivas de tensão e deformação em função de Γ ou ω (BONILHA,2019).

Γ ou ω	hef,w (mm)	hef,σ (mm)
0	14,422	17,321
1	32,664	32,478

Os valores são apresentados na Tabela 8 considerando um período de 3 segundos e Tabela 9 considerando um período de 10 minutos de duração de carga. Nota-se que quanto maior a duração da carga, menor a resistência do vidro.

Tabela 8– Valores estimados de carga resistente e deformação, calculadas a partir da tensão resistente de cada norma para 3 segundos de duração de carga (BONILHA,2019).

	Procedimento Analítico - ASTM		Método Simplificado - EN	
	Γ=0	Γ=1	Γ=0	Γ=1
Carga estimada resistente [kN]	11,86	42,47	7,69	27,82
Tensão estimada resistente [MPa]	182,5	182,5	120	120
Deformação estimada resistente [mm]	86,06	26,04	56,6	17,12

Tabela 9– Valores estimados de carga resistente e deformação, calculadas a partir da tensão resistente de cada norma para 10 minutos de duração de carga (BONILHA,2019).

	Procedimento Analítico - ASTM		Método Simplificado - EN	
	Γ=0	Γ=1	Γ=0	Γ=1
Carga estimada resistente [kN]	10,57	37,95	6,91	25,07
Tensão estimada resistente [MPa]	163,25	163,25	108,3	108,3
Deformação estimada resistente [mm]	76,99	23,3	51,08	15,45

5. Análise comparativa

Os valores resistentes das cargas e das tensões esperados das lajes foram estimados para transferências de cisalhamento nula e total, para cargas de curta (3 segundos) e média (10 minutos) duração, conforme apresentado na Tabela 8 e Tabela 9. Os valores de ruptura foram obtidos nos testes de laboratório, conforme apresentado na Tabela 3. Comparando os valores estimados pelas diretrizes normativas para 10 minutos de duração de carga com os valores de ruptura provenientes dos ensaios, concluiu-se que a camada aderente transferiu eficientemente o cisalhamento. A partir disso, calculou-se as tensões e deformações dos testes laboratoriais para a carga de ruptura resistida pelos protótipos. Observou-se que a primeira laje, submetida a 10 minutos de duração do carregamento, rompeu com uma tensão de 122,13 MPa. As outras duas lajes, no entanto, romperam com uma tensão média de 141,15 MPa. As tensões das duas últimas lajes foram maiores que as da primeira e isso pode ser explicado pelo efeito de fluência. Neste caso, representou uma redução da tensão de 14% aproximadamente. Para medir esse efeito com precisão, testes com mais amostras devem ser realizados e com diferentes durações de carga.

6. Conclusões

As normas internacionais estudadas apresentam algumas limitações e, às vezes, é necessário combiná-las para desenvolver um dimensionamento adequado. Para aplicações específicas, como lajes de piso, recomenda-se a realização de ensaios laboratoriais para análise adequada do seu comportamento estrutural. Os testes de laboratório mostraram que a carga de ruptura suportada pelo material é maior do que as previstas pelas normas, demonstrando, para esta situação, que as diretrizes foram desenvolvidas considerando margens adicionais de segurança. O estudo das ligações não foi o objeto deste trabalho, no entanto, é um aspecto importante a ser considerado. Ainda existem vários detalhes a serem estudados no vidro estrutural devido à falta de padronização sobre o assunto. Algumas recomendações para trabalhos futuros são o estudo de outras normas como as diretrizes francesas e alemãs e o estudo do efeito de fluência para várias durações de carga e com maior número de amostras.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 294**: Vidro Float. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1300**: Determining Load Resistance of Glass in Building. 16 ed. West Conshohocken: ASTM, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2751**: Design and Performance of Supported Laminated Glass Walkways. 17 ed. West Conshohocken: ASTM, 2017.

BONILHA, Patricia Sanvito; CAMPOSINHOS, Rui de Sousa; PAPPALARDO JR, Alfonso. **A comparative study between international standards and finite element method**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.

EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 16612**: Determination of the load resistance of glass panes. Brussels: CEN, 2019.

HALDIMANN, Matthias; LUIBLE, Andreas; OVEREND, Mauro. **Structural use of Glass.** Zurich: Iabse-aipc-ivbh, 2008.

HENRIQUES, Pedro Daniel Fernandes. **Comportamento ao fogo do vidro estrutural.** 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010

TORRES, Livia Maria Ostene. **Estudo de caso de projeto com utilização de vidro estrutural**. Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico - CTC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2015.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmica e Estáticos (LAEDE) em São Paulo por gentilmente patrocinarem os ensaios.