



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**VIDRO ESTRUTURAL: CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E  
ESTUDO DE CASO**

**JÉSSICA PALOMA VALE DOS SANTOS SILVA**

**JOÃO PESSOA  
2017**

**JÉSSICA PALOMA VALE DOS SANTOS SILVA**

**VIDRO ESTRUTURAL: CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E  
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao conselho do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Andrea Brasiliano Silva

**JOÃO PESSOA**

**2017**

S586v Silva, Jéssica Paloma Vale dos Santos

Vidro estrutural: caracterização do material e estudo de caso./ Jéssica Paloma Vale dos Santos Silva. – João Pessoa, 2017.

103f. il.:

Orientadora: Profa. Dra. Andrea Brasiliano Silva

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Vidro estrutural 2. Normas 3. Dimensionamento 4. Modelagem computacional 5. Desempenho I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JÉSSICA PALOMA VALE DOS SANTOS SILVA

VIDRO ESTRUTURAL: CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso em 28/11/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

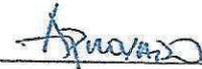


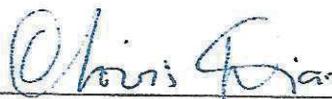
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Andrea Brasiliano Silva  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB





\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB





\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Clóvis Dias  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

“E a esperança não nos decepciona, porque Deus derramou seu amor em nossos corações, por meio do Espírito Santo que ele nos concedeu.”

Romanos 5:5

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, o dono de todas as coisas, sem Ele eu nada seria, a Ele toda honra e toda a glória.

À minha família, pelo apoio em todos os momentos. À minha mãe Vitória Valle e ao meu pai Jesaías Sabino, que são a minha base. À minha irmã Izabelly e ao meu cunhado Cláudio pelo seu apoio. Aos meus avós maternos Eliel Gerônimo e Doralice Vale por sempre estarem presentes.

Ao meu namorado Micaías Mateus Sales, pela paciência e por estar sempre comigo, me apoiando no que fosse preciso. Seu amor foi essencial.

Às amigas mais chegadas, Amanda, Carol, Dayana, Graziela, Larissa, Nyanne e Rhoana, que estiveram comigo nessa caminhada. À Monique, amiga com quem eu pude dividir minhas dificuldades e juntas pudemos achar soluções.

Aos meus professores orientadores, Andrea Brasileiro e Hidelbrando Diógenes pelo seu apoio no decorrer desse trabalho, me auxiliando no seu desenvolvimento e aperfeiçoamento.

A todos os professores, que auxiliaram no meu aprendizado no decorrer deste curso.

À empresa SJ MEPLA®, pela disponibilização do software para uso acadêmico, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Luíz Guilherme Valarinho, por se dispor a ajudar neste trabalho, contribuindo na coleta de dados.

A todos que, direta ou indiretamente, estiveram comigo nessa jornada, meu muito obrigada!

## RESUMO

Este estudo objetivou caracterizar o vidro como elemento estrutural apresentando as particularidades que influenciam na concepção do projeto estrutural com este material, bem como conceituar os tipos de vidros; descrever suas características e singularidades; apresentar normas que auxiliam nos ensaios e dimensionamento; verificar as propriedades do vidro por meio de ensaio não destrutivo; e fazer um estudo de caso com aplicação do vidro estrutural. Foi utilizado como método para a coleta de dados a pesquisa bibliográfica, por meio de estudos apresentados no referencial teórico sobre as propriedades, tipos, conexões e normas referentes aos ensaios e dimensionamento do vidro; e o estudo de caso, utilizando-se modelos computacionais nos softwares SAP2000, Autodesk Robot e SJ MEPLA<sup>®</sup>, bem como a realização de ensaios experimentais para a avaliação do comportamento estrutural do vidro. A partir da análise dos resultados, foi possível perceber a importância do conhecimento das características do vidro e seu desempenho estrutural, para facilitar o desenvolvimento de projetos. A carência de normas nacionais se impõe como o maior desafio no dimensionamento desse tipo de estrutura. Por fim, foi possível entender o desempenho do vidro como elemento estrutural e a importância das recomendações acerca do seu dimensionamento.

**Palavras-Chaves:** vidro estrutural; normas; dimensionamento; modelos computacionais; desempenho.

## **ABSTRACT**

This study aimed to characterize the glass as a structural element presenting the particularities that influence the design of the structural glass project, as well as define the types of glass; describe its characteristics and singularities; present standards that assist in the testing and design of structural glass; verify the properties of the glass by non-destructive test; and present a practical example with the use of structural glass. A bibliographic research was used as a method for collecting data, by a study about the properties, types, connections and standards related to the tests and design of the glass; and the practical example, using computational models in the software's SAP2000, Autodesk Robot and SJ MEPLA<sup>®</sup>, as well as conducting tests to the evaluation of the glass structural behavior. From the analysis results, it was possible to understand the importance of knowing the glass characteristics and its structural performance, to facilitate the development of projects. The lack of national standards is the biggest challenge in the glass structures design. Finally, through the study, it was possible to understand the performance of glass as a structural element and the importance of the design recommendations.

**Keywords:** structural glass; standards; design; computational models; performance.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>AS</b>	Australian Standard (Norma Australiana)
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials (Norma Americana)
<b>BSG</b>	Borosilicate Glass (Vidro de Borosilicato)
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung (Norma Alemã)
<b>ELS</b>	Estado Limite de Serviço
<b>ELU</b>	Estado Limite Último
<b>EN</b>	European Standards (Norma Europeia)
<b>EPDM</b>	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
<b>ETAG</b>	Guideline for European Technical Approval
<b>EVA</b>	Acetato-vinilo de etileno
<b>FEM</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>PET</b>	Poliéster
<b>POM</b>	Polioximetileno
<b>PVB</b>	Polivinil butiral
<b>SGP</b>	SentryGlas
<b>SLSG</b>	Soda lime silicate glass (vidro de silicato)
<b>SSG</b>	Structural Silicone Glazing
<b>TPU</b>	Termoplástico Poliuretano
<b>UFPB</b>	Universidade Federal da Paraíba
<b>VEA</b>	Vidro Exterior Agrafado

## LISTA DE SIMBOLOS

$\alpha, \alpha'$	- Variável que depende da relação geométrica
$E$	- Módulo de Elasticidade
$E_{\text{vidro}}$	- Módulo de Elasticidade do vidro
$G$	- Módulo de Cisalhamento
$G_{\text{inter}}$	- Módulo de Cisalhamento do <i>interlayer</i>
$\sigma$	- Tensão
$\sigma_{ADM}$	- Tensão Admissível
$\varepsilon$	- Deformação
$\delta$	- Flecha
$\nu$	- Coeficiente de Poisson
$T$	- Temperatura
$L$	- Deslocamento devido ao cisalhamento
$d$	- Espessura do adesivo
$\tan \gamma$	- Deformação por cisalhamento
$\tau$	- Tensão de cisalhamento
$I$	- Elasticidade em relação ao tempo
$T_g$	- Temperatura de transição vítrea do adesivo
$f_{t,fl}$	- Resistência à tração na flexão
$Pr$	- Carga de ruptura
$Li$	- Distância entre eixos dos apoios
$e$	- Espessura do corpo de prova
$B$	- Largura do corpo de prova

- $\zeta$  - Coeficiente de Transferência de Cisalhamento
- $h_v$  - Espessura do *interlayer*
- $h_1$  - Espessura da lâmina 1
- $h_2$  - Espessura da lâmina 2
- $I_s$  - Porção do momento de inercia de uma seção transversal
- $a$  - Menor dimensão
- $h_{ef,w}$  - Espessura efetiva para o cálculo da flecha
- $h_{ef,\sigma}$  - Espessura efetiva para o cálculo da tensão

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Museu <i>Cristal Palace</i> .....	281
Figura 02 – Loja da <i>Apple</i> em Nova York .....	281
Figura 03 – Maior ponte de vidro do mundo (China).....	282
Figura 04 – Processo de fabricação do vidro <i>float</i> .....	28
Figura 05 – Ruptura padrão do vidro <i>float</i> .....	289
Figura 06 – Processo de têmpera do vidro.....	30
Figura 07 – Fratura padrão dos vidros float (esquerda), termo-endurecido (meio) e temperado (direita). .....	30
Figura 08 – Comportamento pós-fratura do vidro laminado, constituído por diferentes tipos de vidro .....	32
Figura 09 – Processo de fabricação do vidro laminado.....	33
Figura 10 – Relação entre o módulo de cisalhamento (G) e a temperatura (T) no vidro laminado.....	34
Figura 11 – Vidro insulado (duplo) .....	35
Figura 12 – Resumo dos tipos mais comuns de suporte de vidro .....	37
Figura 13 – Suporte linear com blocos de fixação.....	38
Figura 14 – Sistema de conexão por aperto.....	39
Figura 15 – Conexões típicas por atrito – vidro monolítico e laminado .....	40
Figura 16 – Conexões aparafusadas com saliência (A) e sem saliência (B).....	41
Figura 17 – Grampo metálico “ <i>spider</i> ” .....	42
Figura 18 – Deformação do adesivo sob força de cisalhamento.....	44
Figura 19 – Tipos de fachadas de sistema de vidro estrutural com selante (SSG) de acordo com o guia para aprovação técnica Europeia (ETAG 002:2012) .....	45

Figura 19 – Tipos de fachadas de sistema de vidro estrutural com selante (SSG) de acordo com o guia para aprovação técnica Europeia (ETAG 002:2012) .....	45
Figura 20 – Seção transversal de conexões adesivas. ....	46
Figura 21 – Cúpula de vidro utilizando adesivo rígido – Universidade de Stuttgart, Alemanha .....	47
Figura 22 – Dispositivo de ensaio .....	52
Figura 23 – Área de apoio para piso de vidro.....	55
Figura 24 – Esquema básico do posicionamento da amostra para a medição das frequências de ressonância flexional .....	61
Figura 25 – Corpos de prova.....	62
Figura 26 – Realização do ensaio pelo método de excitação por impulso .....	62
Figura 27 – Interface do software Sonelastic®.....	63
Figura 28 – Frequência de vibração natural do vidro comum (amostra a) .....	63
Figura 29 – Frequência de vibração natural do vidro laminado (amostra b).....	64
Figura 30 – Passarela de vidro (vista 1).....	66
Figura 31 – Passarela de vidro (vista 2).....	67
Figura 32 – Passarela de vidro (vista 3).....	67
Figura 33 – Seção transversal da passarela .....	68
Figura 34 – Detalhamento das ligações do piso.....	68
Figura 35 – Vidro antiderrapante.....	69
Figura 36 – Distribuição de cargas no piso de vidro.....	70
Figura 37 – Gráfico comparativo entre as tensões máximas.....	73
Figura 38 – Gráfico comparativo entre flechas máximas .....	73
Figura 39 – Esquema da composição do piso de vidro .....	75
Figura 40 – Sistema de guarda corpo sem moldura.....	76

Figura 41 – Cargas atuantes no guarda corpo .....	76
Figura 42 – Mapa de tensões no guarda corpo .....	77
Figura 43 – Mapa de deflexões no guarda corpo .....	77
Figura 44 – Simulação do teste de impacto de pêndulo.....	78
Figura 45 – Distribuição de cargas no piso de vidro.....	78
Figura 46 – Diagrama de momento fletor das longarinas.....	79
Figura 47 – Esquema do perfil metálico .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição química do SLSG e BSG .....	24
Tabela 02 – Resistência mecânica do vidro .....	27
Tabela 03 – Principais propriedades do PVB e do SGP .....	35
Tabela 04 - Propriedades típicas de selantes estruturais de silicone (dados dos fabricantes).....	47
Tabela 05 - Parâmetros que afetam a durabilidade ambiental .....	49
Tabela 06 – Níveis de impacto e classificação.....	53
Tabela 07 – Espessura nominal e mínima do vidro.....	57
Tabela 08 – Tensões admissíveis para o vidro .....	58
Tabela 09 – Resultados obtidos pelo Sonelastic® .....	64
Tabela 10 – Espessuras efetivas do vidro.....	71
Tabela 11 – Variáveis para o cálculo da tensão e flecha máxima.....	72
Tabela 12 – Resultados das tensões e flechas máximas.....	72
Tabela 13 – Resultados do SJ MEPLA®.....	74
Tabela 14 – Dados geométricos dos perfis metálicos utilizados na passarela.....	79

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
1.2.1. Objetivo Geral .....	18
1.2.2. Objetivos Específicos .....	18
<b>1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>18</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. O VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. PROPRIEDADES DO VIDRO .....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Propriedades químicas.....	23
2.2.2. Propriedades físicas .....	25
2.2.3. Propriedades Mecânicas .....	25
<b>2.3. TIPOS DE VIDROS.....</b>	<b>27</b>
2.3.1. Vidro Float .....	28
2.3.2. Vidro Temperado e Termo-endurecido.....	29
2.3.3. Vidro Laminado .....	32
2.3.4 Vidro insulado.....	35
<b>2.4. ARTICULAÇÕES E CONEXÕES .....</b>	<b>36</b>
2.4.1 Conexões mecânicas .....	37
2.4.1.1. Suportes lineares .....	37
2.4.1.2. Conexões por aperto.....	38
2.4.1.3 Conexões aparafusadas.....	40
2.4.2. Conexões coladas.....	43
2.4.2.1 Conexões por silicone estrutural .....	44
2.4.2.2 Conexões por adesivos rígidos .....	47
<b>2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE VIDRO .....</b>	<b>50</b>
<b>2.6 NORMAS PARA ENSAIOS E DIMENSIONAMENTO.....</b>	<b>51</b>
2.6.1 Normas para ensaios .....	52
2.6.1.1 ABNT NBR 14697.....	52
2.6.1.2 EN 356 .....	53
2.6.1.3 EN 12600 .....	53
2.6.2 Normas para dimensionamento .....	54
2.6.2.1 ABNT NBR 7199.....	54

2.6.2.2 DIN 18008 .....	55
2.6.2.3 ASTM E1300 .....	55
2.6.2.4 ASTM E2751 .....	58
2.6.2.5 AS 1288.....	59
<b>2.7 METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>59</b>
2.7.1 Tensões admissíveis .....	59
2.7.2 Limitação de flechas.....	59
<b>3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO VIDRO PARA FINS ESTRUTURAIS.....</b>	<b>61</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO VIDRO ESTRUTURAL.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>66</b>
4.1.1 Dimensionamento do piso de vidro .....	69
4.1.2 Dimensionamento do guarda corpo .....	75
4.1.3 Dimensionamento da estrutura portante .....	78
4.1.4 Estrutura Final .....	80
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2. SUGESTÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO I - PRINCIPAIS NORMAS REFERENTES AO VIDRO.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO II – CÁLCULO DAS ESPESSURAS EFETIVAS.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO III – CÁLCULO ANALÍTICO DE TENSÕES E FLECHAS MÁXIMAS DO PISO DE VIDRO .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO IV – MAPA DE TENSÕES E DEFLEXÕES .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO V – DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS METÁLICOS.....</b>	<b>102</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

O vidro foi descoberto à aproximadamente 5000 a.C. Desde então, seu uso vem crescendo a cada dia, e com o crescimento da tecnologia, o vidro vem sendo moldado em diferentes formas e cores, conferindo assim uma maior diversidade de uso. Na construção civil sua aplicação destina-se a oferecer versatilidade e flexibilidade para a arquitetura.

De forma geral, tem-se observado grande uso do vidro em fachadas, desde a forma mais simples à mais elaborada e sofisticada, como por exemplo a utilização de vidros curvos. O vidro pode ser utilizado como estrutura em pisos, pontes, cobertura, escadarias etc. Os materiais constituintes da montagem e fixação dos vidros, como por exemplo o silicone estrutural, também devem ser cuidadosamente analisados, oferecendo as propriedades necessárias para resultar na resistência exigida para utilização e durabilidade do vidro estrutural, de acordo com o seu uso.

Diante da carência de normas nacionais relacionadas ao vidro estrutural, um fator que permanece em evidência é a importância de se conhecer bibliografias que auxiliem no desenvolvimento de projetos de estruturas de vidro, visto que o crescimento desse tipo de estrutura é notável, com respaldo na afirmação de O' Regan (2014, p.1, tradução nossa), segundo o qual “o uso do vidro como material estrutural dentro dos edifícios, tem-se tornado bastante comum nos últimos 25 anos”.

Portanto, buscou-se reunir dados e informações com o propósito de responder à seguinte questão: Como a caracterização e conhecimento das particularidades do vidro podem influenciar no dimensionamento adequado de estruturas de vidro?

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

A aplicação do vidro estrutural na construção civil vem crescendo com o decorrer do tempo. É comum nos dias atuais a utilização de estruturas em vidro, conferindo à arquitetura um aspecto mais leve e elegante, destacando a versatilidade da estrutura e de seus elementos componentes.

A evolução constante do mercado e as inovações da arquitetura vem demandando a aplicação cada vez mais elaborada do vidro, o qual necessita ser devidamente estudado e analisado para cada fim requisitado. É indispensável a

verificação das recomendações para seu dimensionamento, compreendendo assim um projeto estrutural bem desenvolvido.

A motivação deste trabalho foi, portanto, a possibilidade de dominar o uso correto do vidro estrutural, tendo em vista a falta de normas e referências bibliográficas nacionais para este fim. Com isso, buscou-se apresentar conceitos e ferramentas que podem auxiliar na caracterização e dimensionamento de estruturas de vidro, conhecendo-se melhor sua utilização e delimitações.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral a caracterização do vidro como elemento estrutural, apresentando as particularidades que influenciam na concepção do projeto estrutural.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Conceituar os tipos de vidros;
- Descrever as características e singularidades do vidro;
- Apresentar normas que auxiliam nos ensaios e dimensionamento do vidro estrutural;
- Verificar as propriedades do vidro por meio de ensaio não destrutivo;
- Fazer um estudo de caso com aplicação do vidro estrutural.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Neste primeiro capítulo, faz-se uma introdução sobre o tema, apresentando o que será abordado neste trabalho, assim como justificativa e objetivos.

No segundo capítulo, apresenta-se um referencial teórico, abordando fatores que contribuem para o estudo de caso considerado, como as propriedades do vidro, seus tipos e conexões. Também são apresentadas as normas que auxiliam nos testes e dimensionamento dos vidros.

No terceiro capítulo, é apresentada uma avaliação experimental das propriedades mecânicas do vidro para fins estruturais, por meio de ensaios não destrutivos.

No quarto capítulo, apresenta-se o estudo de caso, em que será demonstrado o dimensionamento de uma passarela de vidro que ligaria os blocos de salas do Centro de Tecnologia desta Universidade.

No quinto capítulo, serão apresentadas as considerações finais deste trabalho de acordo com os objetivos iniciais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. O VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O vidro é formado por minerais, que fundidos juntos à elevadas temperaturas formam o material utilizado para diversas finalidades. Segundo O'Regan *et al.* (2014) as primeiras fabricações do vidro ocorreram em Roma, e quem possuía em suas casas janelas com vidro eram considerados de grande importância na sociedade. Pode-se constatar que a importância do vidro é, entre inúmeros fatores, proporcionar maior transmissão de luz para os ambientes internos, mostrando sua leveza e sofisticação. Vê-se, pois, que o vidro vem se destacando ao longo dos tempos, tomando cada vez mais lugar nos elementos arquitetônicos, assim como nos estruturais, proporcionando um aspecto diferenciador nas construções.

Como bem nos assegura Schittich *et al.* (2007) pode-se dizer que os vidros claros e transparentes estão se destacando cada vez mais. Nesse contexto fica claro que isso se dar devido a sua maior transmissão de luz solar e também por permitir maior versatilidade nos ideais estéticos. Pode-se constatar que a evolução na área estrutural vem influenciando as inovações do uso do vidro na arquitetura. Percebe-se aqui que o vidro se tornou parte significativa nas construções atuais, e que a estrutura tem se apresentado como fator definitivo para a aplicação desse material de forma mais elaborada, dando um aspecto mais diferenciado e rebuscado à arquitetura.

Fica claro que, com o constante crescimento das tecnologias, a aplicação do vidro vem se tornando cada vez mais aparente e sua utilização vem evoluindo nos projetos da construção civil. Vale salientar que este tipo de elemento sempre foi alvo de admiração dos seus utilizadores e transeuntes, como exemplo temos uma das primeiras construções em vidro, o museu *Cristal Palace* (FIGURA 01). A partir daí foram surgindo outras construções voltadas ao uso do vidro como seu principal componente, como exemplo temos a loja da *Apple* em Nova York (FIGURA 02) e a mais alta e longa ponte de vidro do mundo localizada na China (FIGURA 03).



Figura 01 – Museu Cristal Palace

Fonte: (London Mozart Players<sup>1</sup>)



Figura 02 – Loja da *Apple* em Nova York

Fonte: (Athelier do Corrimão<sup>2</sup>)

O museu *Crystal Palace*, em Londres, foi construído em 1851 e sua estrutura foi formada por ferro fundido e placas de vidro, criando um ambiente com maior área de vidro já existente, atraindo para si a admiração dos visitantes. A loja da *Apple*, em Nova York, é um cubo totalmente formado por vidros, onde possui colunas em placas de vidro com 10 m de comprimento que suportam uma grelha de vigas de vidro, conferindo apoio para o telhado, também de vidro.

1: LONDON MOZARD. **LMP at the Crystal Palace Museum**. Disponível em: <<http://londonmozartplayers.com/concert/lmp-at-the-crystal-palace-museum/>>. Acesso em: 16.set.2017.  
2: ATHELIER DO CORRIMÃO. **Escadas de Vidro e a Apple**. Disponível em: <<http://www.atheliodocorrimao.com.br/index.php/escadas-de-vidro-e-a-apple/>>. Acesso em: 16.set.2017.



Figura 03 – Maior ponte de vidro do mundo (China)

Fonte: (Nômades Digitais<sup>3</sup>)

Um dos destaques do vidro na construção civil é a ponte de vidro da China, construída em meio ao *Zhangjiajie Grand Canyon*, com 370 metros de comprimento e 400 metros acima do nível do mar. O processo de design tornou possível a construção de um "vidro puro", com um alto grau de segurança para os visitantes.

Conforme O'Regan et al. (2014), em 1871 o método do cilindro foi inventado por William Pilkington, tratando-se de uma evolução na fabricação, tornando o processo automático das placas de vidro. Com o decorrer do século XX, foram se desenvolvendo outros métodos mais sofisticados para a manufatura do vidro, como o processo do vidro float, também desenvolvido por Pilkington. Percebe-se assim, que ao longo dos anos foram evoluindo os métodos que facilitariam a aplicação e uso do vidro.

Os autores deixam claro que no decorrer do desenvolvimento dos métodos de obtenção do vidro, foi também evoluindo sua aplicação, tendo em vista que ambos os fatores estão correlacionados, se um se desenvolve, proporciona o crescimento do outro. Sendo assim, conclui-se que os avanços tecnológicos são fundamentais na formação de projetos mais elaborados e precisos. "Outro maior passo foi a invenção do processo do vidro float, [...] que revolucionou a fabricação de vidro de boa qualidade e em grandes formatos. [...] novos métodos de cálculo têm ajudado a

3: NÔMADES DIGITAIS. **China se prepara para abrir a maior ponte com chão de vidro do mundo.** Disponível em: < <http://nomadesdigitais.com/china-se-prepara-para-abrir-a-maior-ponte-com-chao-de-vidro-do-mundo/>> Acesso em: 16.set.2017.

progredir a otimização do vidro na construção” (SCHITTICH, 2007, p.50, tradução nossa).

Em princípio, imagina-se que o vidro, por ser um material frágil, não poderia ser usado como elemento estrutural, mas estudos e atuais construções comprovam a versatilidade do vidro e sua resistência a atuação de carregamentos, advindos dos elementos constituintes da estrutura. É importante considerar que o vidro tem se destacado no seu alto funcionamento como material de construção, mas julga-se pertinente entender suas limitações técnicas, seguindo assim certas regras de dimensionamento.

Praticamente nenhum outro material de construção já experimentou os enormes passos que tomaram lugar no campo da construção de vidro em recentes décadas. Esta substância quebradiça e frágil tem evoluído para um material de construção de alto desempenho que podem transportar cargas, se necessário, tornando possível estruturas arrojadas, delicadas e até mesmo assumir funções de controle climático por meio de engenhosos, geralmente invisíveis, revestimentos (SCHITTICH et al, 2007, p.50, tradução nossa).

O autor deixa claro na citação acima que o crescimento do uso do vidro como material de construção vem se tornado evidente ao longo das décadas. Esse é o motivo pelo qual é importante frisar que, apesar de ser um material frágil, o vidro também tem alto desempenho na sua função como elemento estrutural. Como citado acima, além de exercer papel estrutural, o vidro também apresenta aspectos importantes no comportamento de conforto da edificação como um todo.

Por todas essas razões, fica evidente que o vidro possui propriedades, que através de controle tecnológico, podem ser aplicadas para um comportamento estrutural bem desenvolvido e eficaz. Podendo assim, contribuir com as inovações arquitetônicas e tornando o projeto mais elaborado e sofisticado, de acordo com a finalidade ao qual se propôs.

## **2.2. PROPRIEDADES DO VIDRO**

### **2.2.1. Propriedades químicas**

O vidro, como anteriormente introduzido, é um material cuja composição é formada por silícios (areias) e carbonatos, passando por processos de fabricação em altas temperaturas e posteriormente sujeitos a uma rápida solidificação, fazendo com

que o material não complete sua cristalização. “O rápido arrefecimento impede a correta cristalização do material, fazendo com que o material final se mantenha num estado transitório entre o cristalino e o totalmente amorfo” (VALARINHO, 2010, p.6).

Segundo Haldimann *et al.* (2008), pode-se afirmar que o tipo mais comum de vidro utilizado na construção civil é o de silicato – *Soda Lime Silicate Glass* (SLSG). Quando se trata do uso do vidro para situações especiais, como por exemplo vidros com proteção contra o fogo, pode-se utilizar os vidros de boro-silicatos – *Borosilicate Glass* (BSG). A composição química irá influenciar na viscosidade, temperatura de fusão e no coeficiente de expansão térmica. Com isso é interessante observar as diferenças nas composições químicas do SLSG e BSG, como mostrado na TABELA 01.

Tabela 01 – Composição química do SLSG e BSG

		SLSG	BSG
<i>Sílica</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	69 - 74%	70 - 87%
<i>Óxido de Cálcio</i>	<i>CaO</i>	5 - 14%	-
<i>Oxido de Sódio</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	10 - 16%	0 - 8%
<i>Óxido de Boro</i>	<i>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	-	7 - 15%
<i>Óxido de Potássio</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	-	0 - 8%
<i>Magnésia</i>	<i>MgO</i>	0 - 6%	-
<i>Alumina</i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0 - 3%	0 - 8%
<i>Outros</i>		0 - 5 %	0 - 8%

Fonte: adaptado de Haldimann *et al.* (2008)

Nesse contexto fica claro que o BSG, em relação à sua composição química, oferece ao vidro uma maior resistência, tanto às variações de temperatura quanto à água e ácidos.

Uma das mais importantes propriedades do vidro é sua excelente resistência química à diversas substâncias agressivas, o que explica sua popularidade na indústria química e torna o vidro um dos mais duráveis materiais na construção. (HALDIMANN *et al.*, 2008, p.6, tradução nossa).

Vale salientar que a identificação dos elementos constituintes do vidro irá definir o seu processo de fabricação, tendo em vista sua influência, por exemplo, na viscosidade que “é a propriedade mais importante para a fabricação do vidro; permite a moldagem a quente, o refino, a limpeza e o clareamento da fusão, além da homogeneização, recozimento e tempera do vidro” (MANZOLI, 2015, p.59).

Por todas essas razões, podemos afirmar a importância do conhecimento da composição química do vidro, para desta forma poder identificar as propriedades necessárias para a correta aplicação de cada tipo de vidro.

### **2.2.2. Propriedades físicas**

As propriedades físicas de um material estão ligadas à medição e observação de suas características, sem que haja mudança na sua composição química. Dentre as mais importantes, pode-se destacar:

- Densidade;
- Dureza;
- Resistência à abrasão.

Para Martins e Pinto (2004), pode-se afirmar que a densidade relativa do vidro é variável, mas normalmente pode-se utilizar um valor igual a 2,5, compreendendo desta forma, para vidros planos, uma massa equivalente a 2,5 kg por metro quadrado e por espessura milimétrica. Quando se refere à dureza, o vidro se encontra entre o ORTOSE e o quartzo, considerando a medição pela escala de MOHS, sua dureza é igual a 6,5. Em relação a resistência à abrasão, o vidro possui resistência equivalente a dezesseis vezes a do granito.

Assim como em outros materiais de construção, conhecer as propriedades físicas do vidro é de grande importância para entender suas características. Desta forma pode-se obter um melhor aproveitamento do vidro, de acordo com a sua utilização.

### **2.2.3. Propriedades Mecânicas**

As propriedades mecânicas estão relacionadas ao comportamento do material quando submetidos a esforços (internos ou externos), essas condições não estão ligadas às suas características de composição, sendo determinadas através de experimentos e testes. Dentre as propriedades mais significativas, podem se destacar:

- Elasticidade;
- Resistência à tração;

- Resistência à compressão;
- Resistência à flexão.

Quando se refere à elasticidade, dois fatores importantes se destacam: Módulo de Elasticidade (E) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão que é aplicada no material e a deformação sofrida por ele:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde,

$\sigma$  é a tensão aplicada;

$\varepsilon$  é a deformação elástica longitudinal (adimensional).

Vê-se, pois, que quanto maior for o módulo de elasticidade, mais rígido será o material ou menor é a sua deformação elástica quando aplicada uma dada tensão. Como nos assegura Haldimann *et al.* (2008), para o vidro o módulo de elasticidade equivale a 70 GPa para SLSG e de 60 a 70 GPa para BSG. Em relação ao coeficiente de Poisson, que está relacionado a retração transversal e ao alongamento do material quando submetido a forças de tração, seu valor é igual a 0,23 para SLSG e 0,20 para BSG.

Percebe-se, desta forma, que o vidro pode ser considerado um material elástico, visto que não apresenta uma deformação permanente. Contudo, é preciso ressaltar que o vidro é um material frágil, quando submetido a determinadas tensões, ele rompe abruptamente, ou seja, sem indicação prévia de ruptura.

Não menos importante do que a elasticidade, verificar e conhecer a resistência do vidro em relação à tração, compressão e flexão (TABELA 02), é de extrema importância para o seu uso na construção civil. É relevante afirmar que a resistência mecânica é uma das propriedades mais importantes em um projeto, pois “a resistência de um material depende de sua capacidade de suportar a carga sem deformação excessiva ou ruptura.” (HIBBELER, 2004, p.62).

Tabela 02 – Resistência mecânica do vidro

RESISTÊNCIA	VALOR
Tração	300 a 700 MPa
Compressão	1000 MPa
Flexão	40 Mpa (Vidro recozido) 120 a 200 Mpa (Vidro temperado)

Fonte: Martins e Pinto (2004).

Desta forma, mediante aos dados acima, o vidro possui uma elevada resistência à compressão, mas que isso não influencia no seu comportamento estrutural. Como bem sabemos, à medida que um elemento estrutural sofre compressão, haverá também esforços de tração, mesmo que sejam mínimos, fazendo com que o vidro atinja primeiro seu limite de resistência à tração.

### 2.3. TIPOS DE VIDROS

Quando se trata do vidro, pode-se destacar suas diferentes formas e tipos, o que envolve diferentes propriedades e processos de fabricação. Com a evolução do processo de fabricação, possibilitou a formação de diferentes tipos de vidro, favorecendo assim a sua melhor utilização e aplicação.

Segundo O'Regan *et al.* (2014), pode-se dizer que há quatro tipos básicos de vidro:

- Vidro *float*;
- Vidro termo endurecido;
- Vidro temperado;
- Vidro quimicamente temperado.

É interessante ressaltar que, o vidro laminado, também abordado nesse capítulo, é composto por camadas de uma ou mais lâminas dos vidros anteriormente mencionados. Sendo assim, iremos abordar cada um dos tipos de vidro, determinando desta forma suas coerentes aplicações.

### 2.3.1. Vidro *Float*

O vidro *float*, também conhecido como vidro recozido, é considerado um tipo de vidro básico. O processo de fabricação (FIGURA 04) consiste em passar o material bruto em um forno de fusão numa temperatura que varia de 1500°C a 1600°C.

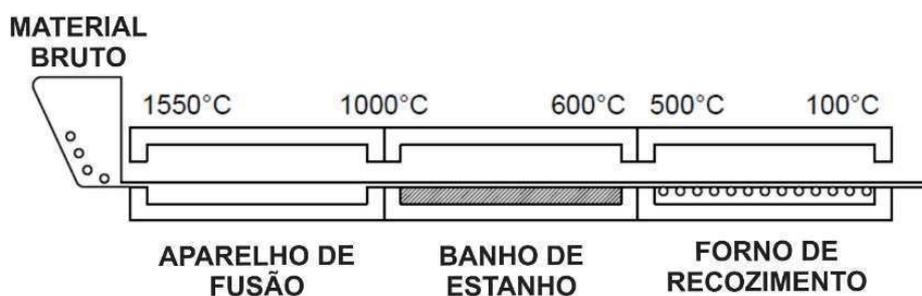


Figura 04 – Processo de fabricação do vidro *float*

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

Após a passagem no aparelho de fusão, a massa de vidro recebe um banho de estanho e, como o estanho é mais denso que o vidro, a massa flutua formando um painel de espessura uniforme.

Segundo Valarinho (2010), assegura-se que o processo de fabricação do vidro *float* influencia sua fratura incerta. Nesse contexto, fica claro esse tipo de vidro não pode ser utilizado como elemento estrutural. Conseqüentemente, para aumentar o seu desempenho mecânico, ambiental e até mesmo estético, o vidro passa por tratamentos, modificando as propriedades do material.

Desta forma, observa-se que o vidro *float* não compreende as propriedades necessárias para ser utilizado quando submetidos a certos carregamentos. Vale a pena salientar, que as falhas no vidro também estão relacionadas ao seu corte e perfuração. “Tensões de torção, térmicas e forças impostas, todas causam uma deformação elástica que pode levar a fratura” (O’REGAN *et al.*, 2014, p.7, tradução nossa).

O vidro pode fraturar através de esforços externos, como a aplicação de carregamento, e por esforços internos, como a variação de temperatura. Desta

maneira, é requerida uma resistência que vai além da qual o vidro pode suportar, levando-o assim a ruptura (FIGURA 05).



Figura 05 – Ruptura padrão do vidro *float*

Fonte: (WURM, 2007).

Vê-se, pois, que diversos fatores irão influenciar a resistência do vidro às tensões atuantes, como tamanho das fraturas, tamanho do painel, a forma de distribuição do carregamento e até mesmo a duração desses carregamentos. Por todas estas razões, percebe-se a necessidade do tratamento do vidro *float* para se obter melhores propriedades, como por exemplo resistências mais elevadas, aumentando a possibilidade da sua aplicação.

### 2.3.2. Vidro Temperado e Termo endurecido

A origem do vidro temperado e do termo endurecido vem através do tratamento do vidro *float*, pelo processo da têmpera. Esse processo consiste basicamente em reaquecer a placa de vidro no forno a uma temperatura equivalente a 650°C e posteriormente submetê-lo a um resfriamento com jatos de ar nas duas faces da placa (FIGURA 06).

É importante destacar que, para o vidro temperado, esse resfriamento é feito de forma rápida. Desta forma, as moléculas se contraem desenvolvendo tensões internas no vidro e aumentando assim sua resistência às tensões de tração, formando o vidro totalmente temperado (até 19 mm de espessura).

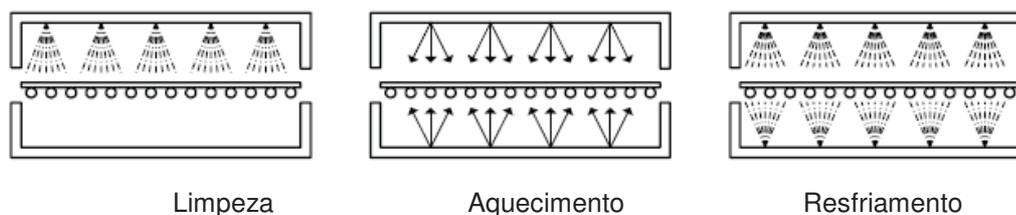


Figura 06 – Processo de têmpera do vidro

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

Para a obtenção do vidro termo endurecido (até 12 mm de espessura), o resfriamento é realizado de forma mais lenta, fazendo com que sua resistência seja menor do que a do vidro temperado. Para Valarinho (2010):

A principal vantagem do uso do vidro temperado é o aumento da tensão resistente à tração, que é aproximadamente 250 MPa - a tensão resistente do vidro recozido é de cerca de 50 MPa. [...] para o vidro termo endurecido a tensão resistente a tração é cerca de 110 MPa.

De acordo com Haldimann *et al.* (2008), pode-se dizer que no vidro temperado, como este possui um valor alto de tensão residual, sua fratura padrão acontece em pequenos pedaços (FIGURA 07) de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>. Por esse motivo, esse tipo de vidro é chamado de vidro de segurança, pois com esta forma de ruptura evitam-se maiores problemas para quem está próximo no momento da fratura. No entanto, deve-se ter cuidado, pois mesmo compreendendo em pequenos pedaços, quando caem a altura maiores, podem oferecer perigo. Conclui-se dessa forma que o vidro temperado possui realmente uma resistência estrutural mais elevada, mas sua pós-fratura ainda é precária devido aos pequenos fragmentos.



Figura 07 – Fratura padrão dos vidros *float* (esquerda), termo endurecido (meio) e temperado (direita)

Fonte: (HALDMANN et al., 2008).

Portanto o vidro termo endurecido está situado entre o vidro *float* e o temperado. Como sua tensão residual é menor do que do vidro temperado, sua fratura se dá em pedaços maiores, compreendendo assim uma melhor pós-fratura e oferecendo uma resistência estrutural com boa performance.

Todo o corte, perfuração e trituração do vidro deve ser realizado antes da placa passar pelo processo de endurecimento. Qualquer penetração da camada de superfície compressiva levará a um desequilíbrio de tensões e fragmentação do vidro. (O'REGAN et al., 2014, p.8, tradução nossa).

Na verdade, além do vidro temperado não poder passar por modificações geométricas, há também a possibilidade de ruptura espontânea da placa depois de um certo tempo. Isso se dar pelo fato da exposição do vidro ao sulfureto de níquel no processo de têmpera. De acordo com Haldimann *et al.* (2008), embasado na norma europeia EN 14179-1:2005, pode-se afirmar que esse risco de ruptura pode ser diminuído com o *heat soak test*, referindo-se a um teste de absorção de calor. Esse teste consiste basicamente em aquecer lentamente o vidro e o manter a certa temperatura por um período de tempo, fazendo com que o vidro, que tenha a possibilidade de ruptura espontânea, se quebre.

Além do processo da têmpera por aquecimento, têm-se também a realizada quimicamente, onde o vidro recebe um banho de nitrato de potássio, substituindo os íons de sódio, fazendo com que a superfície da placa fique com uma composição diferente. Desta forma, o vidro se torna mais resistente pelo surgimento de compressões na superfície. Esse tipo de vidro não é muito utilizado na construção civil, visto seu alto custo e também a formação fragmentos pontiagudos na quebra, proporcionando menor segurança. O vidro quimicamente temperado é mais utilizado quando se necessita de geometrias com maiores complexidades, assim como vidros com curvatura estável.

Por todas estas razões, percebe-se a necessidade de tratamentos nos vidros comuns, para dessa forma obter melhores propriedades para uso estrutural do vidro. As combinações dessas características acabam por produzir melhores materiais e mais resistentes, tendo-se o cuidado durante o processo de fabricação, o qual exerce total influencia no produto final requerido em projeto.

### 2.3.3. Vidro Laminado

O vidro laminado consiste em duas ou mais lâminas de vidro, ligadas a uma ou mais camadas de filme plástico, através de um processo envolvendo calor e pressão. Ele é considerado um vidro de segurança, pois, à medida que ocorre a ruptura, sua camada de ligação é capaz de segurar os fragmentos, certificando-se desta forma uma maior proteção para os transeuntes e também melhor desempenho estrutural. Pode-se perceber que o desempenho está ligado ao tipo de vidro constituinte, obtendo assim diferentes resultados na fixação dos fragmentos no filme (FIGURA 08).

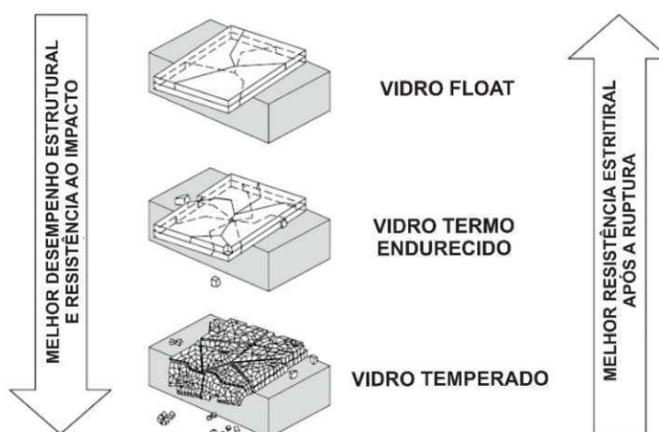


Figura 08 – Comportamento pós-fratura do vidro laminado, constituído por diferentes tipos de vidro

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

Percebe-se, então, que a medida que o vidro possui maior resistência estrutural, e consequentemente apresenta fragmentos menores no momento de fratura, se torna menos resistente na pós-fratura, devido a camada de ligação não ser suficiente para manter todos os fragmentos aderidos a ela.

A fabricação do vidro laminado (FIGURA 09) se dá mediante a introdução da lâmina de vidro, juntamente com sua camada de ligação, em uma estufa, fazendo a colagem e posteriormente o conjunto é passado por uma pré-laminação.

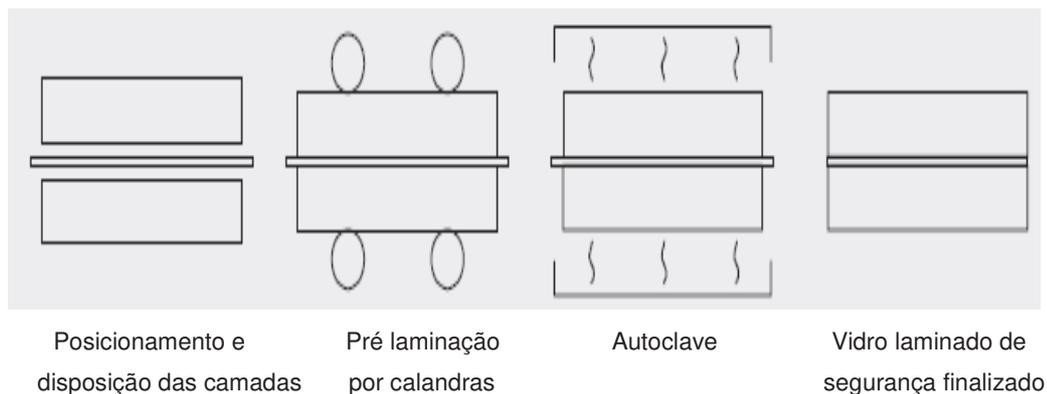


Figura 09 – Processo de fabricação do vidro laminado

Fonte: (Adaptado de WURM, 2007).

Após, o conjunto é submetido a uma autoclave, com pressões de aproximadamente 14 bar e temperaturas de 140°C. O processo da autoclave é necessário para que não haja falhas na ligação entre as lâminas, retirando qualquer presença de ar.

Segundo O'Regan *et al.* (2014), pode-se afirmar que os materiais usados como camada de ligação são:

- Polivinil butiral (PVB);
- Termoplástico poliuretano (TPU);
- Acetato vinilo de etileno (EVA);
- Poliéster (PET);
- Resina, como acrílico;
- Inoplásticos.

Na verdade, no mercado atual, entre as camadas de ligação citadas a cima, a mais utilizada é a de PVB. Essa resina, por se tratar de um termoplástico viscoelástico, seu módulo de cisalhamento ( $G$ ) irá depender das variações de temperatura ( $T$ ) e também da duração do carregamento aos quais são submetidos (FIGURA 10).

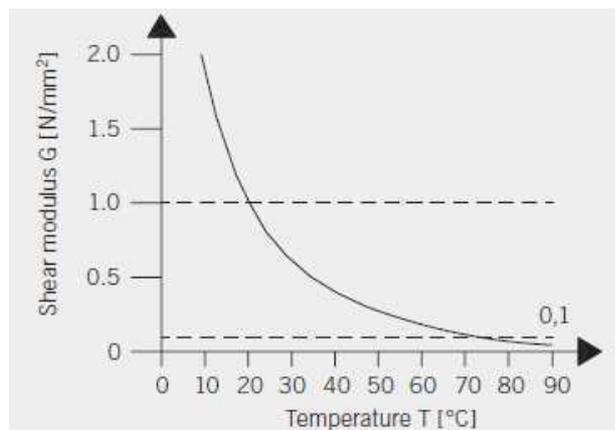


Figura 10 – Relação entre o módulo de cisalhamento (G) e a temperatura (T) no vidro laminado

Fonte: (WURM, 2007).

Percebe-se, desta forma, que a medida que há um aumento de temperatura, há uma diminuição do módulo de cisalhamento. Sabendo-se que o módulo é a relação entre a tensão cisalhante e a deformação elástica, constata-se que a deformação se dá pelo aumento de temperatura.

A rigidez de cisalhamento da seção composta completa pode ser considerada eficaz para cargas de curto prazo, como vento ou impacto. Por outro lado, para cargas permanentes, como o peso próprio, apenas a rigidez das lâminas individuais pode ser considerada. (WURM, 2007, p.66-67, tradução nossa).

Daí a percepção de que, é aconselhado o cálculo da espessura necessária para o vidro desconsiderando as propriedades da camada de ligação. Desta forma, é apenas considerado as características do vidro em si para o seu dimensionamento, tendo assim uma maior segurança.

Vale a pena destacar a utilização de inoplásticos, como exemplo o SentryGlas® (SGP). Esse material é um polímero de alta resistência, podendo ser até cinco vezes mais fortes e cem vezes mais rígidos do que o PVB, formando assim um vidro laminado mais forte, protegendo contra tempestades, impactos e explosões poderosas. A TABELA 03 mostra a comparação entre as principais propriedades do PVB e do SGP.

Tabela 03 – Principais propriedades do PVB e do SGP

PROPRIEDADE	UNIDADE	PVB	SGP
Módulo de Elasticidade*	MPa	11	300
Tensão de Tração	MPa	28,1	34,5
Alongamento	%	275	400
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,07	0,95
Coefficiente de dilatação térmico	10 <sup>-5</sup>	41,2	10 a 15

\*Para carga de curta duração e temperatura de 40°

Fonte: adaptado de SANCHES, 2013.

De uma forma geral, o vidro laminado se destaca na aplicação da construção civil, devido ao seu desempenho, principalmente no seu comportamento após a ruptura. É interessante destacar que o laminado temperado é bastante utilizado para fim estrutural, visto que se pode unir a qualidade de ambos vidros de segurança.

### 2.3.4 Vidro insulado

O vidro insulado (FIGURA 11), também conhecido como vidro duplo, é a combinação de duas, ou mais, placas de vidro, de mesmas propriedades ou não, fazendo com que haja um maior conforto térmico e acústico.



Figura 11 – Vidro insulado (duplo)

Fonte: (Catálogo de Arquitetura<sup>4</sup>)

Entre as duas placas de vidros, há uma camada interna, podendo ser preenchida com ar ou gás desidratado, fazendo uma dupla selagem. A primeira selagem evita a troca gasosa e, a segunda faz com que haja uma estabilidade do conjunto.

Para obter um efeito de isolamento, dois ou mais painéis de vidro são conectados em conjunto por uma vedação de borda. Como a cavidade entre os painéis de vidro é estanque aos gases (largura de 12 até 22 mm), pode ser preenchida com ar desumidificado ou gás inerte para melhorar a eficácia do isolamento. No mercado, duplo (dois painéis de vidro com cavidade) ou triplos vidraças (três painéis de vidro com duas cavidades) estão disponíveis. (FELDMANN *et al.*, 2014, p.51, tradução nossa).

Vê-se, que, ao poder utilizar diferentes tipos de vidro, o vidro insulado pode aproveitar e combinar as diferentes propriedades mecânicas de cada um deles, a exemplo do vidro temperado para maior resistência e do laminado para melhor proteção térmica.

## 2.4. ARTICULAÇÕES E CONEXÕES

Quando se trata do vidro, material frágil e delicado, não é recomendado que haja contato direto com outro material de dureza elevada, ou até mesmo com o próprio vidro, pois o mesmo não suporta picos de tensão causados por essas ligações. As articulações e conexões, ajudam o transporte e dissipação do carregamento aplicado nessas estruturas. “Para as estruturas primárias, as articulações desempenham um papel importante para a transferência das forças seccionais de um elemento para outro”. (FELDMANN *et al.*, 2014, p.159, tradução nossa).

Segundo Haldimann *et al.* (2008), pode-se dizer que os tipos mais comuns de suporte para o vidro são os lineares, selantes estruturais de silicone, suportes de borda e suportes em pontos fixos (FIGURA 12). Vale salientar que, para que não haja o contato direto entre o vidro e os suportes, materiais são utilizados como camada intermediária, como o plástico, resina, neoprene, injeção de argamassa, alumínio ou juntas fibrosas.

Na realidade, pode-se dividir as articulações e conexões em três tipos principais: mecânicas, coladas e mistas.

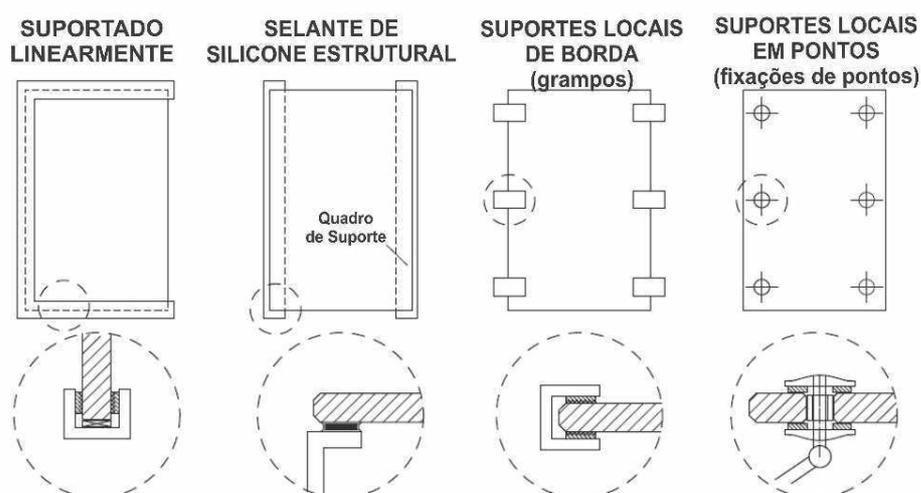


Figura 12 – Resumo dos tipos mais comuns de suporte de vidro

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

### 2.4.1 Conexões mecânicas

As conexões mecânicas são as mais utilizadas no mercado atual, podendo suprir as principais necessidades das estruturas. Todavia, assim como as demais conexões, deve-se ter cuidado no seu dimensionamento, evitando, como mencionado anteriormente, o contato direto com o vidro, tendo sempre presente um material com módulo de elasticidade menor como intermediário.

Para O'Regan *et al.* (2014), os suportes mecânicos podem ser divididos em suportes lineares, conexões por aperto e conexões aparafusadas. Desta forma, serão apresentadas a seguir as particularidades de cada um destes citados acima.

#### 2.4.1.1. Suportes lineares

Os suportes lineares (FIGURA 13) servem de apoio para o vidro ao longo de suas duas ou quadro arestas. Geralmente esse tipo de suporte é utilizado para painéis retangulares de vidro, como por exemplo, em pisos. Para transferir o peso próprio do vidro, são posicionadas na parte inferior das bordas do vidro blocos de fixação. Esses blocos podem ser de plástico e, alternativamente, de camadas de neoprene.

Esse conjunto de sistema é vedado por silicones ou por juntas de borracha de etileno propileno dieno - Ethylene Propylene Diene Terpolymer (EPDM). Observa-se

que para os sistemas verticais, como por exemplo em fachada cortina e pele de vidro, onde há a influência da ação do vento, são utilizados perfis de aperto, juntamente com juntas, como as citadas anteriormente, fazendo com que haja melhor rotação nos apoios.

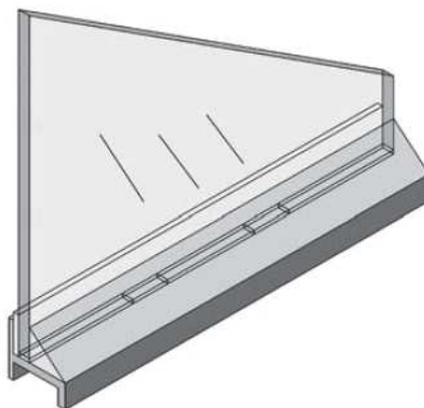


Figura 13 – Suporte linear com blocos de fixação

Fonte: (O'REGAN *et al.*, 2014).

Segundo Haldimann *et al.* (2008), pode-se afirmar que, mesmo não sendo muito comum, os suportes de borda do vidro também podem servir como transferência de carga para o vidro. Desta forma, torna-se necessário um maior cuidado no cálculo e construção, podendo assim envolver um sistema feito sob medida.

Sendo assim, destaca-se a importância dos materiais de camada intermediária para o melhor funcionamento das placas de vidro, fazendo com que não haja picos de tensão, o que levaria ao surgimento de falhas e posterior ruptura. Recomenda-se, desta forma, que haja um cuidado maior quando se trata das bordas do vidro, como por exemplo, verificar que as mesmas estejam chanfradas e polidas, entre outras situações que não permitam a concentração de tensão em suas arestas.

#### 2.4.1.2. Conexões por aperto

Os tipos de conexões por aperto, apresentam caráter estético melhor do que os suportes lineares, visto que são utilizados em pontos específicos e de forma mais discreta (FIGURA 14). O sistema, basicamente, consiste na utilização de placas de aço em ambos os lados da placa de vidro, havendo juntas entre elas, sendo ligadas através de parafusos, prendendo desta forma as placas de aço juntas.

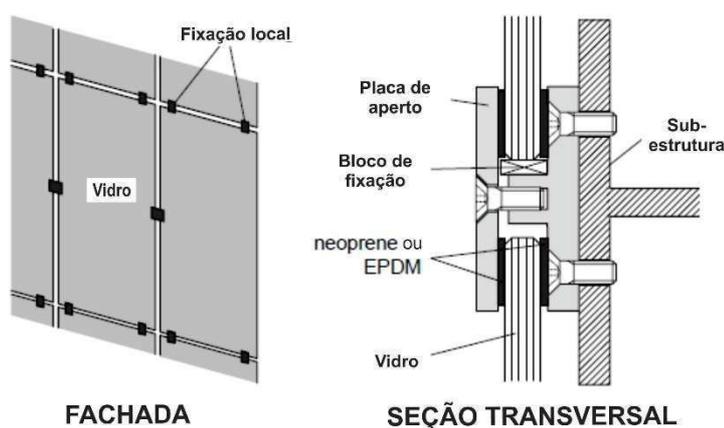


Figura 14 – Sistema de conexão por aperto

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

É interessante destacar que, esse sistema de conexão, também permite um melhor escoamento da água nas fachadas em vidro, visto que, comparado ao sistema linear, há menor saliência dos fixadores, contribuindo assim para a passagem da água sem maiores obstruções. Essas fixações trabalham, também, através do atrito, fazendo com que haja uma melhor dissipação de tensões.

Como assegura Haldimann *et al.* (2008), pode-se dizer que existem dois tipos de conexões por aperto:

- Conexões com grampos;
- Conexões aparafusadas.

As conexões com grampos, basicamente, têm o objetivo de dissipar as cargas advindas de forma perpendicular ao plano do vidro, como em fachadas de vidro sujeitas as ações do vento. Já as conexões aparafusadas, dissipam as cargas paralelas ao plano do vidro.

Deve-se ter especial cuidado ao projetar conexões de aperto em vidro laminado de segurança. Os materiais da camada intermediária do vidro de segurança laminado, como o PVB, são incapazes de suportar as forças de aperto induzidas pela conexão sem escoar, sofrendo grandes deformações de fluência que reduzem o pré-esforço ao longo do tempo. (HALDIMANN et al., 2008, p.145, tradução nossa).

Vê-se, pois, que se torna necessário a utilização de um material mais rígido e não viscoso, como folhas de alumínio, na região dos fixadores (FIGURA 15).

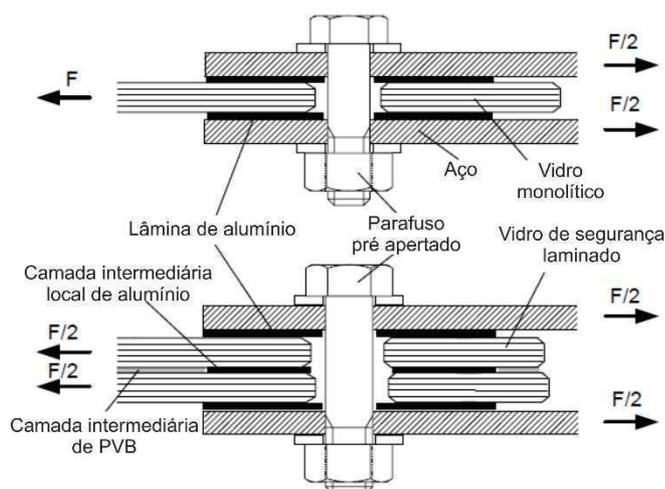


Figura 15 – Conexões típicas por atrito – vidro monolítico e laminado

Fonte: (adaptado de HALDIMANN et al., 2008).

Desta forma, pode-se observar que a força transmitida através do atrito das conexões, estão relacionados a diversos fatores, como por exemplo sua geometria, a rigidez dos materiais envolvidos, como também a capacidade de carga dos materiais a longo prazo.

#### 2.4.1.3 Conexões aparafusadas

As fixações aparafusadas são as mais utilizadas para a sustentação de vidros, pois proporcionam fachadas mais limpas e transparentes, diminuindo desta forma a predominância do aço. Contudo, esse tipo de conexão deve ser muito bem dimensionado, tendo em vista que, acarretam o surgimento de altas tensões localizadas. Por este motivo, deve-se ter maior cuidado no seu contato com o vidro, visto que o vidro não escoar como os outros materiais, sendo frágil e assim não podendo dissipar a concentração de tensão.

Segundo Schittich *et al.* (2007), as conexões aparafusadas podem ser de dois tipos:

- Conexões aparafusadas que atravessam o vidro e deixam saliência na parte externa (FIGURA 16.A);
- Conexões aparafusadas que atravessam o vidro sem deixar saliência na parte externa (FIGURA 16.B).

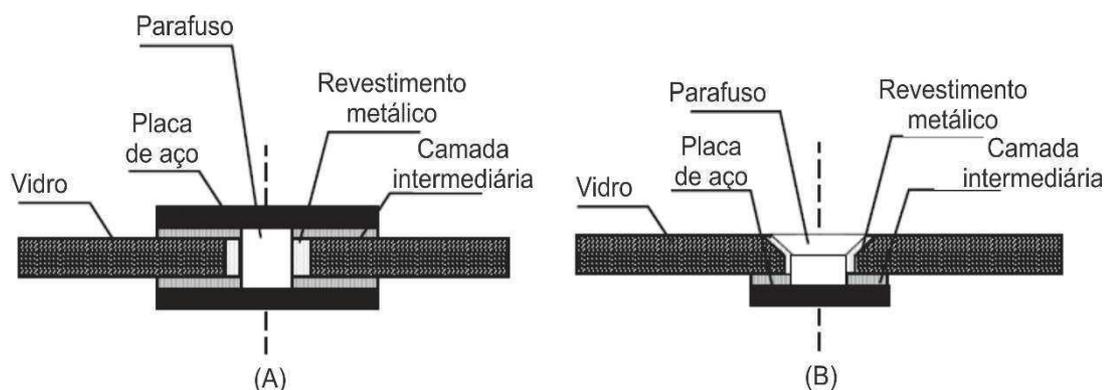


Figura 16 – Conexões aparafusadas com saliência (A) e sem saliência (B)

Fonte: (adaptado de MANIATIS, 2006).

As fixações que produzem saliência no lado exterior, são as mais aconselháveis ao uso, pois melhor distribuem as tensões que ocorrem no plano do vidro. Já as que não produzem saliência, não são capazes de distribuir tensões, servindo apenas como suporte.

Assim como citado em tópicos anteriores, esse tipo de fixação também não deve entrar em contato direto com o vidro, sendo necessário o uso de materiais intermediários, para desta forma proporcionar uma melhor distribuição de tensões, conforme Valarinho (2010, p.40):

Estes tipos de materiais devem ser suficientemente resistentes para que se mantenha a capacidade de transferência de cargas, de e para o vidro, e rígidos para que não deslizem para fora do furo. Contudo, devem ser suficientemente flexíveis para que permitam a adequada distribuição de tensões. Também não devem apresentar fluência, de forma a não diminuir a tensão de aperto do parafuso.

Pode-se dizer que os materiais intermediários mais utilizados são: alumínio, plástico (como o EPDM), POM (polioximetileno), poliamida, resina injetada ou argamassa.

O tipo de suporte, a geometria dos seus componentes, a qualidade das bordas e superfície do vidro, assim como o material da camada intermediária influencia a distribuição de tensões ao redor do furo. Devido à complexidade do cálculo do ponto de suporte do vidro, o cálculo usualmente é realizado através do método dos elementos finitos (FEM). (MANIATIS, 2006, p.23, tradução nossa).

É bem verdade que, torna-se difícil saber ao certo a distribuição de tensão ao redor do furo, por este motivo formulas simplificadas ou tabelas não conseguem fornecer estes parâmetros. Sendo assim, surgiu a necessidade de aplicação de modelos mais avançados, como o FEM.

É interessante destacar, um sistema muito utilizado de conexões aparafusadas, denominada por vidro exterior agrafado (VEA). Nesse sistema, os vidros são fixados por meio de grampos metálicos, conhecidos como “spiders”, ou em português, “aranhas” (FIGURA 17).

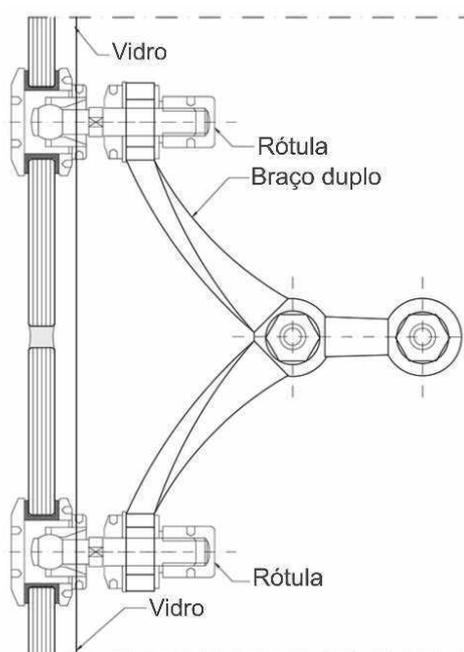


Figura 17 – Grampo metálico “spider”

Fonte: (adaptado de *Curtainwall FACADE Detailing*<sup>5</sup>).

Outro componente importante é a rótula, que tem por finalidade absorver as diferenças de dilatação e deformações que surgem através das tensões provenientes no decorrer da vida útil. As rótulas, por serem flexíveis, possibilitam o acompanhamento das diferentes movimentações da estrutura, como por exemplo em meio a um terremoto.

5: CURTAINWALL FACADE DETAILING. **Spider Glazing, Skylight detailing, Patch fitting.** Disponível em: <<https://www.curtainwallfacadedetailing.com/gallery-facade-curtainwall-structural-glazing-detailing.php>>. Acesso em: 29.set.2017.

Segundo Valarinho (2010), vale salientar que, devido à grande concentração de tensões nas conexões aparafusadas, os tipos de vidro recomendados são o termo endurecido ou o temperado, visto que o vidro float possui baixa resistência para esse tipo de condições.

Conclui-se, desta forma, que esse tipo de fixação requer um melhor estudo e reconhecimento das tensões nas redondezas dos parafusos, para que se tenha conhecimento do comportamento dessas estruturas. Por isso, o material de preenchimento da folga, entre o parafuso e o vidro, é de extrema importância para esta verificação.

#### **2.4.2. Conexões coladas**

As conexões coladas, podem ser constituídas por adesivos ou silicones estruturais. Este método de fixação produz a adesão entre o vidro e outro material, pelo qual é constituída a estrutura, fazendo com que haja uma melhor dissipação de tensões, evitando assim picos de tensões.

Os adesivos, por se tratarem de materiais poliméricos, possuem propriedades mecânicas e físicas ligadas ao tipo de polímero que será utilizado. O conhecimento destas propriedades é, como em todos os outros tipos de conexões, muito importante para entender o comportamento da estrutura como um todo.

De acordo com Haldimann *et al.* (2008), pode-se afirmar que existem dois tipos de conexões coladas:

- Conexões flexíveis de adesivo elástico (ex: silicone estrutural);
- Conexões de adesivos rígidos (ex: adesivos acrílicos).

Os adesivos rígidos, geralmente são utilizados para conexões híbridas, tendo sua importância nos materiais compósitos. Desta forma, os adesivos flexíveis são mais utilizados quando há a necessidade de transferir pequenas forças de cisalhamento, tração ou forças de momentos, também podendo ajudar na estabilização e reforço da estrutura.

É interessante destacar o comportamento mecânico dos adesivos sob carregamento a curto e a longo prazo e também quando submetidos a forças de

cisalhamento (Figura 18). Para adesivos sujeitos à cargas de curto prazo e pequenas tensões, a relação existente entre o módulo de cisalhamento ( $G$ ), a deformação por cisalhamento ( $\tan \gamma$ ) e a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), é compreendida da seguinte forma:

$$\tan \gamma = \frac{L}{d} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde,

$L$  é o deslocamento devido ao cisalhamento;

$d$  é a espessura do adesivo.

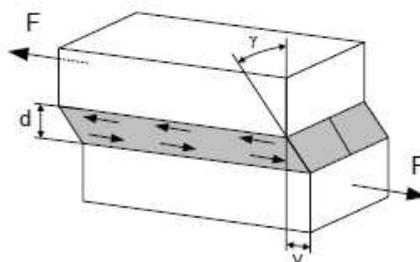


Figura 18 – Deformação do adesivo sob força de cisalhamento

Fonte: (HALDIMANN *et al.*, 2008).

Se tratando do comportamento a longo prazo, relacionado ao peso próprio, pode ser feita uma aproximação para a elasticidade em relação ao tempo ( $I$ ):

$$I = \frac{\tan \gamma}{\tau} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

#### 2.4.2.1 Conexões por silicone estrutural

O silicone estrutural trata-se de um plástico, inorgânico, derivado da sílica. Esse tipo de conexão resiste bem as variações de temperatura e aos raios ultravioletas. O

sistema de vidro estrutural com selante – *Structural Silicone Glazing (SSG)* é bastante utilizado em fachadas, formando uma parede de cortina de vidro, sendo utilizado como cola entre o vidro e a estrutura portante, ou até mesmo entre vidro e vidro.

Como nos afirma Haldimann *et al.* (2008), o silicone estrutural pode ser dividido em duas categorias: silicões de um componente e silicões de dois componentes. O silicone de um componente começa o processo de cura à medida que entra em contato com o ar, por este motivo, há um limite aplicado a sua geometria, requerendo uma espessura maior do que 6 mm e largura entre 15 e 20 mm. Em compensação, o selante de dois componentes tem seu processo de cura atrelado a reação entre ambos componentes (90% base e 10% catalizador), desta forma é recomendado uma espessura de no mínimo 6 mm e largura de no máximo 50 mm. Enquanto o silicone de um componente tem seu tempo de cura de aproximadamente três semanas (se a espessura for muito grossa, sua parte interior pode nunca curar completamente), o de dois componentes cura em menos de três dias.

É interessante destacar os tipos de ligações de silicões estruturais, que de acordo com o guia para aprovação técnica Europeia – *Guideline for European Technical Approval (ETAG 002:2012)* são basicamente quatro tipos construtivos (FIGURA 19).

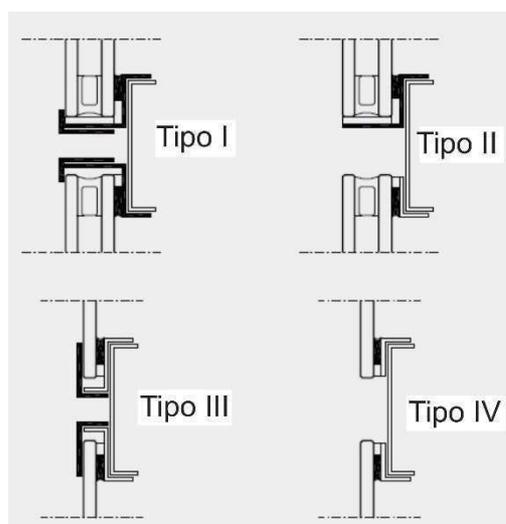


Figura 19 – Tipos de fachadas de sistema de vidro estrutural com selante (SSG) de acordo com o guia para aprovação técnica Europeia (ETAG 002:2012)

Fonte: (adaptado de WURM, 2007).

Para os tipos 1 e 2, apenas as cargas de vento a curto prazo são transferidas pelo adesivo, para os tipos 3 e 4, que são aprovados apenas para vidros simples, a carga residual permanente também é tomada pela ligação estrutural. Os tipos 1 e 3 possuem sistemas de segurança mecânica adicionais no caso de o adesivo falhar. (WURM, 2007, p.102, tradução nossa).

Vê-se, que também é necessário, independentemente do tipo, seguir as considerações construtivas, como exemplo, a geometria do silicone, sendo o mesmo aplicado na forma de granulo linear. O silicone também pode ser aplicado de forma descontínua, mas nunca pode haver bordas completamente livres (FIGURA 20). Para que as recomendações sejam completamente cumpridas, é fundamental que os selantes sejam aplicados na fábrica.

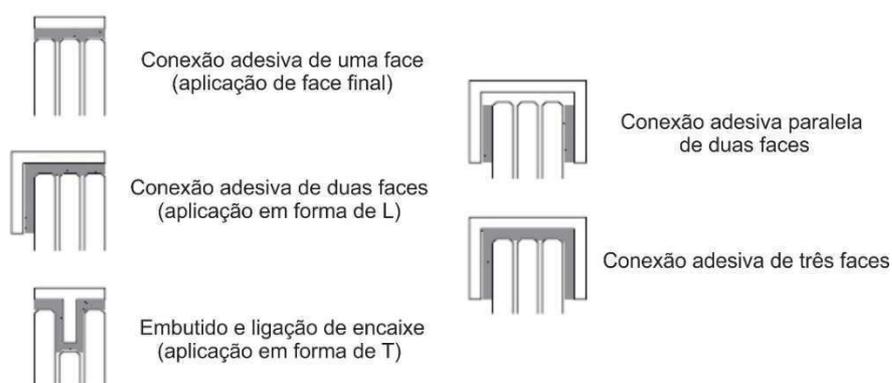


Figura 20 – Seção transversal de conexões adesivas

Fonte: (adaptado de WURM, 2007).

Segundo Haldimann *et al.* (2008), pode-se afirmar que o valor do coeficiente de Poisson (TABELA 04) do silicone, faz com que a geometria da junta influencie a rigidez do selante estrutural. Torna-se importante destacar que, o comportamento de carga depende da relação entre o comprimento de ligação na face e o comprimento de ligação lateral. Desta forma, a carga é transferida principalmente sobre a junção do lado da face que é submetida a tensão.

Desta forma, o silicone estrutural tem bom funcionamento sob tensões uniformes, mas não tão bom quando sujeitos a tensões de cisalhamento. Desta forma, também pode-se destacar que, quando submetidos a carregamento à longo prazo, eles se tornam menos resistentes. Conclui-se, ainda, a necessidade de estudos referentes ao comportamento desse tipo de conexões, através de experimentos e

testes, para que o mesmo possa ser utilizado de forma coerente, para cada tipo de adesão requerida.

Tabela 04 - Propriedades típicas de selantes estruturais de silicone (dados dos fabricantes).

TIPO DE TENSÃO	UNIDADE	VALOR
Tração admissível - cargas de curto prazo	MPa	0,14
Tração admissível - cargas de longo prazo	MPa	0,014
Cisalhamento admissível - cargas de curto prazo	MPa	0,07 - 0,128
Cisalhamento admissível - cargas de longo prazo	MPa	0,007 - 0,011
Módulo de Young - cargas de curto prazo	MPa	1,0 - 2,5
Deformação máxima admissível	%	± 12,5
Coeficiente de Poisson	-	0,49

Fonte: adaptado de HALDIMANN *et al.* (2008).

#### 2.4.2.2 Conexões por adesivos rígidos

Os adesivos rígidos começam a ganhar espaço na indústria da construção civil (FIGURA 21), visto que, sua maior aplicação se dá no âmbito das indústrias automotivas e aeronáuticas.

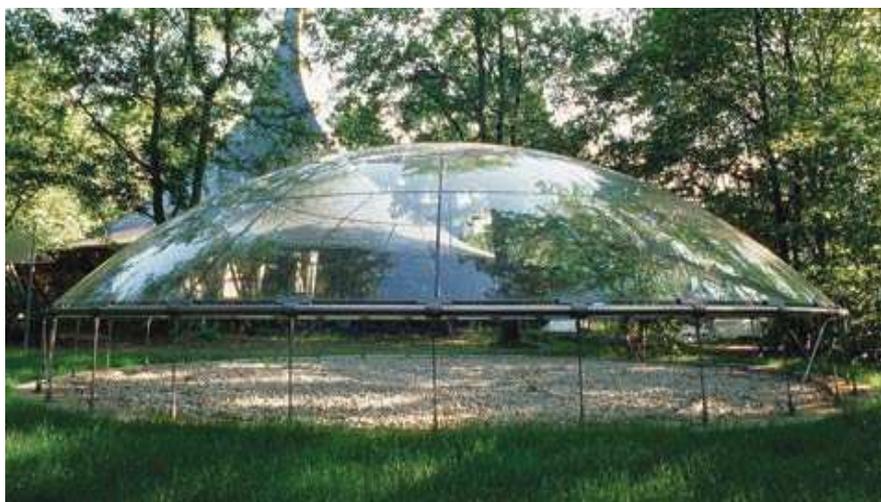


Figura 21 – Cúpula de vidro utilizando adesivo rígido – Universidade de Stuttgart, Alemanha

Fonte: (*Deutsche Bauzeitung*<sup>6</sup>)

6: DEUTSCHE BAUZEITUNG. **Hauchdünn und geklebt.** Disponível em: < <http://www.db-bauzeitung.de/allgemein/hauchduenn-und-geklebt/>>. Acesso em: 02.out.2017.

Esse tipo de ligação colada proporciona a utilização de juntas mais sutis, por apresentar melhor resistência quando comparada aos silicões estruturais. Exemplos desse tipo de adesivos são os de base epóxi e de base acrílica. Conforme Wurm (2007):

Em comparação com os silicões, os acrílicos são cerca de dez vezes mais fortes, mas têm menor resistência à temperatura e estabilidade à umidade. Mesmo com uma degradação de força de cerca de 30% após 42 dias na câmara climática, alguns acrílicos quase cumprem os requisitos de ETAG e, portanto, são adequados para uso externo.

A utilização dos adesivos rígidos deve, assim como os demais, seguir as recomendações construtivas. A superfície na qual o adesivo irá ser aplicado, a variação de temperatura, assim como seu tempo de cura e durabilidade, são parâmetros que devem ser devidamente avaliados, para desta forma se obter um desempenho máximo do produto.

A forma perimetral da junta adesiva também é uma importante consideração geométrica. Uma das desvantagens no uso de adesivos rígidos é a sua capacidade limitada para redistribuir as concentrações de tensões e absorver a deformação. Portanto, é necessário evitar singularidades geométricas e bordas afiadas dos aderentes: estas levam a concentrações de tensões e, em alguns casos, podem ser evitadas ao arredondar as arestas. (HALDIMANN *et al.*, 2008, p.159, tradução nossa).

Quando se refere à geometria do adesivo, pode-se relacionar a sua espessura e continuidade. Quando há variações na espessura das juntas, ou mesmo vazios estiverem presentes, podem causar concentrações indesejadas de tensões.

Segundo Haldimann *et al.* (2008), pode-se afirmar que, o intervalo da temperatura que o adesivo deve suportar, em toda a vida útil da estrutura, é de suma importância para compreender seu comportamento. Isso se dá devido a temperatura de transição vítrea do adesivo ( $T_g$ ). Se a temperatura estiver acima, pode causar a diminuição de rigidez e força, devido as movimentações na cadeia da macromolécula, desta forma, para impedir esse fenômeno, a temperatura deve sempre estar abaixo do  $T_g$ . Os adesivos epóxis, geralmente, têm  $T_g$  maiores do que os acrílicos, por isso são mais utilizados quando a estrutura está sujeita à altas temperaturas.

Vale salientar, a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a durabilidade desses adesivos. Atualmente, é mais comum obter essa informação

através de experimentos e testes, visto que não há uma base de conhecimento suficiente. Um dos fatores que pode influenciar na durabilidade dos adesivos são os ambientais (TABELA 05), principalmente a água. Segundo Mays e Hutchinson (1992):

A experiência demonstrou que os principais processos envolvidos na deterioração das articulações sujeitas à influência da umidade são (a) absorção de água pelo adesivo (b) adsorção de água na interface através do deslocamento do adesivo (c) corrosão ou deterioração da superfície do substrato.

A influência da água pode, em muitos casos, ser reversível. Se de alguma forma o desempenho mecânico dos adesivos foi prejudicado ou alterado pela ação da água, após sua secagem suas propriedades são recuperadas. Como mencionado anteriormente, o Tg tem grande influência no desempenho do adesivo, percebe-se que quanto maior for o seu valor, maior sua absorção de água. Desta forma, os adesivos à base de borracha absorvem água em maior quantidade do que os adesivos rígidos. (Mays e Hutchinson, 1992).

Tabela 05 - Parâmetros que afetam a durabilidade ambiental

AGENTE	EFEITO
Água	Atividade, concentrações de ligação, pH e íons solúveis agressivos. Se absorvido por adesivo, pode plastificar e endurecer.
Temperatura	Taxa de degradação promovida por temperatura elevada; também efeitos de deformação. Pode ajudar a pós-cura e pode plastificar e endurecer o adesivo curado.
Pré-tratamento da superfície	Um fator muito importante. Específico para aderentes particulares e, às vezes, o adesivo. Natureza do prime (se aplicável). Condições de ligação.
Design da junta	As concentrações de tensão / forças de tração em ou perto da interface revelam sensibilidade para o ataque ambiental.
Tempo	Duração da exposição, aplicação de tensão e viscoelasticidade adesiva.

Fonte: adaptado de Mays e Hutchinson (1992).

Por todas estas razões, fica claro a necessidade de se conhecer melhor os mecanismos das conexões para o vidro, visto que as propriedades conhecidas são adaptadas das conexões de aço e madeira. Com o crescimento notável do uso de estruturas de vidro, é necessário a formulação de novas conexões que se adequem perfeitamente ao que é requerido nestes tipos de estruturas, visto as particularidades do vidro de uma forma geral.

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE VIDRO

Por meio do tipo de carregamento e também da sua importância estrutural, os elementos estruturais de vidro podem ser divididos em duas categorias: elementos primários e elementos secundários. Os elementos primários se referem àqueles que recebem carregamento de outros componentes da estrutura além do carregamento no próprio plano, como exemplo temos as colunas e vigas de vidro. Quando se trata de elementos secundários, são aqueles que não recebem carregamento de outros elementos, apenas no próprio plano, como exemplo painéis de vidro sem moldura.

Segundo Feldmann *et al.* (2014), quando se refere à elementos primários de estruturas de vidro, pode-se afirmar que as normas e códigos são deixados para trás, pois, além de ser necessário fazer avaliações de capacidade de carga, deve-se considerar uma robustez com requisitos mais avançados do que para os elementos secundários, e até agora as normas vigentes não adentram nesta parte. As características de robustez e também a tolerância a danos dos elementos estruturais primários podem estar relacionados a: redundâncias da estrutura geral, redundâncias da seção transversal, proteção contra impactos, prevenção no contato do vidro com o aço ou contato com materiais duros e proteção de pessoas contra fragmentos e estilhaços.

Por exemplo, para elementos secundários que não são nem acessíveis nem vidros de segurança, as capacidades residuais devem ser tais, que a retenção suficiente pode ser assegurada após a quebra não programada de um painel de vidro ou camadas dele. Assim, a capacidade residual depende da: composição e resistência da seção de vidro, suporte e conceito de suporte, cenário de falha. (FELDMANN *et al.*, 2014, p.62, tradução nossa).

Diante disto, quando se refere à resistência da seção, o vidro *float* possui baixa capacidade residual, pois, como falado anteriormente, o vidro comum precisa passar

por tratamentos para, desta forma, conseguir atingir melhores propriedades mecânicas, conferindo assim ao vidro laminado de segurança seções mais adequadas. Em relação aos suportes, devem ser adequados para que, se houver a ruptura do vidro, seus fragmentos não tenham força suficiente para arrancá-los da estrutura. Da mesma forma, se houver a falha do vidro, deve-se manter a integridade dos transeuntes, portanto, deve impedir as lesões que possam ser causadas pelos fragmentos.

## **2.6 NORMAS PARA ENSAIOS E DIMENSIONAMENTO**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), dispõe de normas que podem auxiliar ensaios e dimensionamentos de vidros na construção civil, mas em relação ao vidro estrutural, há apenas algumas considerações para a classificação do vidro de segurança laminado. Desta forma, deve-se recorrer à normas internacionais para auxiliar no desenvolvimento deste tipo de projeto estrutural. As normas são dedicadas a contribuir para um dimensionamento baseado no comportamento do vidro, tendo em vista modelos mais exatos e confiáveis.

Segundo Valarinho (2010), pode-se afirmar que as normas atuantes do vidro se dividem em três partes:

- Normas de certificação de produto;
- Normas de ensaio e caracterização do material;
- Normas para dimensionamento.

As normas de certificação, como o próprio nome já diz, servem para garantir a qualidade do vidro em si, como processos de fabricação, uniformização e obtenção de características requeridas. O segundo grupo de normas, visa informar métodos de ensaio que possibilitem um maior auxílio na obtenção de características mecânicas do material, em exemplo a resistência à tração. Finalmente, há o grupo responsável por auxiliar no dimensionamento de estruturas de vidro, onde se obtêm informações necessárias para que se possa, de forma correta, retirar dados necessários para projetar esses tipos de estruturas. O ANEXO I traz as principais normas, nacionais e internacionais, acerca do vidro.

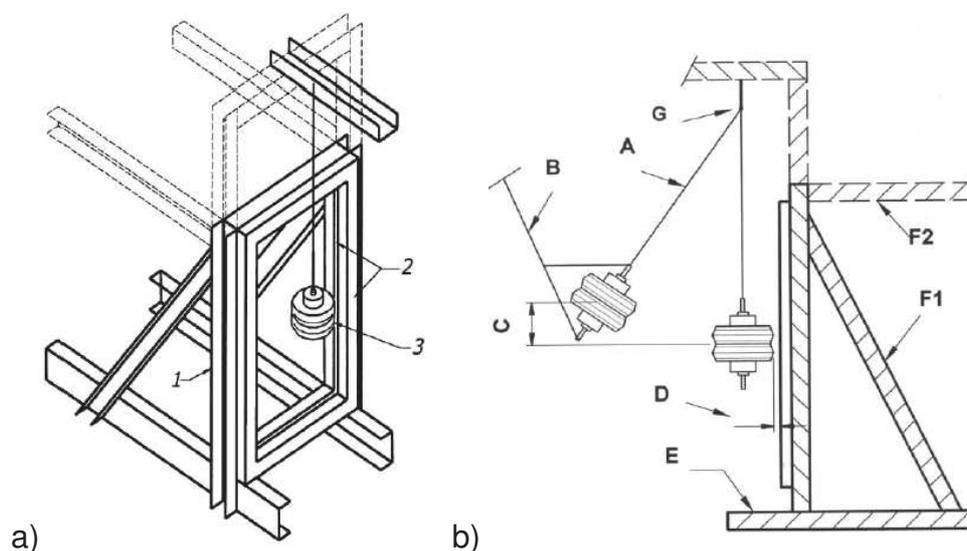
## 2.6.1 Normas para ensaios

Nesse quesito, tanto normas nacionais como internacionais podem ser mencionadas, como suporte para obtenção de dados relativos às propriedades mecânicas do vidro. Dentre elas, serão citadas as mais importantes.

### 2.6.1.1 ABNT NBR 14697

A ABNT NBR 14697:2001: Vidro Laminado, especifica os requisitos gerais, métodos de ensaios e cuidados para que haja segurança e durabilidade na utilização de vidros laminados, trazendo também uma metodologia que tem por finalidade classificar o vidro laminado de segurança. Como o vidro utilizado para fins estruturais é o laminado de segurança, esse método classificatório é importante ser destacado.

O ensaio (teste de impacto de pêndulo) é feito com um equipamento que consiste, basicamente, de um sistema de fixação, impactor e sistema de sustentação (FIGURA 22). O corpo de prova deve ser de largura de 876 mm ( $\pm 2$  mm) e altura de 1938 mm ( $\pm 2$  mm).



- a) 1. Dispositivo principal; 2. Sistema de fixação; 3. Impactor.  
 b) A. Cabo de aço de sustentação; B. Cabo de tracionamento; C. Diferencial de altura para a liberação do impactor; D. Distância do impactor ao corpo de prova ( $5 \text{ mm} \leq D \leq 15 \text{ mm}$ ); E. Barras estruturais; F1. Elemento de suporte; F2. Elemento opcional de suporte; G. Suporte de fixação.

Figura 22 – Dispositivo de ensaio

Fonte: (ABNT NBR 14697:2001).

O diferencial de altura para a liberação do impactor são apresentadas em três níveis diferentes (TABELA 06), podendo assim no final do teste, encontrar a classificação do vidro.

Tabela 06 – Níveis de impacto e classificação

CLASSIFICAÇÃO	DIFERENCIAL DE ALTURA (mm)
Classe 3	200
Classe 2	450
Classe 1	1200

Fonte: ABNT NBR 14697:2001

### 2.6.1.2 EN 356

A EN 356:1999: *Glass in building - Security glazing - Testing and classification of resistance against manual attack*, é a norma europeia que especifica requisitos e métodos de teste para vidros de segurança projetadas para resistir a ações de força. Esta norma apresenta dois tipos de ensaios:

- Ensaio de queda: Neste ensaio, uma esfera metálica é lançada a uma certa altura. A altura de lançamento irá determinar em qual categoria o vidro se encontra. O corpo de prova é dito da categoria x, caso a altura dessa categoria, após três impactos subsequentes, não haja penetração da esfera.
- Ensaio de martelo: Nesse ensaio, a cabeça de um martelo é lançada, mecanicamente, contra o vidro, podendo medir a velocidade de lançamento. A categoria do vidro está relacionada a quantidade de pancadas necessárias para penetrar o vidro, o tipo da cabeça de martelo e a velocidade de impacto.

### 2.6.1.3 EN 12600

A EN 12600:2002: *Glass in building - Pendulum test - Impact test method and classification for flat glass*, especifica um método de teste de impacto pendular para painéis de vidro simples para uso em edifícios. O teste destina-se a classificar produtos de vidro plano em três classes principais por desempenho sob impacto e pelo modo de quebra.

Essa norma retrata o mesmo método de classificação e ensaio da ABNT NBR 14697:2001, mencionada anteriormente.

## **2.6.2 Normas para dimensionamento**

Como mencionado anteriormente, não existem normas nacionais que englobam o dimensionamento de vidros como estruturas autoportantes, apenas englobam algumas considerações sobre o vidro laminado de segurança, sendo necessário recorrer as normas internacionais. Todavia, as normas internacionais também têm suas limitações, sendo em sua maioria voltada ao dimensionamento de painéis retangulares, apoiados linearmente em seus bordos e sujeito a carregamento uniforme.

### **2.6.2.1 ABNT NBR 7199**

A NBR 7199:2016: Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações, traz logo em escopo que, as fórmulas apresentadas não se aplicam para projetos de vidros estruturais. Todavia, esta norma especifica os critérios de dimensionamento de vidros laminados, que podem ser usados na vertical ou inclinados. Dentre as recomendações desta norma, para nosso estudo atual, é interessante destacar as considerações feitas para o piso em vidro, que de acordo com o item 4.8.2.8 da presente norma, para seu cálculo e aplicação:

- Quando o piso não estiver com sua superfície totalmente apoiada, deve-se utilizar vidros de segurança laminados ou laminado temperado;
- Utilização de um apoio mínimo nas bordas de 1,5 vez a espessura total do piso para sustentação do mesmo (FIGURA 23);
- Utilização de calços de fundo e lateral, de forma que o vidro não toque diretamente na estrutura que o sustenta;
- No caso de ruptura de uma das lâminas de vidro, a estrutura remanescente deve suportar a carga pelo tempo necessário para que a área seja evacuada e isolada até a substituição da composição.

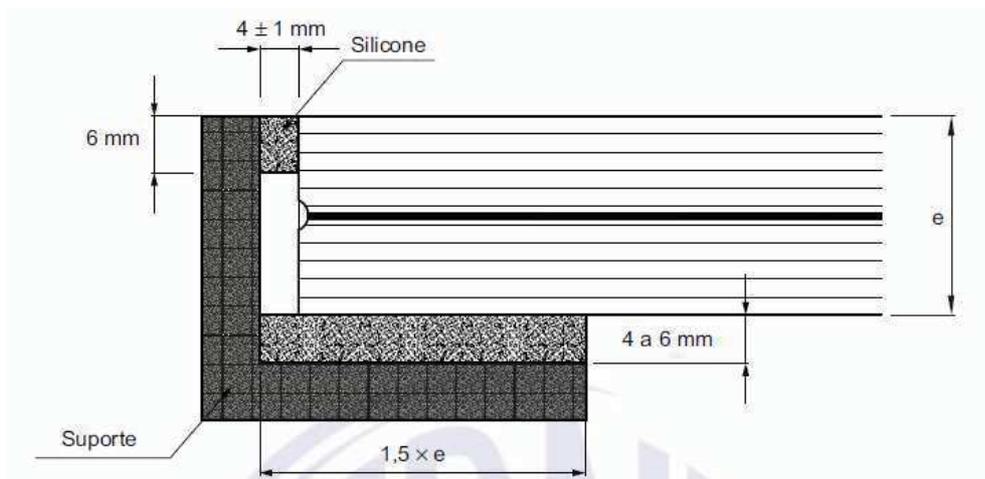


Figura 23 – Área de apoio para piso de vidro

Fonte: (ABNT NBR 7199:2016).

A norma ainda fornece informações sobre os esforços solicitantes e exemplos de cálculos de vidro laminado, tanto na vertical como inclinado.

### 2.6.2.2 DIN 18008

A norma alemã DIN 18008:2010: *Glass in building - Design and construction rules*, fornece regras para projeto e construção, bem como especificações para verificações experimentais necessárias, compreendendo capacidade de carga, a permanência do posicionamento e a usabilidade das estruturas de vidro sob a ação planejada. Entre outros, são descritos o conceito de segurança, as ações, o cálculo de tensões e flechas, de capacidade de carga e facilidade de uso, bem como a capacidade de carga residual. A última cláusula da norma lida com diretrizes gerais de projeto, por exemplo, espessura de vidro, suporte de vidro e particularidades de perfuração de vidro.

### 2.6.2.3 ASTM E1300

A norma americana ASTM E1300:2003: *Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*, descreve procedimentos para determinar a resistência ao carregamento de cada tipo de vidro, podendo ser expostos a cargas de curta ou longa duração, através de uma específica probabilidade de quebra.

Essa norma se atém a placas de vidro utilizadas na vertical ou inclinadas, com geometria retangular e suporte linear em pelo menos uma borda, sujeitas a ação do vento, neve e peso próprio. A resistência pode ser obtida através de dois processos: procedimento básico e procedimento analítico. Ambos processos são definidos através do tipo de vidro e condição de apoio, seguindo passos que envolvem a entrada de dados em gráficos e tabelas.

A ASTM E1300:2003 apresenta um método para determinar a espessura efetiva do vidro laminado (duas lâminas), para a análise de tensões e flechas. Para definir as espessuras (uma relativa ao cálculo de tensões e outra ao cálculo das flechas), segue-se os seguintes passos:

- Cálculo do coeficiente de transferência de cisalhamento ( $\zeta$ )

O coeficiente  $\zeta$  é uma medida da transferência da tensão de cisalhamento através da camada intermediária. Seu valor é dado através de:

$$\zeta = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{E_{\text{vidro}} I_s h_v}{G_{\text{inter}} h_s^2 a^2}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

com:

$$I_s = h_1 h_{s2}^2 + h_2 h_{s1}^2 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$h_{s1} = \frac{h_s h_1}{h_1 + h_2} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$h_{s2} = \frac{h_s h_2}{h_1 + h_2} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$h_s = 0.5 (h_1 + h_2) + h_v \quad (\text{Eq. 2.9})$$

onde:

$h_v$  é a espessura da camada intermediária;

$I_s$  é porção do momento de inercia de uma seção transversal;

$h_1$  e  $h_2$  são as espessuras mínimas (TABELA 07) da lâmina 1 e 2;

$E_{\text{vidro}}$  é o módulo de elasticidade do vidro;

$A$  é a menor dimensão da placa de vidro;

$G_{inter}$  é o módulo de cisalhamento da camada intermediária.

Tabela 07 – Espessura nominal e mínima do vidro

Espessura Nominal (mm)	Espessura mínima (mm)
2,0	1,80
2,5	2,16
2,7	2,59
3,0	2,92
4,0	3,78
5,0	4,57
6,0	5,56
8,0	7,42
10,0	9,02
12,0	11,91
16,0	15,09
19,0	18,26
22,0	21,44
25,0	24,61

Fonte: ASTM E1300, 2016.

É importante destacar, que o módulo de transferência do cisalhamento varia de 0 a 1.

- Cálculo da espessura efetiva para a flecha ( $h_{ef,w}$ )

Para se obter as deflexões no vidro, deve-se calcular uma espessura efetiva, que se dar como:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12\zeta I_s} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

- Cálculo da espessura efetiva para a tensão ( $h_{ef,\sigma}$ )

Para se obter as tensões no vidro, deve-se calcular uma espessura efetiva, para cada lâmina:

$$h_{1ef,\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1 + 2\zeta h_{s2}}} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$h_{2ef,\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1 + 2\zeta h_{s1}}} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

#### 2.6.2.4 ASTM E2751

Mais uma designação da ASTM, a E2751M:2017: *Design and Performance of Supported Laminated Glass Walkways*, contribui com o dimensionamento do vidro, abordando elementos relacionados à carga em passarelas e escadas de vidro, construídas com vidro laminado. Nesta norma pode-se encontrar desempenho, design e considerações para um comportamento seguro. Abordando características únicas para vidro e vidro laminado, como a resistência ao deslizamento.

A norma traz procedimento de cálculo, métodos de testes para verificação do comportamento após a quebra, assim como, sistema de suporte estrutural e durabilidade. Esta norma não aborda passarelas de vidro construídas com vidro monolítico, bloco de vidro, unidades de vidro isolante, ladrilhos de vidro que estão diretamente ligados a um substrato estrutural sem vidro ou passarelas de vidro destinadas a suportar o tráfego de veículos.

De acordo com a presente norma, para se determinar o cálculo das tensões e deflexões, além das cargas atuantes na estrutura, é necessário a aplicação de uma carga de pelo menos 1,36 KN em todas as superfícies das passarelas de vidro, numa área de 2600 mm<sup>2</sup>. As tensões admissíveis (TABELA 08), permitem se ter uma base para comparação das tensões resultantes de cálculo.

Tabela 08 – Tensões admissíveis para o vidro

Tipo de Vidro	3sec MPa	10min MPa	60min MPa	Permanente MPa
Float	18,3	13,2	11,7	5,7
Termo endurecido	36,5	30,9	29,2	20,3
Temperado	73,0	65,3	63,0	49,4

Fonte: ASTM E2751: 2017.

### 2.6.2.5 AS 1288

A norma australiana AS 1288:2006: *Glass in buildings – Selection and installation*, traz procedimentos para selecionar os tipos de vidros, sujeitos ao vento, impacto humano e aplicações especiais, tais como os vidros elevados e corrimão. Essa norma está subdividida em seções, abordando os tipos de carregamento aos quais o vidro está exposto, assim como o cálculo do estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS). Toda a norma é baseada em fórmulas, tabelas e gráficos, que irão depender do tipo de vidro e sua forma de apoio.

## 2.7 METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO

Neste trabalho duas metodologias foram aplicadas para o dimensionamento: o método das tensões admissíveis e a limitação de flechas.

### 2.7.1 Tensões admissíveis

O método baseado na tensão admissível é bastante utilizado no pré-dimensionamento de estruturas de vidro, podendo através de programas de elementos finitos verificar essas tensões atuantes. Essa determinação se dá da seguinte forma:

$$\sigma \leq \sigma_{ADM} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

onde,

$\sigma$  é a tensão máxima aplicada na estrutura, mediante as cargas atuantes no cenário mais desfavorável;

$\sigma_{ADM}$  é a tensão admissível do vidro, valor característico obtido experimentalmente.

### 2.7.2 Limitação de flechas

Segundo Valarinho (2010), pode-se afirmar que, por possuir módulo de elasticidade reduzido, o vidro pode apresentar flechas excessivas, sendo desta forma importante ter uma base sobre o limite de deslocamento. Para vidros utilizados em

fachadas, pode-se ser considerado uma flecha de no máximo 1/50 do vão. Devido a utilização do vidro, sua flecha excessiva, mesmo que não cause ruptura, pode trazer desconforto para o usuário, por esse motivo pode ser recomendado uma flecha máxima ( $\delta$ ) de 1/200 ou 1/125 do vão, não ultrapassando 15 mm.

### 3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO VIDRO PARA FINS ESTRUTURAIS

Tendo em vista a importância de ensaios de caracterização na Engenharia Civil, neste trabalho foi realizado um ensaio não destrutivo, por meio da medição das frequências de ressonância flexional, de duas amostras de vidro, usando o método de excitação por impulso (FIGURA 24). Neste método o corpo de prova é submetido a um impacto de curta duração, respondendo por meio de frequências naturais de vibração, de acordo com as condições de contorno adotadas. A norma seguida para esse ensaio foi a ASTM E1876:2015: *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*.

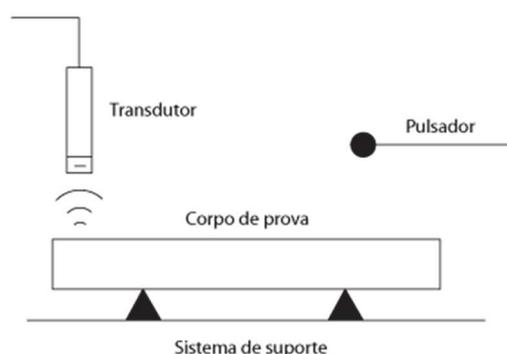


Figura 24 – Esquema básico do posicionamento da amostra para a medição das frequências de ressonância flexional

Fonte: (ATCP Engenharia Física<sup>7</sup>)

O pulsador é o equipamento que aplica o impacto no corpo de prova, gerando desta forma as vibrações mecânicas, sem danificar a amostra. O transdutor é o aparelho que capta a resposta acústica, transformando em sinal elétrico, para que se possa ler as frequências de ressonância.

Para este trabalho, foram utilizados dois corpos de prova. O primeiro (FIGURA 25.A), foi uma placa de vidro comum (*float*) com 150 x 150 x 10 mm, cuja massa medida foi de 564,70 gramas. A segunda amostra (FIGURA 25.B), foi uma placa de vidro laminado comum (duas lâminas de vidro *float* com uma camada intermediária de polivinil butiral (PVB) de 1,52 milímetros), com dimensões de 500 x 500 x 20 mm e massa igual a 12,755 kg.

7: ATCP ENGENHARIA FÍSICA. **Métodos de Caracterização**. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/modulos-elasticos/metodos-caracterizacao-.html>>. Acesso em: 03.nov.2017

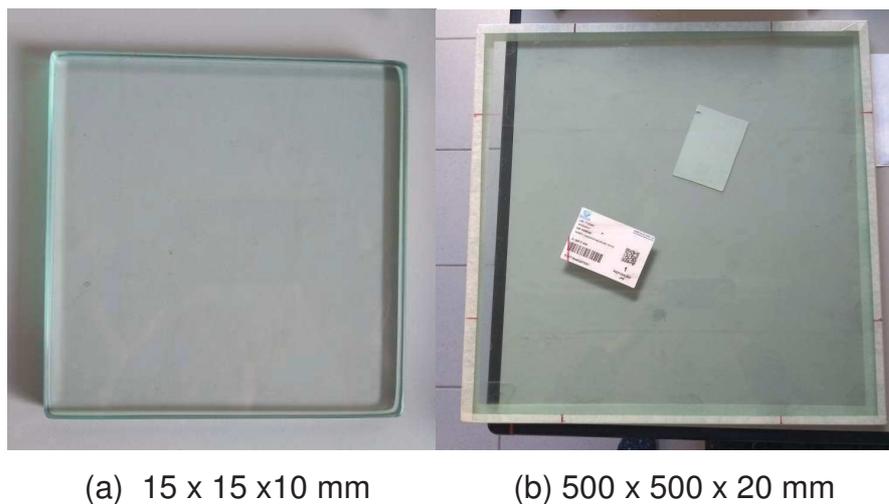


Figura 25 – Corpos de prova

Fonte: (Elaborada pela autora).

As placas de vidro foram divididas em faixas para que desta forma fizessem analogia a elementos em barras. Segundo Cossolino e Pereira (2010), para a vibração flexional em barras, há uma série de nós (pontos de amplitude zero) e anti-nós ou ventres (pontos de amplitude máxima) ao longo da barra apoiada livremente. Na menor frequência de ressonância fundamental, estes pontos nodais se localizam a  $0,244L$  ( $L$  sendo o comprimento da barra) de cada extremidade, com os anti-nós ou ventres encontrados no centro e em cada extremidade. Desta forma, para as placas de vidro foram encontradas linhas nodais e anti-nodais. O ensaio foi realizado (FIGURA 26) apoiando os corpos de prova nas linhas nodais e aplicando o impulso no meio das placas, linha de maior amplitude da forma modal.



Figura 26 – Realização do ensaio pelo método de excitação por impulso

Fonte: (Elaborada pela autora).

Neste trabalho, a resposta acústica foi adquirida por um captador acústico (microfone) e processada pelo *software* Sonelastic®. Antes de capturar as frequências, na sua interface (FIGURA 27) são solicitados dados referentes à geometria do corpo de prova, assim como sua massa. Ao capturar as frequências naturais de vibração (figuras 28 e 29) são fornecidos pelo *software* os valores para os módulos de elasticidade e amortecimento do material (TABELA 09).

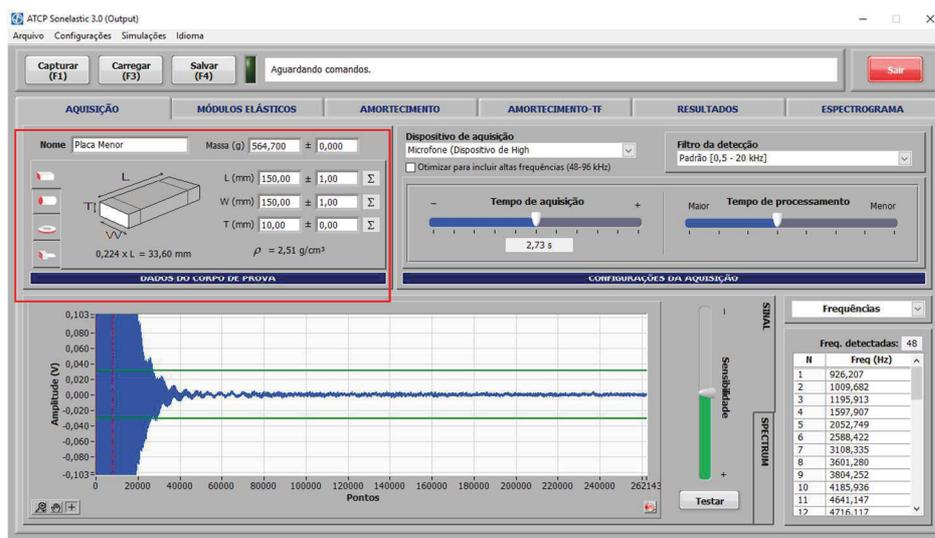


Figura 27 – Interface do *software* Sonelastic®

Fonte: (Print Screen do *software* Sonelastic®)

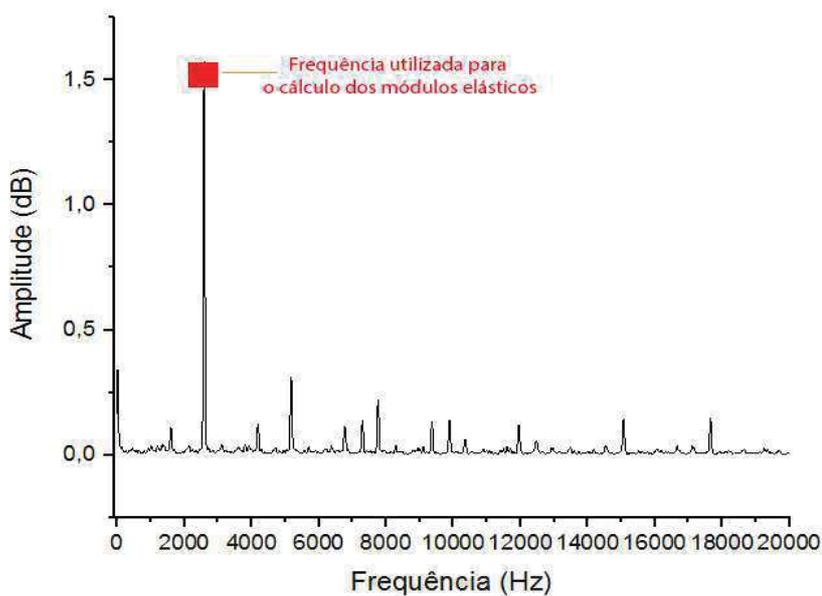


Figura 28 – Frequência de vibração natural do vidro comum (amostra a)

Fonte: (*Software* Sonelastic®, 2017)

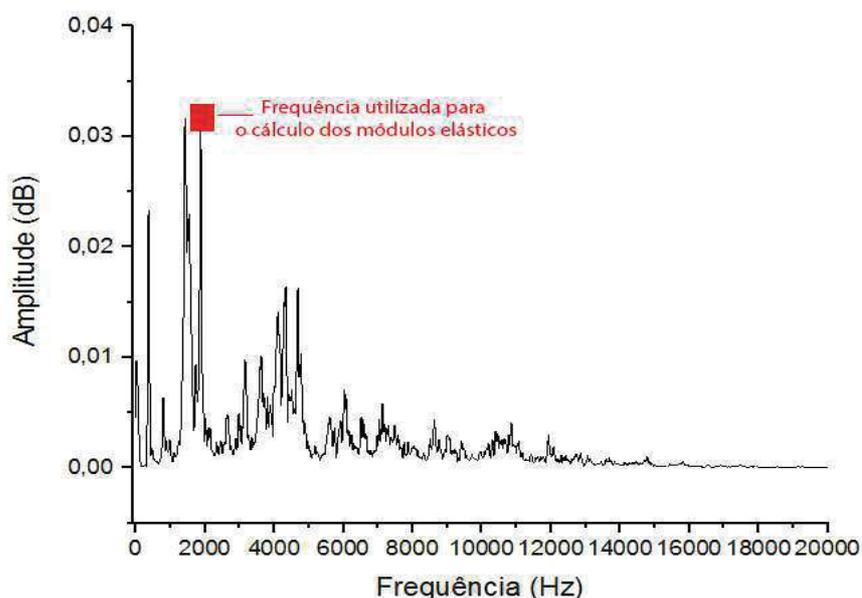


Figura 29 – Frequência de vibração natural do vidro laminado (amostra b)

Fonte: (Software Sonelastic®, 2017)

Tabela 09 – Resultados obtidos pelo Sonelastic®

Amostra	Frequência (Hz)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson*	Amortecimento
a	2588,40	83,06	0,23	0,000730
b	1866,70	50,61	0,23	0,018108

\*adotado

Nos resultados apresentados na TABELA 09, percebe-se que a placa de vidro laminado (amostra b) possui um coeficiente de amortecimento maior do que a placa de vidro comum. Isto deve-se, provavelmente, ao fato do vidro laminado possuir uma camada de PVB que promove uma redução de ruídos por meio do amortecimento das vibrações sonoras. Em relação ao módulo de elasticidade, como mencionado no Capítulo 2, tem-se como base teórica o valor de 70 GPa. O valor encontrado para o vidro laminado (amostra b) foi inferior ao do vidro comum (amostra a), como pode ser observado na TABELA 09. Pode-se entender, neste caso, que sua curva tensão x deformação no regime elástico será mais abatida, indicando que a amostra (b) irá se deformar mais antes de sua ruptura. Essa avaliação é teórica, e como o vidro laminado

é um compósito e os corpos de prova possuem geometrias diferentes, seria necessária a realização de outros tipos de análise, como, por exemplo, ensaios de ruptura, a fim de validar o módulo encontrado.

## 4. ESTUDO DE CASO PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO VIDRO ESTRUTURAL

No Capítulo 2 foram apresentadas as principais normas para dimensionamento do vidro estrutural, assim como os tipos de vidro e conexões mais utilizados nessa área. Após obter essa base, o próximo passo foi realizar um estudo de caso, apresentando o dimensionamento de uma passarela de vidro.

### 4.1 ESTUDO DE CASO

Percebe-se que a utilização de pisos de vidros vem se tornando algo inovador na construção civil, fazendo com que a arquitetura se torne cada vez mais moderna e atraente. O fato é que além do vidro conferir uma imagem fascinante e diferente, traz modernidade, leveza e sofisticação. O estudo de caso desenvolvido neste trabalho envolve o dimensionamento de uma passarela de vidro, ligando os blocos CTJ e CTM do Centro de Tecnologia desta Universidade, como mostrado nas figuras 30 a 32, apresentando uma combinação de estética e funcionalidade.



Figura 30 – Passarela de vidro (vista 1)

Fonte: (Elaborada pela autora).



Figura 31 – Passarela de vidro (vista 2)

Fonte: (Elaborada pela autora).



Figura 32 – Passarela de vidro (vista 3)

Fonte: (Elaborada pela autora).

A passarela possui 14 m de comprimento e é formada por sete placas de vidro de dimensões 1,50 x 2,00 m. As placas de vidro estão simplesmente apoiadas em

todas as suas bordas através de perfis metálicos (FIGURA 33). Entre o perfil metálico e o vidro foi considerada uma camada de neoprene de 2 mm de espessura (FIGURA 34) para que não houvesse o contato direto entre os materiais, evitando assim picos de tensões. As placas de vidros são coladas através da aplicação de silicone estrutural.

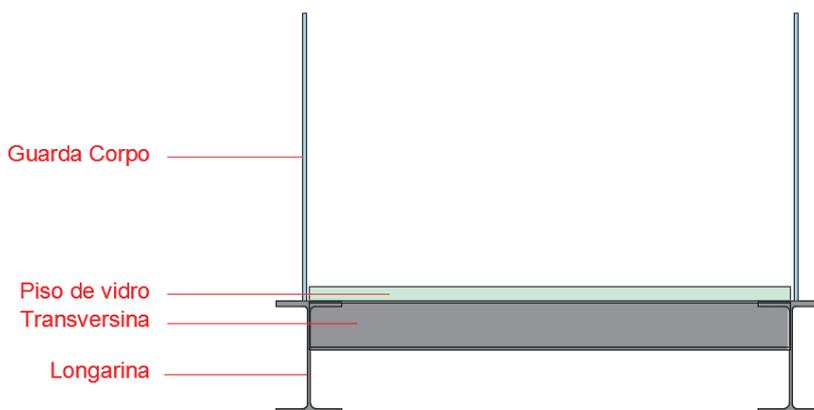


Figura 33 – Seção transversal da passarela

Fonte: (Elaborada pela autora).

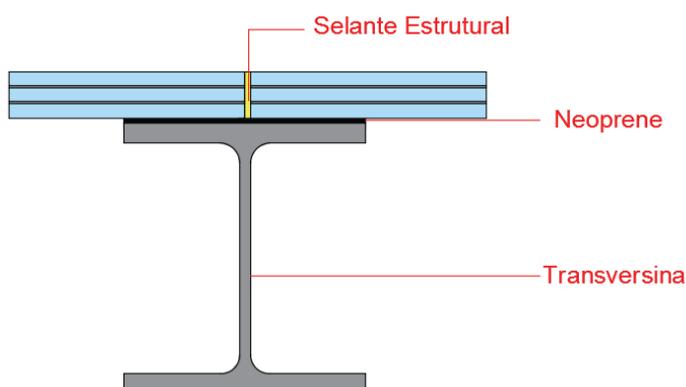


Figura 34 – Detalhamento das ligações do piso

Fonte: (Elaborada pela autora).

Segundo a ASTM F1637:2013: *Standard Practice for Safe Walking Surfaces*, as superfícies da passarela devem ser antiderrapantes. Desta forma, o piso poderá

receber uma pintura com adesivo abrasivo sendo feita uma texturização para que a superfície seja resistente ao deslizamento. Outra solução seria a aplicação de um acabamento lixado à superfície externa do piso de vidro para criar uma superfície mais áspera. Vale a pena destacar que também existem vidros antiderrapantes e sua demanda em áreas de pedestres tem aumentado constantemente nos últimos anos (FIGURA 35). Suas qualidades notáveis em transmissão de luz e estética contribuem para que esses vidros possam ser utilizados como parte das camadas de vidro laminado.



Figura 35 – Vidro antiderrapante

Fonte: (*Walker Textures*<sup>®</sup>).

#### 4.1.1 Dimensionamento do piso de vidro

O piso de vidro foi dimensionado por meio de processos analíticos, utilizando pacotes computacionais baseados no método dos elementos finitos e, ainda, respeitando as normas ASTM E2751M:2017 e ASTM E1300:2003, ambas mencionadas anteriormente. Os pacotes computacionais utilizados para estudo de tensões e deflexões máximas foram:

- SAP2000;
- Autodesk Robot;
- SJ MEPLA<sup>®</sup>.

8: WALKER TEXTURES. **Anti-slip glass**. Disponível em: < <http://walkerglass.com/products/anti-slip-glass/>>. Acesso em: 27.nov.2017.

Tendo em vista que não há uma determinação por norma do tipo de vidro a ser utilizado na composição do laminado, foi escolhido para esse estudo o vidro laminado de termo endurecido, visto que o mesmo é o mais apropriado, combinando suas propriedades mecânicas para resistência à solicitação de carregamentos e a seu comportamento pós-ruptura, como mencionado no Capítulo 2. A película utilizada, como camada intermediária, será de polivinil butiral (PVB), fazendo-se posteriormente algumas considerações aplicando SentryGlas® (SGP). Para o dimensionamento do piso de vidro (placa de 1,50 x 2,00 m), as ações consideradas foram:

- Peso Próprio (pp);
- Sobrecarga uniformemente distribuída:  $q_x = 7 \text{ kN/m}^2$ ;
- Sobrecarga concentrada:  $Q_x = 1,36 \text{ kN}$ ;

Por não se encontrar um valor definido por norma, relativo a sobrecarga uniformemente distribuída, o valor de  $7 \text{ kN/m}^2$  foi tomado como base através do dimensionamento da ponte de vidro do *Grand Canyon*<sup>9</sup>. A ASTM E2751M:2017, estipula um valor mínimo de carga concentrada a ser adotada, de  $1,36 \text{ kN}$  a ser introduzida em uma das suas bordas, visto que o dano da superfície é geralmente mais severo nas bordas do vidro que estão sujeitas a graves danos durante a vida útil, como exemplo à impactos acidentais, devendo ser considerado para o projeto (FIGURA 36).

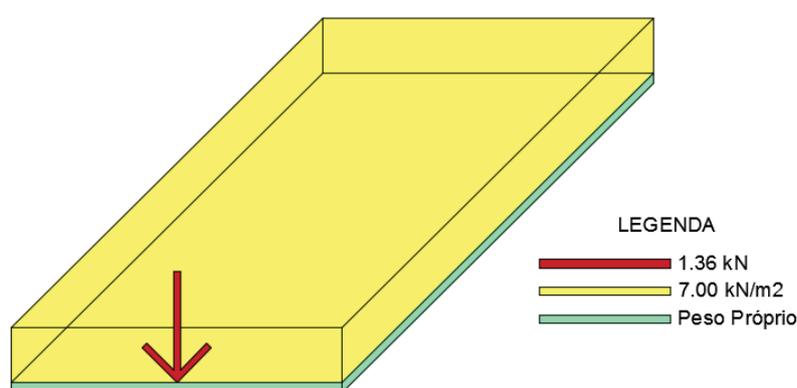


Figura 36 – Distribuição de cargas no piso de vidro  
Fonte: (Elaborada pela autora).

9: BENNISON, Stephen J.; SERRUYS, Francis. **Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway**. Disponível em: < <http://www.sun-tec.ch/downloads/gpd07bennison.pdf>>. Acesso em: 09.ago.2017

Para a modelagem no SAP2000, Autodesk Robot e SJ MEPLA®, assim como para o cálculo pelo método analítico, foram calculadas e utilizadas as espessuras efetivas (TABELA 10) como recomendado pela ASTM E1300:2003. O cálculo das espessuras efetivas, segundo a norma, é realizado para vidros laminados de duas lâminas. Para o piso de vidro deste estudo de caso será usado vidro laminado de três lâminas fazendo-se uma análise entre quatro pisos de diferentes espessuras:

- Três lâminas de 8 mm de vidro termo endurecido (8x3);
- Três lâminas de 10 mm de vidro termo endurecido (10x3);
- Três lâminas de 12 mm de vidro termo endurecido (12x3);
- Três lâminas de 16 mm de vidro termo endurecido (16x3).

Desta forma, adaptando as equações (2.10) e (2.11) optou-se por considerar o coeficiente de cisalhamento ( $\zeta$ ) nulo fazendo com que as lâminas do vidro trabalhem separadamente, dimensionando assim o piso de forma conservativa. Sendo assim, as espessuras efetivas foram calculadas da seguinte forma:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + h_3^3} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$h_{ef,\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde,

$h_{ef,w}$  é a altura efetiva para calcular as flechas máximas;

$h_{ef,\sigma}$  é a altura efetiva para calcular as tensões máximas;

$h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$  são as espessuras mínimas de cada lâmina (TABELA 07).

Tabela 10 – Espessuras efetivas do vidro

Tipo	$h_{ef,w}$ (mm)	$h_{ef,\sigma}$ (mm)
8x3	10,70	12,85
10x3	13,00	15,62
12x3	17,18	20,63
16x3	21,76	26,13

Obs: O procedimento de cálculo encontra-se no ANEXO II.

Para o cálculo analítico, sabendo-se que a placa está apoiada em todas as bordas, têm-se como tensão e flecha máxima:

$$\sigma = \frac{\beta q a^2}{h_{ef,\sigma}^2} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\delta = \frac{\alpha q a^4}{E h_{ef,w}^3} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde:

$\beta$  e  $\alpha$ : variáveis que dependem da relação geométrica da placa (TABELA 11);

a: menor dimensão da placa;

E: módulo de elasticidade;

q: carga uniformemente distribuída.

Tabela 11 – Variáveis para o cálculo da tensão e flecha máxima

a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	$\infty$
$\beta$	0,2874	0,3762	0,4530	0,5172	0,5688	0,6102	0,7134	0,7476	0,7476	0,7500
$\alpha$	0,0444	0,0616	0,0770	0,0906	0,1017	0,1110	0,1335	0,1400	0,1417	0,1421

Fonte: YOUNG e BUDYNAS, 2012.

Como modo de facilitar o cálculo pelo método analítico, a carga concentrada de 1,36 KN foi distribuída igualmente no piso, sendo somada ao peso próprio e à sobrecarga uniformemente distribuída, compondo desta forma a carga total aplicada no piso (q). O procedimento de cálculo encontra-se no ANEXO III. O piso foi modelado nos *softwares*, inserindo as cargas de acordo com a FIGURA 35, adicionando dados referentes ao módulo de elasticidade do vidro (70 GPa), coeficiente de Poisson (0,23) e seu peso específico (25 KN/m<sup>3</sup>).

Tabela 12 – Resultados das tensões e flechas máximas

Tipo	Método Analítico		SAP2000		Robot		SJ MEPLA®	
	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)
8x3	51,49	32,80	47,45	29,78	47,37	29,77	47,28	29,58
10x3	33,27	18,42	30,68	18,16	30,64	18,15	30,58	18,06
12x3	19,01	8,13	17,55	8,23	17,53	8,23	17,54	8,20
16x3	11,46	4,07	10,59	3,86	10,59	3,86	10,61	3,87

A TABELA 11 apresenta os resultados obtidos das tensões e flechas máximas pelos diferentes métodos adotados, e para os diferentes modelos de piso considerados. Como pode-se perceber, o método analítico apresentou as maiores tensões de flexão (encontradas no centro do piso) e flechas. Isso se dá pelo fato do cálculo ser feito a partir da resolução analítica de equações matemáticas muito próximas e podem ser aceitas como suficientemente precisas, tendo em vista a utilização de coeficientes adimensionais que relacionam carga, deflexão e tensão. Em contrapartida, a precisão do método dos elementos finitos, utilizado nos *softwares*, depende da quantidade de nós e dos tipos de elementos da malha, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, respeitando os critérios de convergência dos métodos numéricos considerados, mais precisos serão os resultados da análise.

Observou-se, através destes resultados, um erro máximo relativo de 8,9% entre o método analítico e o menor valor encontrado nos *softwares*, no caso o do SJ MEPLA®. O erro máximo relativo entre os *softwares* foi de 0,36%.

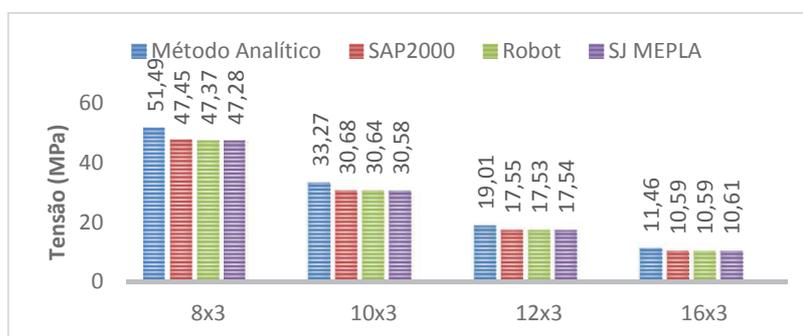


Figura 37 – Gráfico comparativo entre as tensões máximas  
Fonte: (Elaborada pela autora).

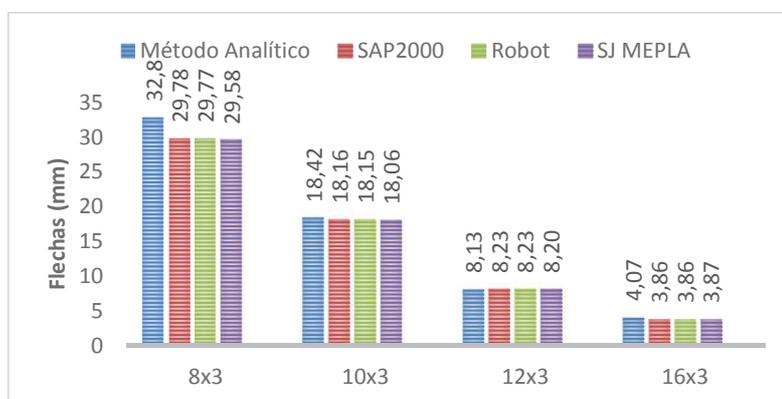


Figura 38 – Gráfico comparativo entre flechas máximas  
Fonte: (Elaborada pela autora).

Foi realizada outra modelagem no SJ MEPLA<sup>®</sup>, como se trata de um *software* voltado especificamente ao cálculo de vidros estruturais, diferentemente dos demais, ao invés de utilizar as espessuras efetivas, foi modelada a placa de vidro laminado, introduzindo as espessuras das três laminas de vidro (espessura mínima de acordo com a TABELA 07). Para as camadas intermediárias, tornou-se interessante fazer uma comparação de resultados, aplicando primeiramente camadas de PVB e refazer os cálculos utilizando camadas de SGP (TABELA 13).

Tabela 13 – Resultados do SJ MEPLA<sup>®</sup>

Tipo	PVB (E=0,03MPa) *		SGP (E=2,91MPa) *	
	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)
8x3	41,73	29,58	12,31	12,64
10x3	28,98	18,06	9,62	8,21
12x3	17,06	8,20	6,60	4,29
16x3	10,95	3,87	4,84	2,47

\*Cargas a longo prazo.

Primeiramente, analisando os resultados do SJ MEPLA<sup>®</sup> utilizando espessura efetiva versus vidro laminado, percebe-se a diminuição da tensão e flecha máxima, visto que o *software* utiliza nos cálculos as camadas intermediárias que auxiliam na resistência do vidro. Em relação ao tipo de camada intermediária, pode-se comprovar através dos resultados obtidos na TABELA 13 que o SentryGlas<sup>®</sup> (SGP) torna o vidro mais resistente, por se tratar de um polímero de alta resistência, como mencionado no item 2.3.3.

Diante desses dados e sabendo-se que a tensão admissível do vidro termo endurecido é de 20,3 MPa, para carregamento permanente (TABELA 08) e flecha máxima igual a 12 mm (considerando 1/125 do vão), escolheu-se a composição do piso de vidro com três lâminas de 12 milímetros. Para que houvesse maior segurança, uma lâmina de 8 mm de vidro temperado será acrescentada na composição (FIGURA 39).

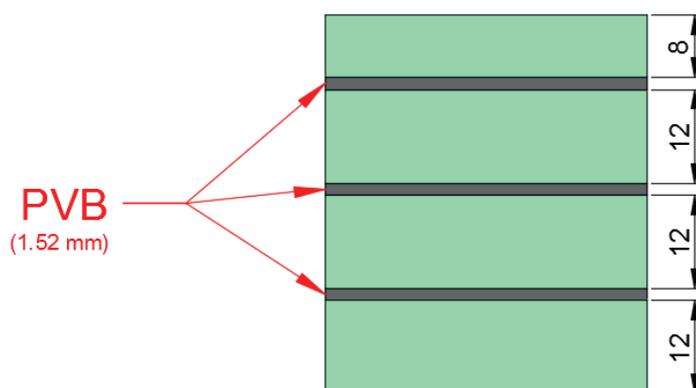


Figura 39 – Esquema da composição do piso de vidro  
Fonte: (Elaborada pela autora).

### 3.1.2 Dimensionamento do guarda corpo

A função principal do guarda-corpo é oferecer segurança, tanto das pessoas ao seu redor evitando o risco de queda acidental, quanto de quem está abaixo de onde ele está instalado. Desta forma, o guarda corpo deve ser composto por vidro de segurança. Segundo a NBR 7199:2016, citada neste trabalho, podem ser utilizados os seguintes tipos de vidro:

- Laminado (podendo ser temperado);
- Aramado (vidro impresso translúcido que tem uma rede metálica de malha quadriculada incorporada à sua massa);
- Vidro insulado (composto por vidro laminado ou aramado).

Neste estudo de caso foi escolhido um sistema sem moldura (FIGURA 40), ideal para criar um limite elegante e duradouro com belas vistas ininterruptas. O guarda corpo será composto por placas de vidro temperado laminado (duas lâminas de 12 mm) e com dimensões de 0,70 x 0,90 m. Para que houvesse uma verificação do comportamento do guarda corpo, foi realizada sua modelagem no *software* SJ MEPLA®, tendo em vista a possibilidade de avaliar as tensões e deflexões para esse modelo com sua devida formulação de apoio (apenas na borda inferior). Para isso, foram consideradas as cargas atuantes no guarda corpo segundo a NBR 6120:1980, demonstradas na FIGURA 41.

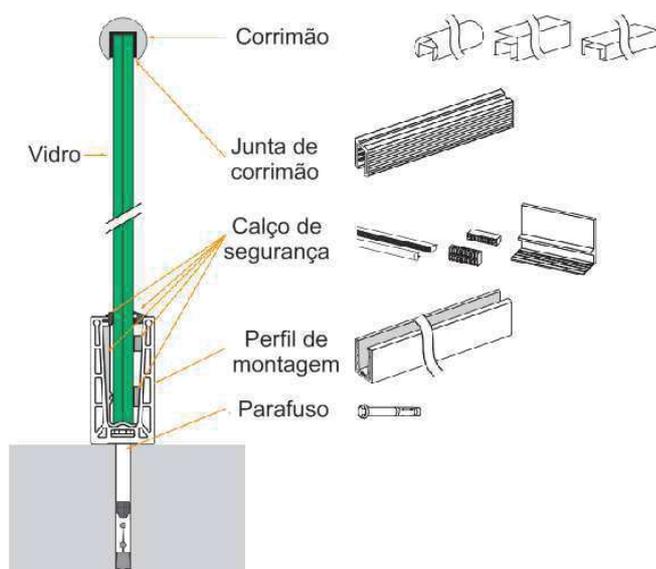


Figura 40 – Sistema de guarda corpo sem moldura  
Fonte: (adaptado de S3 GROUP<sup>10</sup>).

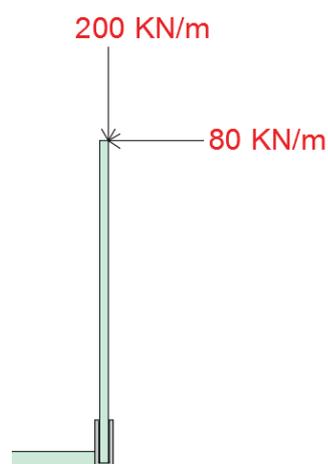


Figura 41 – Cargas atuantes no guarda corpo  
Fonte: (Elaborada pela autora).

O resultado para tensão máxima foi de 15,59 MPa e para a deflexão de 9,21 mm, como pode ser observado nos mapas de tensões e deflexões nas figuras 42 e 43. Como o valor da tensão máxima do vidro temperado é de 49,4 Mpa (TABELA 08) e a flecha máxima é de 14 mm (adotando 1/50 do vão), a composição do guarda corpo se torna viável nas condições de carga permanente.

10: S3 GROUP. **Top Mount Frameless Pro Glass Balustrade**. Disponível em: <  
<https://www.s3i.co.uk/image/s3i/Frameless-Pro-Glass-Balustrade-Top-Mount.pdf>. Acesso em:  
03.nov.2017.

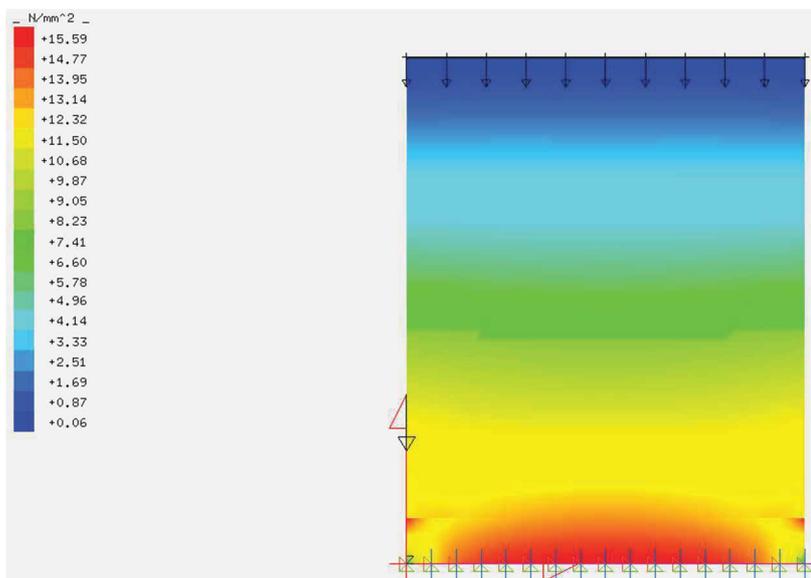


Figura 42 – Mapa de tensões no guarda corpo  
Fonte: (software SJ MEPLA®).

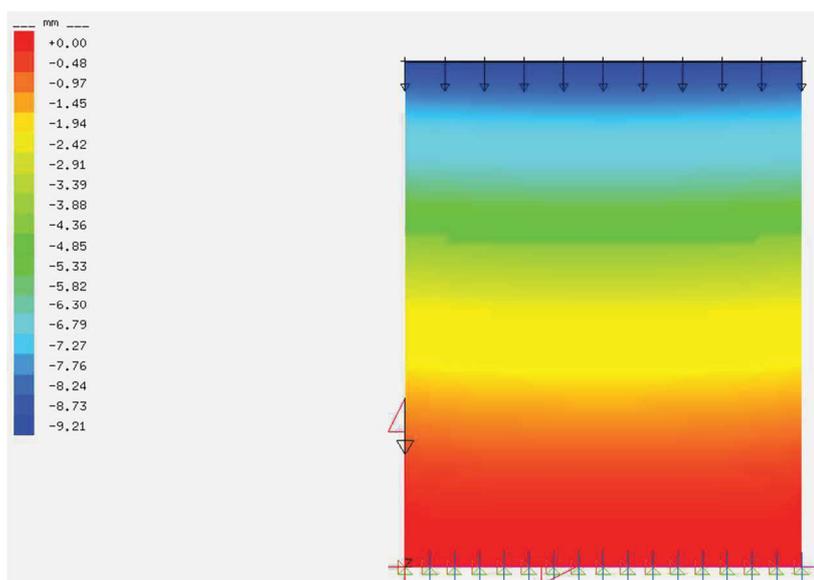


Figura 43 – Mapa de deflexões no guarda corpo  
Fonte: (software SJ MEPLA®).

Tendo em vista que o guarda corpo está sujeito a impactos foi realizado no SJ MEPLA® uma simulação do teste de impacto de pêndulo, como referenciado nas normas ABNT NBR 14697:2001 e EN 12600:2002 citadas neste trabalho. O diferencial de altura para liberação do impactor foi de 1200 mm, simulando desta forma o impacto humano. A posição do impactor se encontra na borda livre do guarda corpo, que representa o pior cenário. A tensão máxima obtida foi de 71,76 MPa (FIGURA 44), e

tratando-se de uma carga de curta duração (adotando de 3s), segundo a ASTM E1300:2003, a tensão admissível é de 73 Mpa (TABELA 08), encontrando-se um valor bem aproximado ao limite.

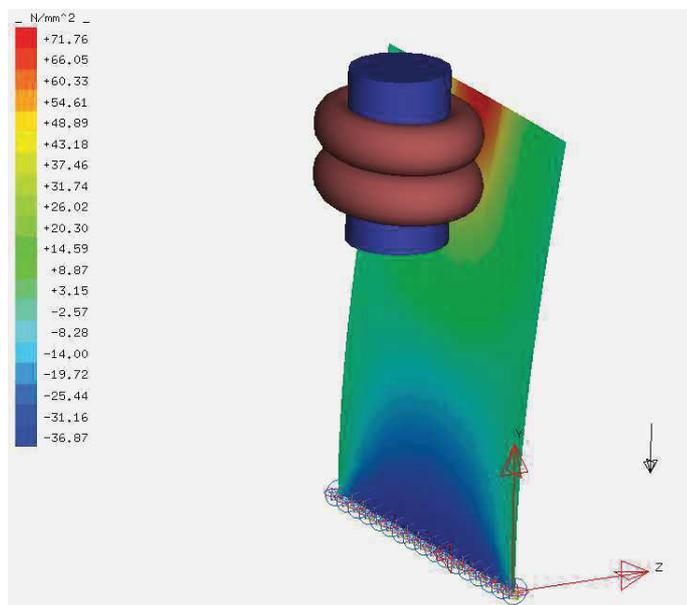


Figura 44 – Simulação do teste de impacto de pêndulo  
Fonte: (software SJ MEPLA®).

### 3.1.3 Dimensionamento da estrutura portante

Para que seja feito um pré-dimensionamento da estrutura metálica, que servirá de suporte para os pisos de vidro, foi necessário o cálculo da carga que estará atuando nas longarinas da passarela. Foi adotado um sistema de contraventamento (transversinas) a cada dois metros fazendo com que a placa de vidro esteja apoiada em todas suas bordas, como mencionado anteriormente. Com essa situação de apoio, sabe-se que as charneiras plásticas ou rupturas (FIGURA 45) se dão a 45° dos apoios.

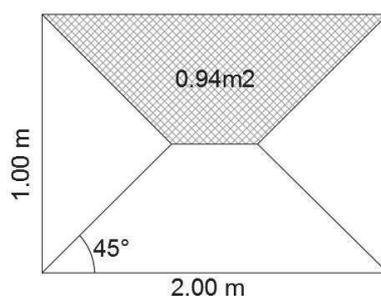


Figura 45 – Distribuição de cargas no piso de vidro  
Fonte: (Elaborada pela autora).

Desta forma, a carga distribuída uniformemente nas longarinas devido ao piso e ao guarda corpo será de 4,34 kN/m. Utilizando o *software* Ftool, pôde-se obter o momento máximo atuante nas longarinas igual a 106,3 KNm (FIGURA 46).

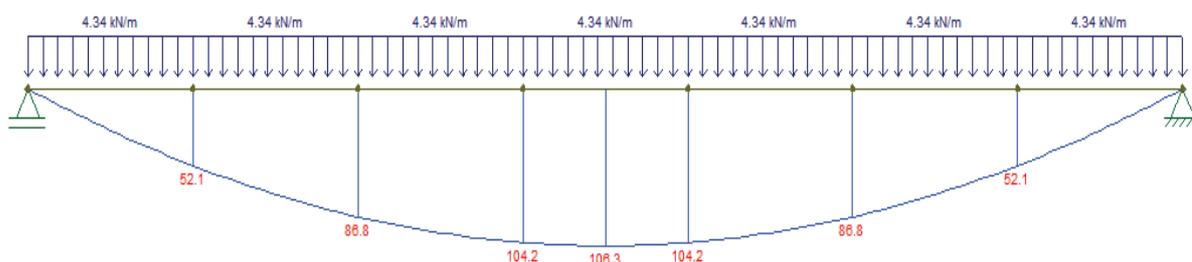


Figura 46 – Diagrama de momento fletor das longarinas  
Fonte: (*software* Ftool).

Com base nos dados obtidos, pôde-se fazer uma estimativa do perfil a ser utilizado (ANEXO V), escolhendo-se desta forma o perfil CVS 300x55. Para as transversinas pode-se utilizar perfis HEB 100.

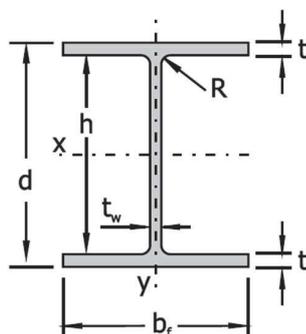


Figura 47 – Esquema do perfil metálico  
Fonte: (GERDAU<sup>11</sup>).

Tabela 14 – Dados geométricos dos perfis metálicos utilizados na passarela

PERFIL	h (mm)	d (mm)	tw (mm)	bf (mm)	tf (mm)	R (mm)
CVS 300X55	281,0	300,0	8,0	250,0	9,5	-
HEB 100	56,0	100,0	6,0	100,0	10,0	12,0

Fontes: Portal Metálica<sup>12</sup> e Construmática<sup>13</sup>

11: GERDAU. **Cálculo de equivalência.** Disponível em: <<https://www.gerdau.com.br/gerdaucominas/br/produtos/calculodeequivalenciapf2.asp>>. Acesso em: 27.nov.2017.

12: PORTAL METÁLICA. **Perfis Soldados Série CVS.** Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/perfil-soldado-serie-cvs>>. Acesso em: 27.nov.2017.

13: CONSTRUMÁTICA. **Perfis HEB.** Disponível em: <[http://www.construmatica.com/construpedia/Perfiles\\_HEB](http://www.construmatica.com/construpedia/Perfiles_HEB)>. Acesso em: 27.nov.2017.

### 3.1.4 Estrutura Final

Mediante aos dimensionamentos realizados, a passarela será composta por:

- Sete placas de vidro laminado de dimensões 1,50 x 2,00 m, composto por três lâminas de 12 mm de vidro termo endurecido e uma lâmina de 8 mm de vidro temperado, utilizando três camadas intermediárias de PVB com 1,52 mm de espessura;
- Guarda corpo de vidro laminado de dimensões 0,70 x 0,90 m, composto por duas lâminas de vidro temperado de 12 mm;
- Longarinas metálicas com perfis CVS 300x55 e transversinas com perfis HEB 100.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1. CONCLUSÕES**

Para que houvesse uma melhor compreensão dos conceitos que estão diretamente ligados ao dimensionamento do vidro estrutural, a pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho se mostrou de grande importância para o conhecimento das particularidades do vidro e como este material tem comportamento diferente dos demais materiais de construção. A coleta de dados mostra que mesmo o vidro sendo um material frágil, as crescentes tecnologias e estudos vêm tomando papel importante na evolução do vidro como elemento estrutural.

Através da descrição das características e propriedades do vidro pode-se perceber que a principal problemática para o dimensionamento do vidro estrutural está relacionada à sua redistribuição de tensões. Tendo em vista a incapacidade do vidro de suportar picos de tensões, as suas articulações e conexões são partes importantes neste processo, necessitando-se estudos mais detalhados e maiores cuidados em seus dimensionamentos, evitando-se o contato direto do vidro com material de dureza elevada.

A escassez de normas e referências bibliográficas nacionais se impõe como um dos principais desafios para o dimensionamento de estruturas de vidro, tendo-se que recorrer às normas e bibliografias internacionais. No entanto, as normas internacionais também possuem suas limitações, sendo em sua maioria voltada ao dimensionamento de painéis retangulares apoiados linearmente em seus bordos e sujeitos a carregamentos uniformes. As referências bibliográficas utilizadas neste trabalho se mostraram uma boa base para o dimensionamento do vidro estrutural, que juntamente com as recomendações das normas podem ser de grande auxílio no desenvolvimento do projeto estrutural.

O ensaio não destrutivo para a caracterização dos vidros mostrou-se de grande importância para poder comparar dados teóricos com os obtidos experimentalmente. O método de excitação por impulso, através da captação das frequências de vibração natural, pôde fornecer valores relativos ao módulo de elasticidade e amortecimento do vidro que são parâmetros fundamentais para o dimensionamento do vidro e para que se possa entender o seu comportamento como elemento estrutural. Devido às composições do vidro e também às diferenças geométricas dos corpos de prova

utilizados, foram obtidos resultados que necessitam de outras análises e ensaios para que possam ser comprovados.

O conhecimento do tipo de vidro, do tempo de duração de carga e de fatores ambientais, como a temperatura, mostrou-se fundamental para o dimensionamento de estruturas de vidro. O vidro para ser utilizado como elemento estrutural deve ser do tipo laminado de segurança, compreendendo assim uma melhor resistência e desempenho na pós-ruptura. Pôde-se perceber, através do estudo de caso, que quando submetido à carga permanente, a capacidade resistente do vidro diminui consideravelmente.

Os métodos das tensões admissíveis e flechas limites foram satisfatórios para o dimensionamento do piso de vidro e o cálculo pelo método analítico mostrou-se suficiente para dimensionar a passarela de vidro, tendo em vista que o piso de vidro tem geometria simples. Para geometrias mais elaboradas, as modelagens em *softwares* com base no método dos elementos finitos podem ser mais eficientes na obtenção das tensões e flechas máximas da estrutura.

A utilização de um software específico para o dimensionamento de vidro estrutural (SJ MEPLA®) possibilitou a comparação entre o dimensionamento através das espessuras efetivas e o dimensionamento do vidro como um material compósito. Percebeu-se que as camadas intermediárias do vidro laminado contribuem para a obtenção de uma melhor resistência, encontrando-se menores valores de tensão e deflexão. No entanto, os valores estão bem aproximados daqueles calculados com as espessuras efetivas, mostrando que essa metodologia é suficiente para o dimensionamento do vidro. A utilização do SentryGlas® como camada intermediária fez com que o vidro apresentasse menores tensões e deflexões quando submetidos ao mesmo carregamento do vidro com camada intermediária de PVB, comprovando desta forma que este material possui melhor desempenho estrutural.

A simulação do teste de impacto de pêndulo possibilitou conhecer o comportamento do guarda corpo mediante a um possível impacto humano. Foi interessante para que se possa entender o comportamento do vidro, na sua distribuição de tensões, quando submetido à um impacto de curta duração.

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, pode-se afirmar que os objetivos iniciais foram alcançados, podendo-se ter um conhecimento sobre as

características do vidro e suas particularidades e como essas questões influenciam no dimensionamento de estruturas de vidro.

## 5.2. SUGESTÕES

Para pesquisas futuras que visarem dar continuação aos estudos desenvolvidos neste trabalho, com relação ao comportamento de estruturas de vidro, são sugeridos os seguintes aspectos:

- Ao longo deste trabalho foram apresentadas as propriedades do vidro com base em dados teóricos e também através de ensaios não-destrutivos. Necessitam-se maiores análises para comprovação dos resultados encontrados experimentalmente, sendo sugerida a realização de ensaios de ruptura para obter dados referentes as propriedades mecânicas do vidro laminado de segurança;
- Neste trabalho foi realizado um estudo de caso com o dimensionamento de piso e guarda corpo de vidro. Seria interessante realizar o dimensionamento de outros sistemas estruturais de vidro, como por exemplo pilares, vigas e fachadas, fazendo-se uma comparação entre diferentes normas para avaliar os aspectos que se destacam em cada uma delas. Desta forma poderiam também ser estudados os diferentes tipos de articulações e conexões, avaliando qual a melhor utilização em cada caso específico;
- Neste trabalho não foi avaliado o custo da aplicação do vidro estrutural, sendo interessante fazer uma comparação entre o uso do PVB e do Sentryglas®, verificando qual seria o melhor custo-benefício. Ainda sobre custos, poderia ser realizada também uma comparação entre uma estrutura de vidro e os principais métodos construtivos, como por exemplo a mesma estrutura construída em concreto armado e também em aço;
- A simulação do teste de impacto de pêndulo foi de grande importância para classificar o tipo de vidro laminado e entender seu comportamento quando submetido a cargas de curta duração. A realização do teste de impacto de pêndulo, juntamente com a simulação no *software* SJ

MEPLA<sup>®</sup>, seria interessante para que pudesse comparar os resultados entre eles.

## REFERÊNCIAS

ABRAVIDRO. **Quais vidros usar em guarda corpos**. Disponível em: <<http://abravidro.org.br/vidros/vidro-float/>>. Acesso em: 23.ago.2017.

ABRAVIDRO. **Vidro Float**. Disponível em: <<http://abravidro.org.br/punoticias/quais-vidros-usar-guarda-corpos-norma/>>. Acesso em: 27.nov.2017.

ALCLEAN. **Conheçam os sistemas de fachadas que existem**. Disponível em: <<http://www.alclean.com.br/single-post/2016/03/14/Conhe%C3%A7a-os-sistemas-de-fachadas-que-existem>>. Acesso em: 29.set.2017

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1300: Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings**. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken, 2015.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F1637: Standard Practice for Safe Walking Surfaces**. West Conshohocken, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14697: Vidro Laminado**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199 - Vidros na construção civil**: Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro, 2016.

ATCP ENGENHARIA FÍSICA. **Métodos de Caracterização**. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/modulos-elasticos/metodos-caracterizacao-.html>>. Acesso em: 03.nov.2017.

ATHELIER DO CORRIMÃO. **Escadas de Vidro e a Apple**. Disponível em: <<http://www.atheliodocorrimao.com.br/index.php/escadas-de-vidro-e-a-apple/>>. Acesso em: 16.set.2017.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1288 - Glass in buildings**: Selection and installation. Sydney, 2006.

BENNISON, Stephen J.; SERRUYS, Francis. **Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway**. Disponível em: <<http://www.sun-tec.ch/downloads/gpd07bennison.pdf>>. Acesso em: 09.ago.2017.

BLANDINI, Lucio. **Structural Use of Adhesives in Glass Shells**. Instituto de Estruturas Leves e Design Conceitual - Universidade de Stuttgart, Alemanha. 2007.

CATÁLOGO DE ARQUITETURA. **Vidro insulado**. Disponível em: <<http://catalogodearquitetura.com.br/insulado.html>>. Acesso em: 13.out.2017.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. **Módulos**. Disponível em: <[https://ctborracha.com/?page\\_id=1586](https://ctborracha.com/?page_id=1586)>. Acesso em: 17.nov.2017.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. **Seleção e definição das características de outros materiais**. Disponível em: <[https://ctborracha.com/?page\\_id=1066](https://ctborracha.com/?page_id=1066)>. Acesso em: 17.nov.2017.

CONSTRUMÁTICA. **Perfiles HEB.** Disponível em: <  
[http://www.construmatica.com/construpedia/Perfiles\\_HEB](http://www.construmatica.com/construpedia/Perfiles_HEB)>. Acesso em:  
27.nov.2017.

COSSOLINO, Leiliane; PEREIRA, Antônio. **Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização.** Disponível em: <  
<http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/RT03-ATCP.pdf>>.  
Acesso em: 27.nov.2017.

CURTAINWALL FACADE DETAILING. **Spider Glazing, Skylight detailing, Patch fitting.** Disponível em:<<https://www.curtainwallfacadedetailing.com/gallery-facade-curtainwall-structural-glazing-detailing.php>>. Acesso em: 29.set.2017.

DEUTSCHE BAUZEITUNG. **Hauchdünn und geklebt.** Disponível em: <  
<http://www.db-bauzeitung.de/allgemein/hauchduenn-und-geklebt/>>. Acesso em:  
02.out.2017.

DIVINAL VIDROS. **Produtos.** Disponível em:  
<<http://www.divinalvidros.com.br/produtos/>>. Acesso em: 08.ago.2017

DU PONT. **Laminated Glass Interlayers for Stronger, Safer Glass.** Disponível em:<<http://www.dupont.com/products-and-services/construction-materials/safety-glass-interlayers/brands/sentryglas-ionoplast-interlayer.html>>. Acesso em:  
09.ago.2017.

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS. **ETAG 002: Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing KITS (SSGK).** 3ª Edição. Bruxelas, 2012.

EUROPEAN STANDARD. **EN 12600: Glass in building - Pendulum test - Impact test method and classification for flat glass.** Bruxelas, 2002.

EUROPEAN STANDARD. **EN 356: Glass in building - Security glazing - Testing and classification of resistance against manual attack**. Bruxelas, 1999.

FELDMANN, Markus et al. **Guidance for European Structural Design of Glass Components**. Ispra: Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, 2014.

GERDAU. **Cálculo de equivalência**. Disponível em: <  
<https://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/br/produtos/calculodeequivalenciapf2.asp>>. Acesso em: 27.nov.2017.

GERMAN INSTITUTE OF STANDARDIZATION. **DIN 18008: Glass in Building - Design and construction rules**. Alemanha, 2010.

HALDIMANN, Matthias; LUIBLE, Andreas; OVEREND, Mauro. **Structural use of Glass**. AIPC-IVBH, Zurique, Suíça, 2008.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

LONDON MOZARD. **LMP at the Crystal Palace Museum**. Disponível em: <  
<http://londonmozartplayers.com/concert/lmp-at-the-crystal-palace-museum/>>. Acesso em: 16.set.2017.

MANIATIS, Iris. **Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Load**. 2006. 193f. Dissertação (Doutor em Engenharia) - Instituto de Materiais e Construção, Universidade Técnica de Munique. 2006.

MANZOLI, Anderson. **Princípios da Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Rio de Janeiro: SESES, 2015.

MARTINS, João; PINTO, Emanuel. **O Vidro**. Disciplina de Materiais de Construção I - Instituto Superior Técnico de Lisboa. 2004.

MAYS, G.C; HUTCHISON, A. R. **Adhesives in civil engineering**. Universidade de Cambridge, 1992.

NÔMADES DIGITAIS. **China se prepara para abrir a maior ponte com chão de vidro do mundo**. Disponível em: < <http://nomadesdigitais.com/china-se-prepara-para-abrir-a-maior-ponte-com-chao-de-vidro-do-mundo/>> Acesso em: 16.set.2017.

O'REGAN, Chris et al. **Structural use of glass in buildings**. 2ª Edição. Londres: The Institution of Structural Engineers, 2014.

PORTAL METÁLICA. **Perfis Soldados Série CVS**. Disponível em: < <http://wwwo.metallica.com.br/perfil-soldado-serie-cvs>>. Acesso em: 27.nov.2017.

S3 GROUP. **Top Mount Frameless Pro Glass Balustrade**. Disponível em: < <https://www.s3i.co.uk/image/s3i/Frameless-Pro-Glass-Balustrade-Top-Mount.pdf>:. Acesso em: 03.nov.2017.

SANCHES, José Maria. **Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro**. 2013. 114f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2013.

SCHITTICH, Christian. et al. **Glass Construction Manual**. 2ª Edição. Munique: Instituto para Documentação e Arquitetura Internacional, 2007.

VALARINHO, Luis Guilherme. **Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP**. 2010. 232f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

VM VIDROS. **Propriedades Mecânicas do Vidro**. Disponível em: <<http://www.vidreiramirandela.com/?pID=41>>. Acesso em: 25.out.2017

WALKER TEXTURES. **Anti-slip glass.** Disponível em: <  
<http://walkerglass.com/products/anti-slip-glass/>>. Acesso em: 27.nov.2017.

WURM, Jan. **Glass Structures:** Design and Construction of Self-Supporting Skins.  
Suíça: Birkhäuser Verlag AG, 2007.

YOUNG, Warren; BUDYNAS, Richard. **Roark's Formulas for Stress and Strain.** 7<sup>a</sup>  
Edição. McGraw-Hill, 2002.

## ANEXO I - PRINCIPAIS NORMAS REFERENTES AO VIDRO

Tabela A1.1 – Principais normas referentes ao vidro

Referência	Assunto
ABNT NBR 12067:2001	Vidro plano
ABNT NBR 14697:2001	Vidro Laminado
ABNT NBR 14698:2001	Vidro Temperado
ABNT NBR 7199:2016	Vidros na construção civil: Projeto, execução e aplicações
ABNT NBR 9498:2015	Vidros de segurança - Ensaio de abrasão
ABNT NBR 9499:2015	Vidros de segurança - Ensaio de resistência à alta temperatura
ABNT NBR 9502:2015	Vidros de segurança - Ensaio de resistência à umidade
ASTM C 1036.2001	Standard Specification for Flat Glass
ASTM C1172:2003	Standard Specification for Laminated Architectural Flat Glass
ASTM E1300:2003	Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings
ASTM E2751M:2017	Standard Practice for Design and Performance of Supported Laminated Glass Walkways
ASTM F1637:2013	Standard Practice for Safe Walking Surfaces
EN 12150-1:2000	Thermally toughened sola lime silicate safety glass
EN 12337-1:2000	Chemically strengthened sola lime silicate glass
EN 12600:2002	Glass in building - Pendulum test - Impact test method and classification for flat glass
EN 1288:2016	Glass in building: Determination of the bending strength of glass
EN 14179-1:2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass
EN 1748-1-1:2004	Special basic products - Borosilicate glasses
EN 356:1999	Glass in building - Security glazing - Testing and classification of resistance against manual attack
EN 572-1:2004	Basic soda lime silicate glass products
EM 1863-1:2000	Heat strengthened sola lime silicate glass
ISO 12547:1998	Laminated glass and laminated safety glass

## ANEXO II – CÁLCULO DAS ESPESSURAS EFETIVAS

### DADOS DE ENTRADA

Espessuras Mínimas (mm):  $h_{8\min} := 7.42$   
 $h_{10\min} := 9.02$   
 $h_{12\min} := 11.91$   
 $h_{16\min} := 15.09$

### CÁLCULO ESPESSURA MÍNIMA PARA DEFORMAÇÃO

Vidro de 8 mm

$$h_{\text{efw}8} := \sqrt[3]{\left(h_{8\min}^3 + h_{8\min}^3 + h_{8\min}^3\right)} \quad h_{\text{efw}8} = 10.701 \text{ mm}$$

Vidro de 10 mm

$$h_{\text{efw}10} := \sqrt[3]{\left(h_{10\min}^3 + h_{10\min}^3 + h_{10\min}^3\right)} \quad h_{\text{efw}10} = 13.009 \text{ mm}$$

Vidro de 12 mm

$$h_{\text{efw}12} := \sqrt[3]{\left(h_{12\min}^3 + h_{12\min}^3 + h_{12\min}^3\right)} \quad h_{\text{efw}12} = 17.177 \text{ mm}$$

Vidro de 16 mm

$$h_{\text{efw}16} := \sqrt[3]{\left(h_{16\min}^3 + h_{16\min}^3 + h_{16\min}^3\right)} \quad h_{\text{efw}16} = 21.764 \text{ mm}$$

### CÁLCULO ESPESSURA MÍNIMA PARA TENSÃO

Vidro de 8 mm

$$h_{\text{ef}\sigma 8} := \sqrt{\frac{h_{\text{efw}8}^3}{h_{8\min}}} \quad h_{\text{ef}\sigma 8} = 12.852 \text{ mm}$$

Vidro de 12 mm

$$h_{\text{ef}\sigma 12} := \sqrt{\frac{h_{\text{efw}12}^3}{h_{12\min}}} \quad h_{\text{ef}\sigma 12} = 20.629 \text{ mm}$$

Vidro de 10 mm

$$h_{\text{ef}\sigma 10} := \sqrt{\frac{h_{\text{efw}10}^3}{h_{10\min}}} \quad h_{\text{ef}\sigma 10} = 15.623 \text{ mm}$$

Vidro de 16 mm

$$h_{\text{ef}\sigma 16} := \sqrt{\frac{h_{\text{efw}16}^3}{h_{16\min}}} \quad h_{\text{ef}\sigma 16} = 26.137 \text{ mm}$$

## ANEXO III – CÁLCULO ANALÍTICO DE TENSÕES E FLECHAS MÁXIMAS DO PISO DE VIDRO

### DADOS DE ENTRADA

Peso específico do vidro:  $\gamma := 25 \text{ kN/m}^3$

Módulo de Elásticidade do vidro:  $E := 70000 \text{ MPa}$

Dimensões do piso:  $a := 2 \text{ m}$   
 $b := 1.5 \text{ m}$

Variáveis (Tabela 10)  $\frac{a}{b} = 1.333$      $\alpha := 0.0715$      $\beta := 0.425$

Coefficiente de Poisson:  $\nu := 0.23$

Carga uniformemente distribuída:  $q_x := 7 \text{ kN/m}^2$

Carga concentrada:  $Q_x := 1.36 \text{ kN}$

### CÁLCULO DAS TENSÕES

#### Vidro de 8 mm

$$PP_{8\text{mm}} := \gamma \cdot \frac{h_{ef\sigma 8}}{1000} \quad PP_{8\text{mm}} = 0.3 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{8\text{mm}} := \frac{\beta \cdot \left[ PP_{8\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right) \right] \cdot b^2}{\left( \frac{h_{ef\sigma 8}}{1000} \right)^2} \quad \sigma_{8\text{mm}} = 5.149 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$$

#### Vidro de 10 mm

$$PP_{10\text{mm}} := \gamma \cdot \frac{h_{ef\sigma 10}}{1000} \quad PP_{10\text{mm}} = 0.375 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{10\text{mm}} := \frac{\beta \cdot \left[ PP_{10\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right) \right] \cdot b^2}{\left( \frac{h_{ef\sigma 10}}{1000} \right)^2} \quad \sigma_{10\text{mm}} = 3.327 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$$

### Vidro de 12 mm

$$PP_{12\text{mm}} := \gamma \cdot \frac{h_{\text{ef}\sigma 12}}{1000} \quad PP_{12\text{mm}} = 0.5 \quad \text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{12\text{mm}} := \frac{\beta \cdot \left[ PP_{12\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right) \right] \cdot b^2}{\left( \frac{h_{\text{ef}\sigma 12}}{1000} \right)^2} \quad \sigma_{12\text{mm}} = 1.901 \times 10^4 \quad \text{kN/m}^2$$

### Vidro de 16 mm

$$PP_{16\text{mm}} := \gamma \cdot \frac{h_{\text{ef}\sigma 16}}{1000} \quad PP_{16\text{mm}} = 0.65 \quad \text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{16\text{mm}} := \frac{\beta \cdot \left[ PP_{16\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right) \right] \cdot b^2}{\left( \frac{h_{\text{ef}\sigma 16}}{1000} \right)^2} \quad \sigma_{16\text{mm}} = 1.146 \times 10^4 \quad \text{kN/m}^2$$

## CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES

### Vidro de 8 mm

$$\delta_{8\text{mm}} := \frac{\alpha \cdot \left[ \frac{PP_{8\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right)}{1000} \right] \cdot (b \cdot 1000)^4}{E \cdot h_{\text{ef}w8}^3} \quad \delta_{8\text{mm}} = 32.803 \quad \text{mm}$$

### Vidro de 10 mm

$$\delta_{10\text{mm}} := \frac{\alpha \cdot \left[ \frac{PP_{10\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right)}{1000} \right] \cdot (b \cdot 1000)^4}{E \cdot h_{\text{ef}w10}^3} \quad \delta_{10\text{mm}} = 18.423 \quad \text{mm}$$

Vidro de 12 mm

$$\delta_{12\text{mm}} := \frac{\alpha \cdot \left[ \frac{PP_{12\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right)}{1000} \right] \cdot (b \cdot 1000)^4}{E \cdot h_{\text{efw}12}^3} \quad \delta_{12\text{mm}} = 8.131 \text{ mm}$$

Vidro de 16 mm

$$\delta_{16\text{mm}} := \frac{\alpha \cdot \left[ \frac{PP_{16\text{mm}} + q_x + \left( \frac{Q_x}{a \cdot b} \right)}{1000} \right] \cdot (b \cdot 1000)^4}{E \cdot h_{\text{efw}16}^3} \quad \delta_{16\text{mm}} = 4.067 \text{ mm}$$

## ANEXO IV – MAPA DE TENSÕES E DEFLEXÕES

SAP 2000

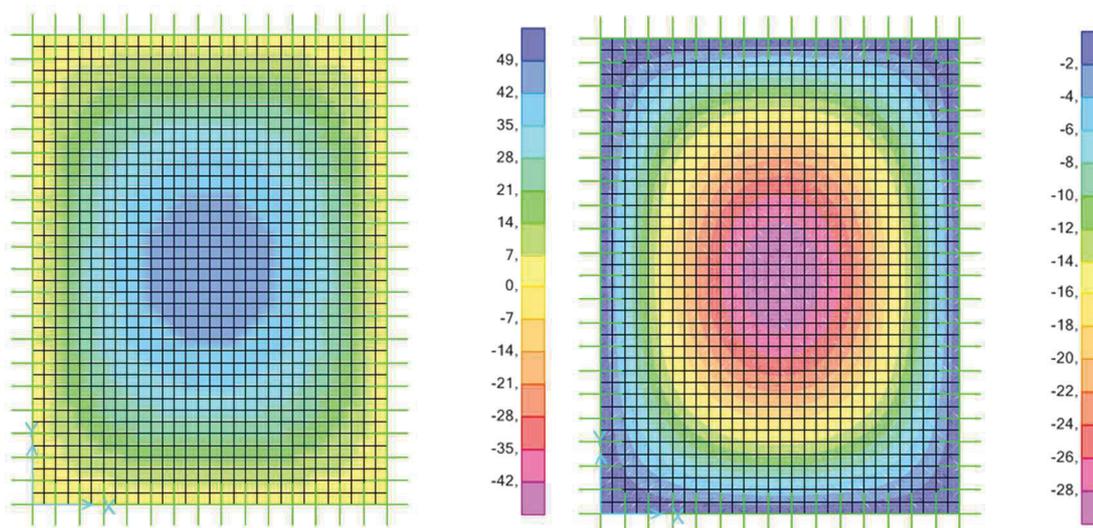


Figura A4.1 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 8x3.

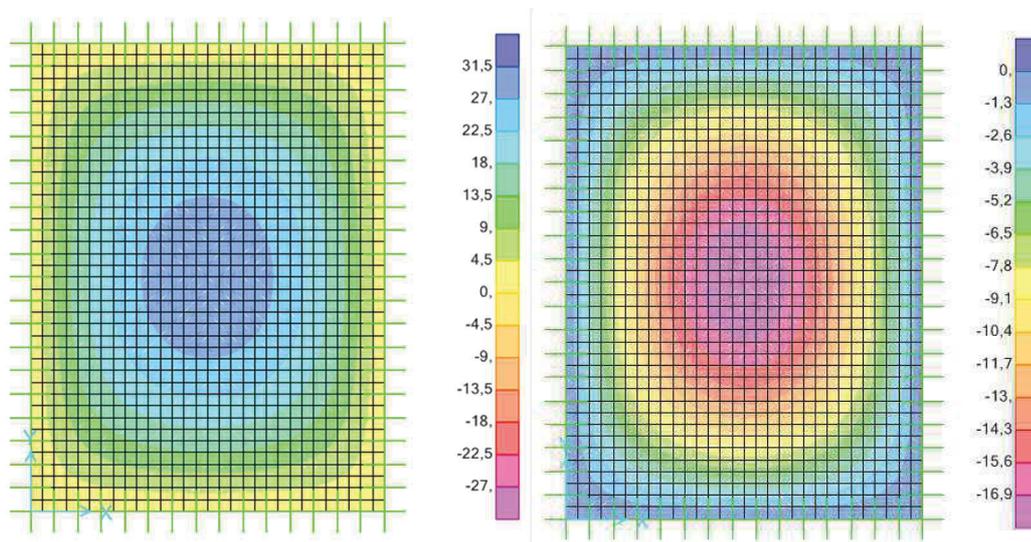


Figura A4.2 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 10x3.

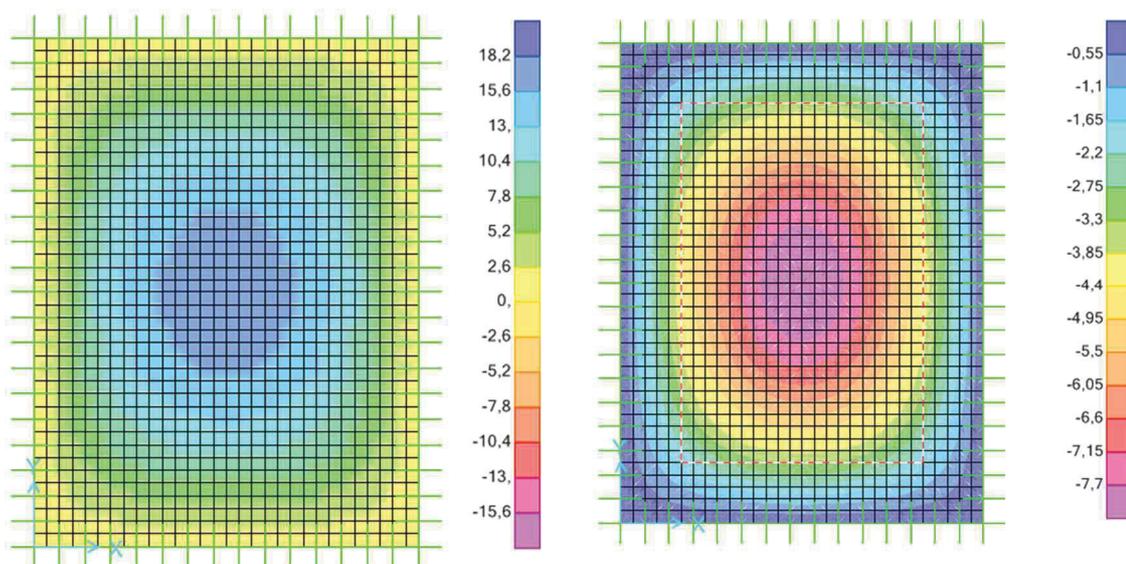


Figura A4.3 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 12x3.

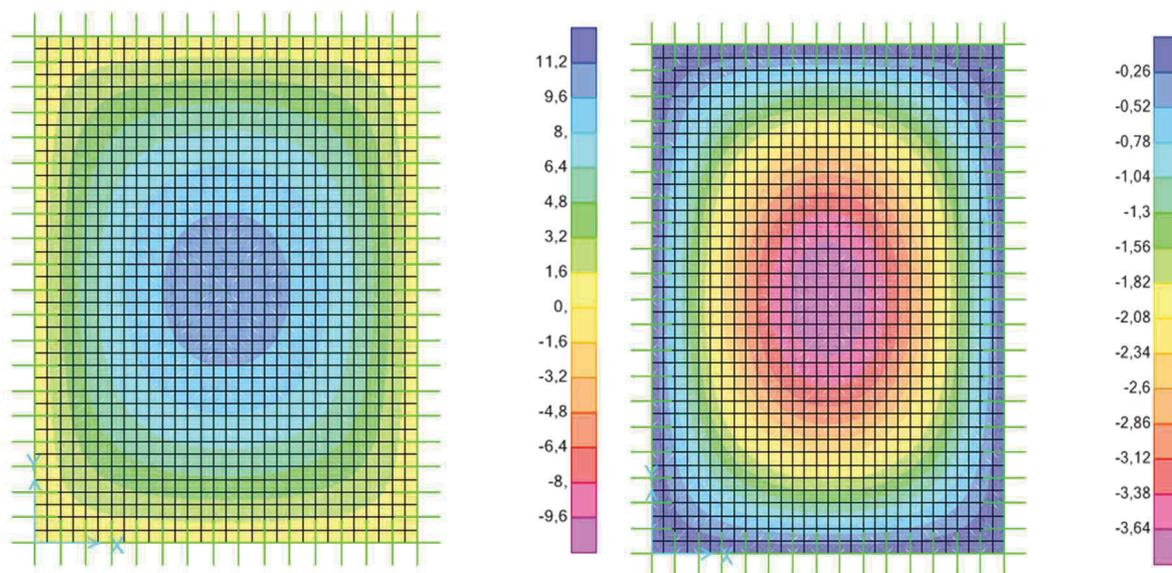


Figura A4.4 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 16x3.

## AUTODESK ROBOT

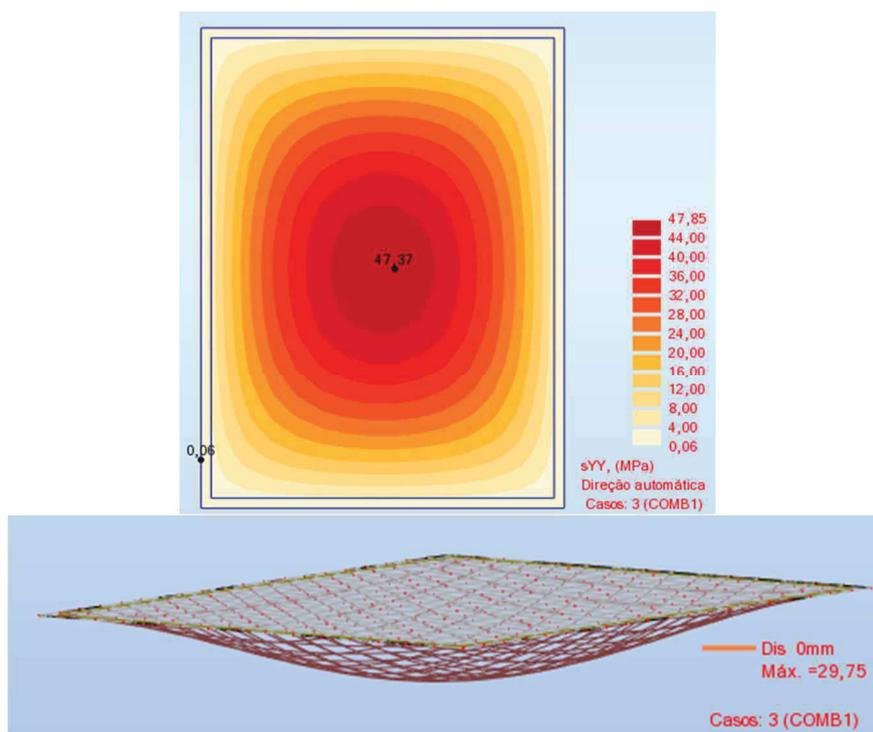


Figura A4.5 – Mapa de tensões (em cima) e deflexões (em baixo) do piso de vidro do tipo 8x3.

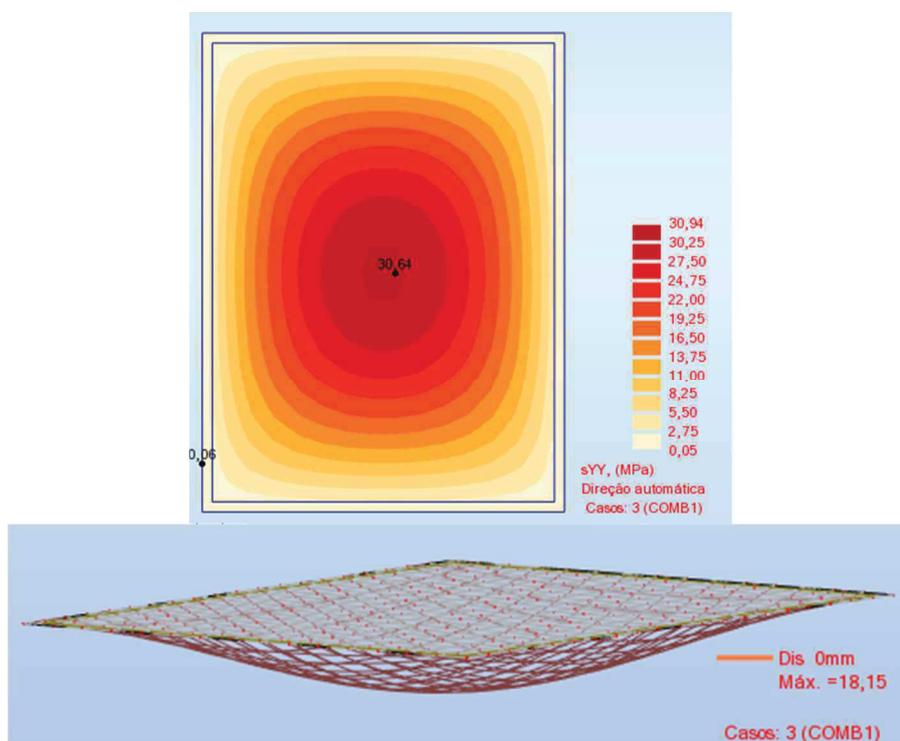


Figura A4.6 – Mapa de tensões (em cima) e deflexões (em baixo) do piso de vidro do tipo 10x3.

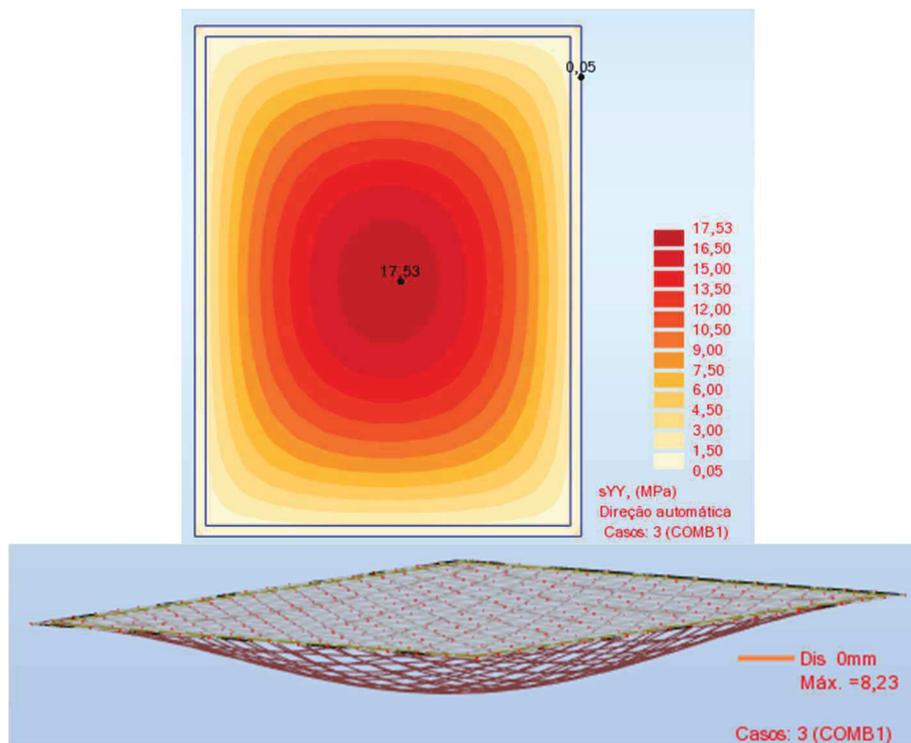


Figura A4.7 – Mapa de tensões (em cima) e deflexões (em baixo) do piso de vidro do tipo 12x3.

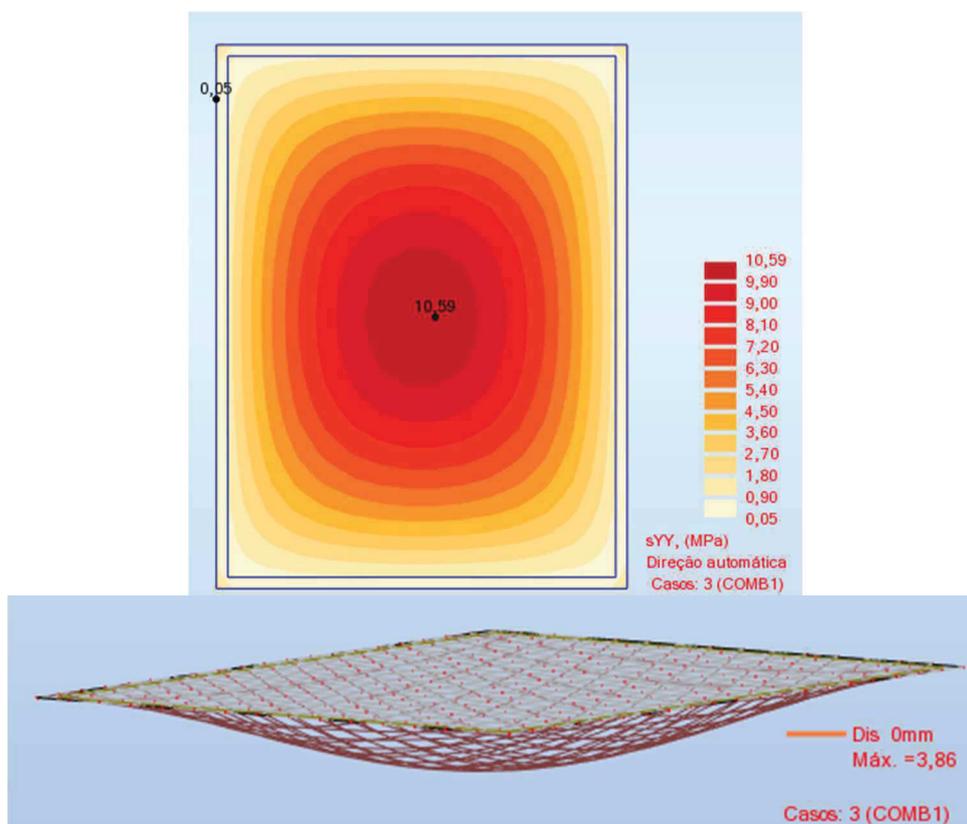


Figura A4.8 – Mapa de tensões (em cima) e deflexões (em baixo) do piso de vidro do tipo 16x3.

SJ MEPLA®

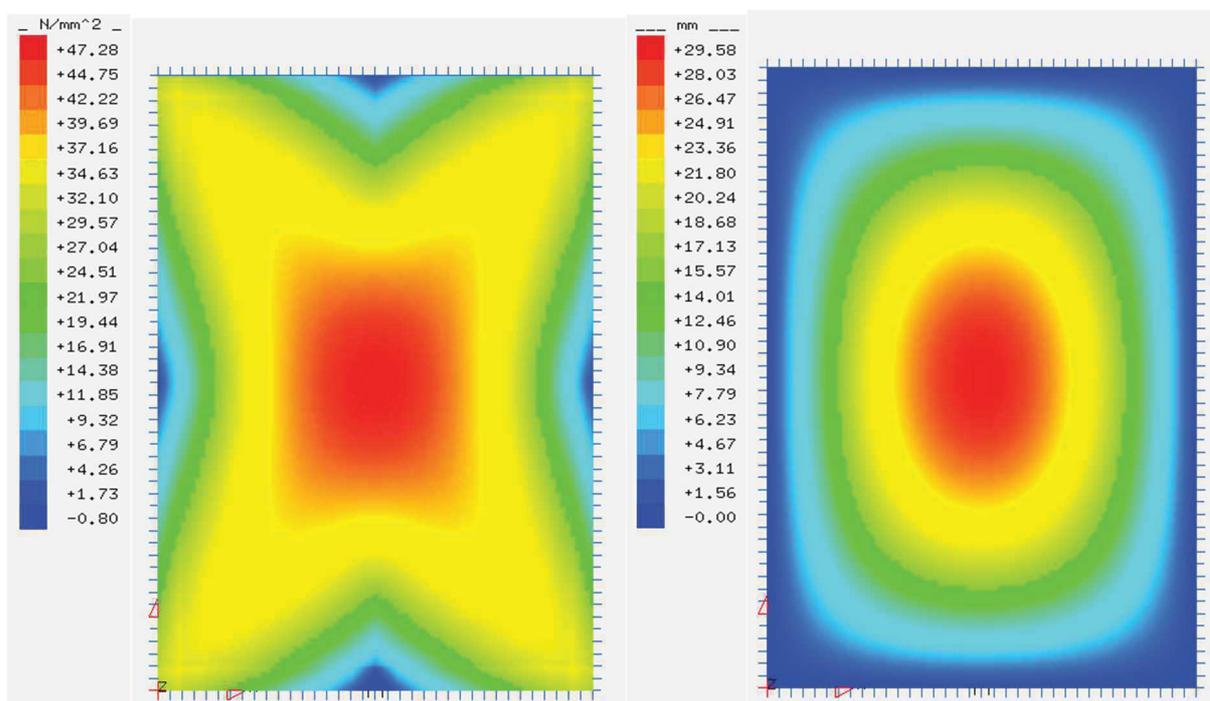


Figura A4.9 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 8x3.

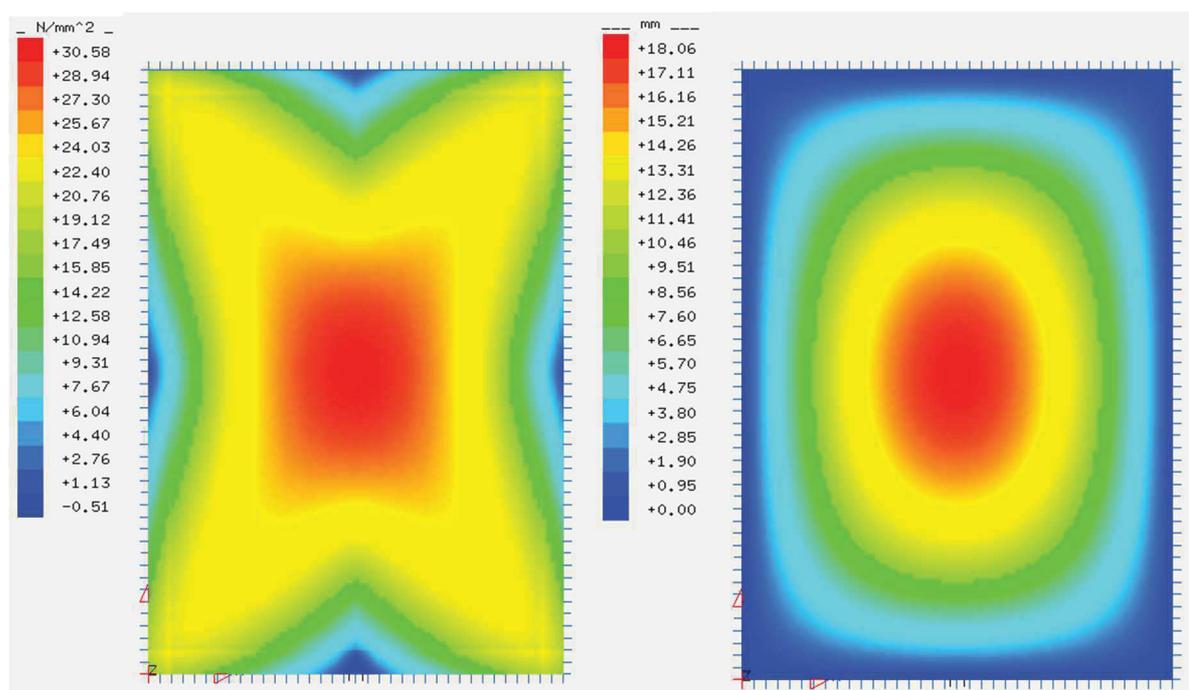


Figura A4.10 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 10x3.

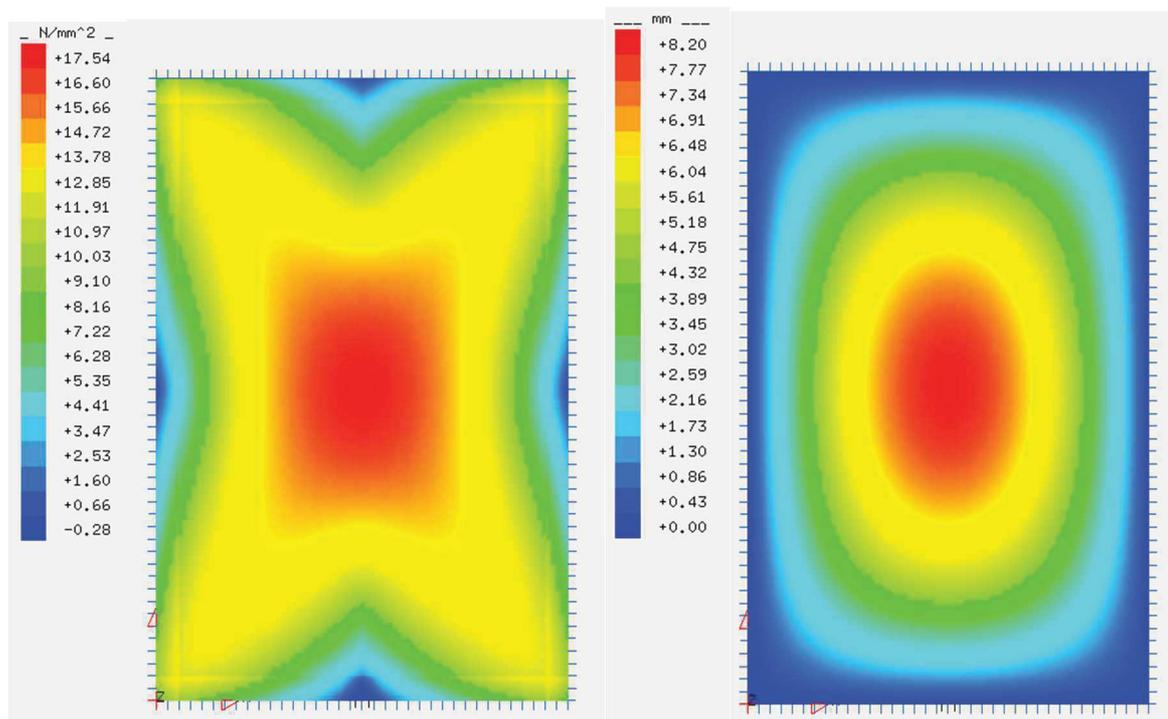


Figura A4.11 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 12x3.

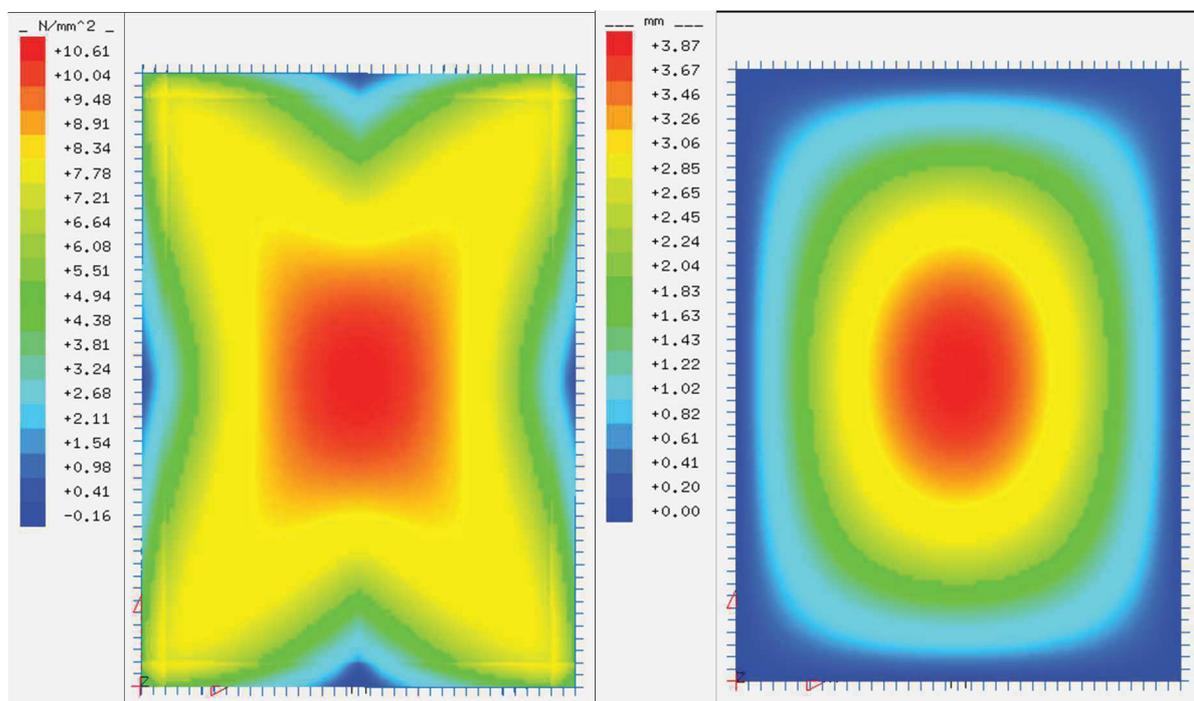


Figura A4.12 – Mapa de tensões (esquerda) e deflexões (direita) do piso de vidro do tipo 16x3.

## ANEXO V – DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS METÁLICOS

### Dados de Entrada

Tensão de Escoamento do Aço (kN/cm<sup>2</sup>):  $f_y := 40$

Tensão Residual do Aço (kN/cm<sup>2</sup>):  $f_r := 9$

Raio de Giro (cm):  $r_y := 5.95$

Raio de Torção (cm):  $r_t := 6.71$

Módulo de Elasticidade (kN/cm<sup>2</sup>):  $E := 21000$

Área (cm<sup>2</sup>):  $A_{seção} := 70$

Comprimento da Mesa (cm):  $b_f := 250$

Espessura da Mesa (cm):  $t_f := 9.5$

Altura da Alma (cm):  $h := 281$

Espessura da Alma (cm):  $t_w := 8$

Módulo Elástico (cm<sup>3</sup>):  $W_x := 767$

Módulo Plástico (cm<sup>3</sup>):  $Z_x := 848$

Espaçamento entre as Transversinas (cm):  $L_b := 200$

Momento Fletor Máximo (kNm):  $M_{máx} := 106.3$

Coefficientes de Majoração e Minoração:  $\gamma := 1.4$     $\phi := 0.9$

### Momento Fletor de Cálculo

Momento Fletor de Cálculo(kNm):  $S_d := \gamma \cdot M_{máx}$     $S_d = 148.82$

### Cálculo $L_{bp}$ e $L_{br}$

$$L_{bp} := 1.75 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad L_{bp} = 238.58 \quad \text{cm}$$

$$x := \frac{40.75}{E} \cdot (f_y - f_r) \cdot \left[ \frac{(r_t \cdot h)}{b_f \cdot t_f} \right]^2 \quad x = 0.038$$

$$L_{br} := \frac{19.9 \cdot r_t^2 \cdot h}{b_f \cdot t_f} \cdot \frac{1}{x} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + x^2}} \quad L_{br} = 3.955 \times 10^3 \text{ cm}$$

$$\text{Viga} := \begin{cases} \text{"Curta"} & \text{if } L_b \leq L_{bp} \\ \text{"Intermediária"} & \text{if } L_{bp} < L_b \leq L_{br} \end{cases} \quad \text{Viga} = \text{"Curta"}$$

### Cálculo Viga Curta

$$\text{Resistência à Flexão (kNm): } M_n := \frac{(\phi \cdot Z_x \cdot f_y)}{100} \quad M_n = 305.28$$

$$\text{Seção} := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } M_n \geq S_d \\ \text{"Redimensionar"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Seção} = \text{"Ok"}$$