

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

UM MÉTODO DE ENSAIO DE ESTRUTURAS DE GUARDA-
CORPOS PROVISÓRIOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Diniane Baruffi

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

B295m Baruffi, Diniane

Um método de ensaio de estruturas de guarda-corpos provisórios para a construção civil / Diniane Baruffi. – 2021. 204 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Guarda-corpo. 2. Construção civil - Medidas de segurança. 3. Segurança do trabalho. I. Chamberlain Pravia, Zacarias Martin, orientador. II. Título.

CDU: 624:331.45

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Diniane Baruffi

UM MÉTODO DE ENSAIO DE ESTRUTURAS DE
GUARDA-CORPOS PROVISÓRIOS PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Passo Fundo

2021

Diniane Baruffi

**UM MÉTODO DE ENSAIO DE ESTRUTURAS DE GUARDA-CORPOS
PROVISÓRIOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Orientador

Professora Dra. Poliana Dias de Moraes
Universidade Federal de Santa Catarina

Professor Dr. Marcelo Fabiano Costella
Universidade Comunitária da Região de Chapecó

Professor Dr. Moacir Kripka
Universidade de Passo Fundo

AGRADECIMENTOS

Início os agradecimentos deste trabalho a Deus, nada seria possível se não fosse no tempo de Deus, creio e acredito em ti.

Diversas pessoas fizeram parte do desenvolvimento deste trabalho, com isso meus agradecimentos seguem.

Primeiramente, aos meus pais, Cleomar Paulo Baruffi e Marisa Salete Gasparetto Baruffi e irmão Alisson Baruffi, que estiveram sempre ao meu lado me incentivando e me auxiliando, inclusive, com os ensaios experimentais.

Demais pessoas da minha família que me apoiaram na caminhada e estiveram sempre ao meu lado.

Ao meu orientador Zacarias Martin Chamberlain Pravia pelos assessoramentos e conselhos de vida.

Ao professor Marcelo Fabiano Costella que esteve disponível para auxiliar na elaboração dos artigos.

A Universidade de Passo Fundo, que esteve ao meu lado na graduação em Engenharia Civil e mestrado e doutorado em Engenharia. Em nome da instituição também agradeço às diversas pessoas com as quais tive contato e recebi auxílio ao longo desses 12 anos.

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões minha segunda casa. Em nome da instituição, agradeço aos meus colegas de trabalho e alunos que participaram dessa caminhada.

Às empresas que realizaram a doação das estruturas para que este trabalho fosse possível.

Aos meus amigos que contribuíram tanto em aspectos intelectuais como com palavras amigas, igualmente necessárias.

Às adversidades que apareceram ao longo do caminho, sem elas não nos tornaríamos pessoas mais fortes.

Meu muito obrigada!

“Mas vivi!
E ainda vivo!
Não passo pela vida.
E você também não deveria passar!

Viva!!

Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão,
perder com classe
e vencer com ousadia,
porque o mundo pertence a quem se atreve
e a vida é muito para ser insignificante.”

Augusto Branco

RESUMO

A construção civil é um setor importante para o desenvolvimento econômico e social do país, contudo, estatísticas demonstram que esse setor apresenta um elevado número de acidentes de trabalho. Entre os acidentes, as quedas de altura em obras chamam a atenção da indústria da construção civil, do Estado e de órgãos de fiscalização. Guarda-corpos provisórios são sistemas de proteção coletiva de periferia utilizados na construção civil para a prevenção de quedas de altura com o objetivo de evitar acidentes de trabalho. Neste trabalho, buscou-se reunir o estado da arte na literatura especializada e analisar requisitos das estruturas usuais para esse fim juntamente do estudo das metodologias adotadas nos ensaios experimentais realizados para a verificação da resistência dessas estruturas. No campo das estruturas de guarda-corpos usadas com esse objetivo, no Brasil, existem especificações nas normas NR-18 e NR-35, porém, não existe definição de metodologia de ensaios para a verificação da resistência das estruturas. Em normas internacionais, existem metodologias definidas, como na norma europeia EN 13374:2013 e da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994.1:2009, porém, essas normas divergem entre si, e ainda, outras normas que indicam as cargas que as estruturas devem resistir como a estadunidense OSHA 1926.502:2016 e no Canadá com a norma do Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4). Para atingir os objetivos, são sugeridos métodos de ensaios experimentais compatíveis com normas nacionais para a avaliação das estruturas de guarda-corpos provisórios para a construção civil. Foram realizados ensaios experimentais, de acordo com a metodologia de ensaio de normas internacionais existentes e de acordo com a proposta deste trabalho. Neste contexto, este estudo: a) orienta sobre os cuidados e as medidas a serem tomadas nos projetos de estruturas de guarda-corpos em aço e madeira; b) indica a importância dos ensaios experimentais para validação das estruturas e segurança dos trabalhadores; c) valida uma metodologia de ensaios experimentais estáticos padrão possíveis de serem utilizados pelas normativas brasileiras.

Palavras chaves: Guarda-corpo. Queda em altura. Ensaios experimentais.

ABSTRACT

Civil construction is an important sector for the country's economic and social development, however, statistics show that this sector has a high number of work accidents. Among the accidents, falls from heights on construction sites draw the attention of the civil construction industry, the State and inspection office. Temporary guardrails are collective protection systems in the periphery used in civil construction to prevent falls from heights in order to avoid work accidents. In this work, we sought to gather the state of the art in the specialized literature and analyze the requirements of the usual structures for this purpose, together with the study of the methodologies adopted in the experimental tests carried out to verify the strength of these structures. In the field of guardrail structures used for this purpose, in Brazil, there are specifications in the NR-18 and NR-35 standards, however, there is no definition of test methodology for verifying the strength of the structures. In international standards, there are defined methodologies, such as the European standard EN 13374:2013 and Australia and New Zealand AS/NZS 4994.1:2009, however, these standards diverge from each other, and also other standards that indicate the loads that structures must withstand as USA OSHA 1926.502:2016 and Canada with the Québec Safety Code for the Construction Industry (S-2.1 r.4). To achieve the objectives, experimental testing methods compatible with national standards are suggested for the evaluation of temporary guardrail structures for civil construction. Experimental tests were carried out, in accordance with the test methodology of existing international standards and in accordance with the proposal of this work. In this context, this study: a) provides guidance on the precautions and measures to be taken in the projects of steel and wood guardrails structures; b) indicates the importance of experimental tests for validating the structures and safety of workers; c) validates a methodology of standard static experimental tests that can be used by Brazilian regulations.

Key words: Guardrails. Fall from height. Static testing method.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEPS	Anuário Estatístico da Previdência Social
AS/NZS	Austrália e Nova Zelândia
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	União Europeia
F	Força
$f_{c0,k}$	Compressão paralela às fibras característica
f_u	Tensão de ruptura
f_y	Tensão de escoamento
h	Altura
L	Vão entre montantes
m	Massa do corpo
MPT	Ministério Público do Trabalho
N.D.	Não disponível
NR	Norma Regulamentadora
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
P	Carga de ensaio
PIB	Produto Interno Bruto
q	Carga distribuída
RO	Rodapé
RS	Rio Grande do Sul
RTP	Recomendação Técnica de Procedimentos
SCCI	<i>Safety Code for Construction Industry</i>
TI	Travessão Intermediário
TS	Travessão Superior
v	Velocidade do deslocamento
W	Trabalho
δ	Deslocamento
Δs	Distância percorrida

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema típico de guarda-corpos	29
Figura 2: Relação altura de barreiras X tombamento	32
Figura 3: Diversas cargas de postura estática em guarda-corpos	33
Figura 4: Manequim liberado para o ensaio dinâmico	34
Figura 5: Força dinâmica e estática no travessão superior exercida pelo percentual de 95 do manequim X distância do calcanhar da estrutura	35
Figura 6: Força dinâmica no travessão intermediário exercida X altura do travessão intermediário.....	36
Figura 7: Sistema de guarda-corpos, segundo EN 13374:2013, em milímetros	40
Figura 8: Sistema de guarda-corpos conforme AS/NZS 4.994.2	41
Figura 9: Sistema de Guarda-corpos de madeira, segundo diretrizes não obrigatórias a OSHA 1926 subparte M App B, em metros.....	43
Figura 10: Sistema de Guarda-corpos de aço, segundo diretrizes não obrigatórias, a OSHA 1926 subparte M App B, em metros.....	43
Figura 11: Sistema de guarda-corpos de madeira, segundo <i>Québec Safety Code for the Construction Industry</i> , em metros	44
Figura 12: Estado limite de serviço, alternativas 1. Cargas agindo separadamente	51
Figura 13: Estado limite de serviço, alternativa 2. Cargas que atuam separadamente.....	51
Figura 14: Estado limite último, alternativa 1 Cargas que atuam separadamente.....	51
Figura 15: Estado limite último, alternativa 2 Cargas que atuam separadamente.....	51
Figura 16: Estado limite último – Carga de vento máxima, ambas as direções	52
Figura 17: Combinação de carga	53
Figura 18: Combinação de carga. Todas as outras peças	53
Figura 19: Carga Horizontal	53
Figura 20: Carga acidental – Cargas que atuam separadamente	54
Figura 21: Esquema do ensaio com aplicação da carga com impacto.....	60
Figura 22: Arranjo experimental para ensaio estático	71
Figura 23: Arranjo experimental para ensaio de impacto.....	73
Figura 24: Manequim de impacto e estrutura articulada para o impacto	75
Figura 25: Método de dimensionamento da estrutura de guarda-corpo	77
Figura 26: Esquema de aplicação de cargas	78

Figura 27: Modelo de Guarda-corpo ensaiado	79
Figura 28: Arranjo experimental para ensaio de impacto.....	80
Figura 29: Equipamento e arranjo experimental para ensaio estático	82
Figura 30: Equipamento e arranjo experimental para ensaio de impacto.....	83
Figura 31: Ponto de aplicação da força e deslocamento no ensaio estático	85
Figura 32: Arranjo experimental ensaio de impacto	85
Figura 33: Modelo de aço, MOD_AÇO	88
Figura 34: Modelo de aço, MOD_AÇO	88
Figura 35: Modelo de madeira MOD_MAD.....	89
Figura 36: Modelo de madeira MOD_MAD.....	89
Figura 37: Arranjo experimental ensaio estático	92
Figura 38: Configurações de aplicação de cargas adotadas pelos autores	93
Figura 39: Arranjo experimental para carregamento no centro do vão do travessão superior	94
Figura 40: Detalhes construtivos do	97
Figura 41: Detalhes construtivos dos pinos para a fixação dos travessões e rodapé, MOD_AÇO_PINOS.....	97
Figura 42: Vista externa MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, em m.....	98
Figura 43: Esquema de montagem do MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS em periferias .	99
Figura 44: Detalhes construtivos do montante em formato de mão-francesa	100
Figura 45: Vista externa MOD_EUC e MOD_PINUS, em m	102
Figura 46: Esquema de montagem do MOD_EUC e MOD_PINUS em periferias	102
Figura 47: Arranjo experimental para o ensaio ELS conforme a EN 13374:2013.....	104
Figura 48: Arranjo experimental para o ensaio ELS, cargas simultâneas, conforme a EN 13374:2013	106
Figura 49: Arranjo experimental para o ensaio ELU conforme a EN 13374:2013.....	107
Figura 50: Arranjo experimental para o ensaio com carregamento horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009.....	109
Figura 51: Arranjo experimental para o ensaio com carregamento vertical na estrutura MOD_AÇO	110
Figura 52: Arranjo experimental para o ensaio vertical conforme a OSHA 1926.502	118
Figura 53: Arranjo experimental para o ensaio horizontal simultâneo conforme a OSHA 1926.502	119

Figura 54: Arranjo experimental para o ensaio conforme o <i>Québec Safety Code for the Construction Industry</i> (S-2.1 r.4)	121
Figura 55: Instrumentação e aplicação da carga de ensaio simultânea no travessão superior e travessão intermediário	126
Figura 56: Ponto de aplicação da carga na estrutura	126
Figura 57: Arranjo experimental conforme NR 18 e cargas da RTP 01	128
Figura 58: Instrumentação e aplicação da carga de ensaio simultânea no travessão superior, travessão intermediário e rodapé	129
Figura 59: Ponto de aplicação da carga na estrutura	129
Figura 60: Arranjo experimental, posição dos relógios, NR 18, versão 2020.....	131
Figura 61: Deslocamentos para ensaios no ELS e ELU - EN 13374:2013 (ensaio 1 e ensaio 2).....	137
Figura 62: Deslocamentos no elemento de rodapé no ELS - EN 13374:2013 (ensaio 1). 139	
Figura 63: Descolamentos para o travessão superior, conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009	141
Figura 64: Descolamentos para o travessão intermediário conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009	142
Figura 65: Descolamentos para o rodapé conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009.....	143
Figura 66: Deslocamentos para o travessão superior conforme ensaio 4 - OSHA 1926.502	145
Figura 67: Deslocamentos para os modelos conforme ensaio 5 – OSHA 1926.502.....	147
Figura 68: Nó na madeira <i>Pinus Elliottii</i>	148
Figura 69: Deslocamentos para o travessão superior conforme ensaio 6 - código do Québec (S-2.1, r.4).....	149
Figura 70: Ruptura MOD_AÇO_PINOS e MOD_PINUS. a) vista lateral da ruptura do MOD_AÇO_PINOS; b) e c) detalhe do elemento de fixação; d) ruptura do travessão superior MOD_PINUS	151
Figura 71: Guarda-corpo MOD_AÇO: a) deslocamento na estrutura; b) Afrouxamento/falha no montante; c) Falha/fissura no montante	152
Figura 72: Comparação modelos em madeira; a) e b) deslocamentos MOD_EUC; c) Ruptura MOD_PINUS	153
Figura 73: Comparação MOD_EUC e MOD_PINUS; a) Deslocamento MOD_MAD_PINUS; b) e c) Fissuras na madeira do MOD_MAD_EUC	155

Figura 74: Ruptura no modelo MOD_AÇO_PINOS. a) Ruptura. b) falha por esmagamento do perfil. c) Fissura na solda da ligação e na madeira do rodapé	156
Figura 75: Comparação entre as diferentes normas.....	159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Revisão de requisitos geométricos em normas.....	46
Quadro 2: Requisitos de carga estática pela EN 13374:2013.....	50
Quadro 3: Revisão de requisitos de resistência em normas.....	56
Quadro 4: Revisão de requisitos para ensaios experimentais estáticos em normas	63
Quadro 5: Revisão de requisitos para ensaios experimentais de impacto em normas	64
Quadro 6: Resultado da revisão bibliométrica sobre o tema (continua).....	66
Quadro 7: Características construtivas dos guarda-corpos.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânica dos modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS	98
Tabela 2: Propriedades mecânica dos montantes mão-francesa.....	100
Tabela 3: Propriedades mecânica dos travessões e rodapés em madeira	101
Tabela 4: Resumo das metodologias de ensaios estáticos com metodologias definidas nas normas EN 13374:2013 e AS/NZS 4.994.1:2009 (continua).....	111
Tabela 5: Resumo das metodologias de ensaios estáticos conforme cargas das normas OSHA 1926.502 e S-2.1 r.4 (continua)	123
Tabela 6: Resumo das metodologias de ensaios propostas neste trabalho	133
Tabela 7: Deslocamentos limites considerando 0,16667 mm/N	135
Tabela 8: Deslocamentos médios Ensaio 1 – EN 13374:2013 e Ensaio 2 – EN 13374:2013	136
Tabela 9: Deslocamentos médios Ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009	140
Tabela 10: Deslocamentos médios Ensaio 4 – OSHA 1926.502	144
Tabela 11: Deslocamentos médios Ensaio 5 – OSHA 1926.502	146
Tabela 12: Deslocamentos médios Ensaio 6 – código do Québec (S-2.1, r.4).....	148
Tabela 13: Deslocamentos médios Ensaio 7 – NR 18 e RTP 01.....	151
Tabela 14: Deslocamentos médios Ensaio 8 – NR 18.....	154
Tabela 15: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_AÇO_PINOS.....	178
Tabela 16: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_AÇO	179
Tabela 17: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_EUC.....	180
Tabela 18: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_PINUS	181
Tabela 19: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 2) - ELU.....	182
Tabela 20: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO_PINOS.....	183
Tabela 21: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO	184
Tabela 22: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC.....	185
Tabela 23: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_PINUS	186

Tabela 24: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO_PINOS.....	187
Tabela 25: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO	188
Tabela 26: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC.....	189
Tabela 27: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_PINUS	190
Tabela 28: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO_PINOS	191
Tabela 29: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO	192
Tabela 30: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC.....	193
Tabela 31: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_PINUS .	194
Tabela 32: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ AÇO_PINOS.....	195
Tabela 33: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ AÇO	195
Tabela 34: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ EUC.....	196
Tabela 35: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ PINUS	196
Tabela 36: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_AÇO_PINOS.....	197
Tabela 37: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_AÇO	197
Tabela 38: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_EUC.....	198
Tabela 39: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_PINUS	198
Tabela 40: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ AÇO_PINOS	199
Tabela 41: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ AÇO.....	199
Tabela 42: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ EUC.....	200
Tabela 43: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ PINUS	200
Tabela 44: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_AÇO_PINOS	201
Tabela 45: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_AÇO.....	201
Tabela 46: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_EUC	202
Tabela 47: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_PINUS.....	202
Tabela 48: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_AÇO_PINOS	203
Tabela 49: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_AÇO	203

Tabela 50: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_EUC..... 204

Tabela 51: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_PINUS . 204

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	25
1.2	Objetivos	26
1.2.1	Objetivo Geral	27
1.2.2	Objetivos Específicos	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	Sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos	28
2.1.1	Montante	29
2.1.2	Travessão	29
2.1.3	Rodapé	30
2.1.4	Ancoragem	30
2.2	Estudo antropométrico e cinemático de impacto	30
2.3	Revisão de requisitos geométricos e de resistência	37
2.3.1	Requisitos geométricos	37
2.3.2	Comparação dos requisitos geométricos entre as normatizações	45
2.3.3	Requisitos de resistência	47
2.3.4	Comparação dos requisitos de resistência.....	55
2.4	Métodos de ensaio para estruturas de guarda-corpos	56
2.4.1	Ensaio estáticos	57
2.4.2	Ensaio de impacto.....	60
2.5	Comparação dos métodos de ensaio entre as normativas	62
2.6	Revisão bibliométrica	65
2.7	Revisão Sistêmica	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	96
3.1	Modelos analisados.....	97

3.2	Ensaaios estáticos por normas com metodologia definida	103
3.2.1	Ensaaios Estáticos conforme EN 13374:2013 - União Europeia (ensaio 1 e ensaio 2)	103
3.2.2	Ensaaios Estáticos conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3).....	108
3.3	Análise de ensaios estáticos com as prescrições normativas	113
3.3.1	Análise quanto ao tempo de duração da carga.....	113
3.3.2	Análise quanto ao valor da pré-carga e da carga	113
3.3.3	Análise quanto ao sentido e simultaneidade de aplicação da carga... ..	114
3.3.4	Análise do comportamento dos materiais utilizados.....	115
3.4	Procedimento de Ensaio Estático Padrão.....	115
3.5	Aplicação do Procedimento de Ensaio Estático Padrão	116
3.5.1	Ensaaios Estáticos segundo a OSHA 1926.502 (ensaio 4 e ensaio 5). ..	116
3.5.2	Ensaaios Estáticos segundo as cargas do Québec <i>Safety Code for the Construction Industry</i> (S-2.1 r.4) (ensaio 6)	120
3.6	Ensaaios propostos para aplicação no Brasil.....	125
3.6.1	Ensaio estático segundo as cargas da NR 18, versão 2018.....	125
3.6.2	Ensaio estático segundo as cargas da NR 18, versão 2020.....	128
3.7	Critérios de Aceitação.....	134
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	136
4.1	Resultados dos ensaios estáticos por normas com metodologia definida ..	136
4.1.1	Ensaaios estáticos conforme a EN 13374 (ensaio 1 e ensaio 2)	136
4.1.2	Ensaaios estáticos conforme a AS/NZS 4994.1 (ensaio 3).....	139
4.2	Resultados para a aplicação da metodologia de ensaio estático padrão ..	144
4.2.1	Ensaaios estáticos conforme as cargas da OSHA 1926.502 (ensaio 4).....	144
4.2.2	Ensaaios estáticos para carregamento simultâneo definido pela OSHA 1926.502 (ensaio 5)	146

	4.2.3	Ensaio estático conforme as cargas do <i>Québec Safety Code for the Construction Industry</i> (S-2.1 r.4) (ensaio 6)	147
	4.3	Resultados para os Ensaio Propostos para a aplicação no Brasil.....	150
	4.3.1	Ensaio estático para carregamento definido pela NR 18 e RTP 01 (ensaio 7)	150
	4.3.2	Ensaio estático para carregamento definido pela NR18 (ensaio 8)	153
	5	DISCUSSÕES.....	157
	5.1	Análise das metodologias de ensaio conforme as normas.....	157
	5.2	Análise dos modelos ensaiados.....	162
	5.3	Análise do método de ensaio proposto	166
18	6	ESPECIFICAÇÃO DE ENSAIO PROPOSTA PARA ADEQUAÇÃO DA NR	168
	6.1	Sugestão de alteração no texto da NR 18 versão 2020	168
	6.2	Procedimento de ensaio	169
	6.3	Critérios de aceitação	169
	6.4	Relatório.....	169
	7	CONCLUSÕES.....	170
	7.1	Sugestão para trabalhos futuros	171
		REFERÊNCIAS	172
		APÊNDICE A.....	177
		APÊNDICE B.....	183
		APÊNDICE C	195
		APÊNDICE D.....	199
		APÊNDICE E	201
		APÊNDICE F	203

1 INTRODUÇÃO

Acidente de Trabalho é definido no artigo 19 da Lei nº 8.213 de 24 de julho de 1991, como “lesão corporal ou perturbação funcional que cause a morte, a perda ou redução, permanente ou temporária da capacidade para o trabalho” quando ocorrida no desempenho de tarefas a serviço de uma empresa (BRASIL, 1991, p.11).

No Brasil, a existência de serviços de medicina e de engenharia do trabalho tornou-se obrigatória a partir da publicação da portaria nº 3.237. Em 8 de junho de 1978, por meio da Portaria nº 3.214, foram criadas as Normas Regulamentadoras (NR) (GONÇALVES; CRUZ, 2010).

Segundo a NR 1, tem-se como obrigatória a observância das normas regulamentadoras por empresas e órgãos públicos que possuem empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) (BRASIL, 2019a).

Dados do Ministério de Trabalho e Emprego revelam que o setor da construção civil apresenta elevados índices de acidentes de trabalho, o que acarreta, igualmente, elevados custos para as empresas, o Estado e o próprio cidadão.

Em relação aos acidentes de trabalho observados no setor, no Brasil, o Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (BRASIL, 2021) deu origem à Plataforma SmartLab de Trabalho Decente, sendo uma iniciativa conjunta do Ministério Público do Trabalho (MPT) e da Organização Internacional do Trabalho (OIT) Brasil.

Como objetivo principal, a plataforma do SmartLab busca facilitar o acesso à informação dos diversos bancos de dados e anuários governamentais, com a finalidade de promover políticas públicas, visando à prevenção de acidentes e de doenças ocupacionais (BRASIL, 2021).

Segundo a Plataforma SmartLab (BRASIL, 2021), a atividade de construção de edifícios encontra-se em 5º lugar entre os setores econômicos com mais comunicações de acidente, perdendo apenas pelas atividades de atendimento hospitalar, comércio de alimentos (hipermercados e supermercados), administração pública em geral e transporte rodoviário de cargas.

O Anuário Estatístico da Previdência Social (AEPS) divulgado no ano de 2018 dispõem de dados dos acidentes de trabalho ocorridos nos anos de 2015, 2016 e 2017 em que pode ser visualizado o número total de acidentes de trabalho e o número de acidentes registrado no setor da construção civil (BRASIL, 2018a).

Para o ano de 2015, registrou-se um total de 622.379 acidentes de trabalho, com a construção civil, correspondendo a 45.376, aproximadamente 7,29%. Para o ano de 2016, a totalidade de acidentes foi 585.626, aproximadamente 6,35% desses na construção civil. Para o ano de 2017, tem-se um total de 549.405 acidentes registrados e a construção civil representa 30.025, um percentual de 5,47% (BRASIL, 2018a).

A plataforma SmartLab ainda apresenta que, entre os anos de 2012 e 2020, a atividade de construção de edifícios apresentou um total de notificações de acidentes de trabalho de 119.608 acidentes, sendo o pico no ano de 2012 com 21.394, vindo a diminuir nos anos subsequentes. Ainda entre as ocupações com mais notificações de acidente de trabalho, tem-se a função de servente de obras, com um total de 115.779 entre os anos de 2012 e 2020, com o pico registrado também no ano de 2012 com 19.258, ocupando a sexta posição nos cargos com mais acidentes (BRASIL, 2021).

A construção civil é um setor que agrega um conjunto de atividades que colabora para o desenvolvimento econômico e social do país, relacionando-se com diversos setores industriais da economia, para compra de insumos em seu processo produtivo, contribuindo com uma parcela significativa na contratação de mão de obra com menor qualificação, tornando a análise do setor complexa, sendo que a capacidade produtiva e o desenvolvimento nacional estão diretamente interligadas ao setor (SEBRAE, 2015).

Sulowski (2014) afirma que o fator humano se coloca em primeiro lugar no que tange à adoção de medidas preventivas e após os aspectos econômicos gerados por quedas em altura, que se apresentam como um problema para a construção civil.

Ainda, mundialmente, existem diversos regulamentos, mas que o primeiro regulamento conhecido contra quedas prescreve: “Quando edificares uma casa nova, farás no teu telhado um parapeito, para que não ponhas culpa de sangue na tua casa, se alguém de alguma maneira cair dali” (Moisés, Antigo Testamento, Livro de Deuteronômio, Várias Leis, 22,8, pág. 350).

As disposições legais e regulamentares sobre segurança e saúde no trabalho abrangem diversas particularidades da Engenharia Civil. No Brasil, com o intuito de estabelecer requisitos e procedimentos relativos à segurança e à medicina do trabalho, as Normas Regulamentadoras contam com unidades focadas em determinados assuntos.

A NR 18 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção (BRASIL, 2018b) pode ser destacada dentre as demais por abordar amplamente as diretrizes de ordem administrativa, planejamento e organização para adoção de medidas e de sistemas

de controles e de prevenção de segurança nos processos, condições e no meio ambiente de trabalho na indústria da construção. Essa norma regulamentadora passou por recentes alterações, publicadas em 2020, passando a se chamar NR 18 – Condições de Segurança e Saúde no Trabalho na Indústria da Construção (BRASIL, 2020) com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, buscando simplificar o texto da norma e harmonizar com demais normas vigentes no campo da segurança do trabalho.

Com a atualização da norma regulamentada na NR 18, visualiza-se uma tendência de que o responsável técnico, legalmente habilitado, tenha autonomia para atender as prescrições com soluções técnicas projetadas para as demandas locais.

Outras normas também estão diretamente relacionadas a esse campo de atuação e devem ser observadas na indústria da construção. Os Equipamentos de Proteção Individual - EPIs constam na NR 6 (BRASIL, 2018c), a qual institui as circunstâncias que obrigam o fornecimento desses equipamentos aos empregados por parte da empresa, além de elencar demais responsabilidades tanto do empregador, quanto do trabalhador e do fabricante ou importador.

As condições mínimas e as medidas de proteção para atividades em altura formam a NR 35 – Trabalho em Altura que define como devem ser realizados os trabalhos em altura no Brasil, estabelecendo requisitos mínimos e as medidas de proteção para a realização de trabalhos em altura desde o planejamento, a organização até a execução dos serviços. Segundo a NR 35, é considerado trabalho em altura, todo o trabalho realizado acima de 2,00 m do nível inferior, em que haja risco de queda (BRASIL, 2019b).

A Construção Civil apresenta elevados índices de acidentes, o que se deve fato da ausência de medidas de segurança do trabalho em obras civis. Para Zlatar *et al.* (2019), em 98% dos casos analisados no estudo realizado, a falta de medidas de proteção para trabalhos em altura foi a causa dos acidentes e 65,8% produzidos por falha de estruturas de guarda-corpos.

Com isso, a prevenção de acidentes mostra-se fundamental para evitar eventuais danos ao trabalhador, que pode perder a sua capacidade laboral e a possibilidade de desfrutar de uma vida saudável. Um dos equipamentos de proteção coletiva para prevenir acidentes de trabalhos relativos à queda de altura é a utilização de estruturas provisórias com a finalidade de impedir a queda, do tipo guarda-corpos provisórios para a construção civil.

Diante desse cenário, observa-se que as discussões sobre o assunto vêm crescendo na construção civil. Quanto às estruturas para a segurança do trabalho do tipo guarda-corpos, as normas nacionais e internacionais apresentam requisitos geométricos e de resistência.

Comparativamente, percebe-se que os requisitos geométricos são muito similares, porém, tais normas variam, consideravelmente, quanto às metodologias de avaliação de solicitações, estáticas e de impacto, geradas no caso de uma queda.

No Brasil, as normas reguladoras NR 18 – Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção e NR 35 – Trabalho em altura dispõem de prescrições para a prevenção do trabalhador relativas à queda de alturas e especificações técnicas descritivas sobre como devem ser realizados os trabalhos em altura e medidas necessárias para a prevenção de quedas. porém, não especificam um método de ensaio estático e de impacto para validação da resistência dessas estruturas (BRASIL, 2018b; BRASIL, 2019b; BRASIL, 2020).

A NR 18 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção (BRASIL, 2018b), que se encontra em vigor na publicação deste trabalho, apresenta lacunas em relação às medidas a serem adotadas para a realização de trabalho em altura, principalmente, quanto às cargas que devem ser aplicadas nas estruturas e os critérios de aceitação.

Com o objetivo de subsidiar o cumprimento da NR 18 pelas empresas, profissionais, governos e trabalhadores a Fundacentro – Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho apresenta a Recomendação Técnica de Procedimentos – RPT 01, que orienta sobre as medidas de proteção contra quedas em alturas a serem adotadas nos trabalhos em altura na indústria da construção (FUNDACENTRO, 2003).

A própria NR 18 (BRASIL, 2020), no texto que entra em vigor a partir de 3 de janeiro de 2022, foi reformulada. Essa versão traz alterações para as estruturas de guarda-corpos provisórios. Foram atualizadas as cargas exigidas, fornecendo um deslocamento limite para a estrutura, porém, a norma ainda apresenta uma divergência em relação às normativas internacionais, deixando de fornecer maiores informações, incluindo a inexistência de métodos de ensaio e validação das estruturas usadas para garantir a realização do trabalho em altura, apresentando-se como um tema atual e que deve ser discutido e pesquisado.

Mesmo com a alteração da NR 18, observa-se a inexistência de uma norma que oriente como avaliar as estruturas por meio de ensaios experimentais com um método de ensaio específico que oriente sobre os tempos de aplicação das cargas, o ponto de aplicação

e as cargas a serem aplicadas nas estruturas para um estado de serviço e um estado último para guarda-corpos provisórios para a construção civil em que seja possível um controle experimental por amostragem, conforme conclui Baruffi (2017) em seu trabalho sobre análise numérica e experimental de estruturas de guarda-corpos.

Esse tema gera diversos questionamentos acerca de se as estruturas que estão sendo utilizadas em obras atualmente são capazes de absorver um impacto caso um trabalhador venha a cair contra essas, ainda mais, na ausência de métodos de ensaio para guarda-corpos provisórios para a construção civil de modo a validar a resistência dessas estruturas.

Na literatura, existem normativas internacionais que orientam métodos de ensaios, porém, diferem entre elas, conforme a necessidade de cada localidade, quanto ao tempo de aplicação e os respectivos valores de pré-carga e de carga a serem aplicados nas estruturas, tanto em fase de Estado Limite de Serviço (ELS) como em fase de Estado Limite Último (ELU). Essas normativas serão utilizadas para balizar os ensaios propostos neste trabalho e definir a proposta de um método de ensaio para as estruturas.

Assim, o problema mostra-se atual e complexo, visto que não possui legislação no Brasil, nem orientações para dimensionamento e métodos de ensaios, estáticos e de impacto, de guarda-corpos para balizar se as estruturas utilizadas em obras estão condizentes com a necessidade de uso no caso de uma queda.

Torna-se substancial um melhor entendimento de como atuam os esforços nessas estruturas, analisando-as, a fim de propor um método de ensaio experimental de maneira que assegurem a proteção necessária das pessoas envolvidas no processo construtivo.

Com isso, esse estudo tem o objetivo de propor e comprovar um método de ensaio estático para as estruturas de guarda-corpos provisórios para a construção civil, a fim de alavancar normas específicas de segurança do trabalho, avaliar as estruturas de suporte para atividades em altura, proporcionar às empresas uma orientação sobre o atendimento a normas específicas e aos trabalhadores segurança para desempenhar suas tarefas.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, são apresentados, além deste capítulo, outros seis. O segundo capítulo, destina-se a apresentar uma revisão bibliográfica sobre guarda-corpos bem como as normatizações sobre o sistema em níveis nacionais e internacionais, inclusive com uma comparação realizada entre tais normatizações. Expõem, ainda, estudos já realizados sobre o tema.

No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida para o trabalho, com os ensaios experimentais realizados e a proposta de metodologia de ensaio estático para as estruturas de guarda-corpos para aplicação nas normas brasileiras.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados alcançados na análise e discussão realizadas. E, no quinto capítulo, tem-se a discussão acerca das observações realizadas na apresentação dos resultados.

Ainda, no sexto capítulo, é apresentada a especificação de ensaio proposta para adequação da NR 18.

E para finalizar, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o tema tratado e as sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Justificativa

A partir do cenário existente, o tema quer resolver a necessidade de maiores orientações em normas de referência quanto aos métodos de avaliação dos sistemas de guarda-corpos por meio de ensaios para a adoção das medidas de segurança efetivas para a proteção dos trabalhadores em trabalho com risco de queda em alturas.

Estruturas de guarda-corpos na periferia são os sistemas mais adotados para proteção coletiva dos trabalhadores com risco de queda de altura, pesquisas realizadas demonstram que a implantação de medidas de proteção de periferias são de difícil cumprimento pelas empresas, principalmente pela precariedade e técnicas utilizadas, e são uma das principais causas de embargos e interdições por parte da fiscalização do Ministério do Trabalho (BRIDI et al., 2013; COSTELLA; JUNGES; PILZ, 2014; PEÑALOZA; FORMOSO; SAURIN, 2015).

Este trabalho é continuidade da dissertação de mestrado intitulada “Análise numérica e experimental de estruturas de guarda-corpos para a segurança do trabalho na construção civil”, dos mesmos autores, tendo como foco estudar os ensaios existentes em normas internacionais e, com isso, propor ensaios experimentais, para a utilização no Brasil, diante das exigências de normas nacionais.

Tendo em vista essas considerações, primeiramente, indica-se o aspecto social relativo à segurança de trabalhadores e de todas as pessoas envolvidas na indústria da construção civil. Apresenta-se o tema como pertinente, uma vez que visa a garantir que as

estruturas de guarda-corpos satisfaçam às suas exigências e assegurem o processo construtivo bem como os seres humanos envolvidos.

Perante o aspecto de desenvolvimento econômico de uma nação, os elevados custos que os acidentes de trabalho geram para as empresas, o Estado e o próprio cidadão, que, muitas vezes, tem o seu direito de vida interrompido ou torna-se incapaz de exercer suas funções e habilidades, revela-se mais um ponto fundamental para a avaliação experimental das estruturas de guarda-corpos, de acordo com as exigências, considerando o trabalho e o risco de quedas de altura.

Com o foco nos construtores em geral e nas próprias comissões envolvidas no desenvolvimento de regulamentações para a construção civil, o tema busca garantir que as estruturas utilizadas em canteiros de obras sejam capazes de garantir a segurança dos trabalhadores por meio de avaliações experimentais, trazendo mais confiabilidade na realização das tarefas e o atendimento a normas específicas para a segurança do trabalho.

Além do apresentado, são, igualmente, objetivos deste estudo realizar a análise experimental das estruturas de guarda-corpos utilizadas em canteiros de obras do município de Passo Fundo, por meio de normas internacionais com metodologias de ensaios definidas; aplicar as cargas de normas sem metodologia de ensaio a partir de uma metodologia padrão criada em função das normas que apresentam metodologias definidas; propor um método de ensaio aplicável à legislação nacional que objetive a verificação das estruturas de forma a impulsionar normas específicas brasileiras; avaliar o desempenho das estruturas de suporte para a segurança do trabalho em altura; e proporcionar às empresas uma instrução sobre o atendimento a normas específicas e aos trabalhadores sobre a segurança para desempenhar suas atividades.

1.2 Objetivos

São apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos delimitados para a realização deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um método de ensaio estático, compatível com normas regulamentadoras brasileiras, para estruturas do tipo guarda-corpos provisórios para a construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar experimentalmente as estruturas dos guarda-corpos provisórios utilizados no município de Passo Fundo – RS para verificar se as estruturas garantem a segurança dos trabalhadores da construção.
- b) Avaliar as prescrições em normas internacionais para métodos de ensaios;
- c) Ensaiar estruturas de guarda-corpos usuais na construção civil de acordo com normas internacionais existentes para avaliar as prescrições definidas e propor um método de ensaio em função dessas;
- d) Definir uma metodologia de ensaio estático para guarda-corpos aplicáveis à construção civil;
- e) Verificar requisitos de desempenho para os métodos de ensaio para sistemas de proteção de periferia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada uma revisão bibliográfica com o objetivo de definir o que são as estruturas de guarda-corpos e requisitos para essas estruturas.

Inicialmente, será apresentado o estudo sobre antropometria e avaliação de cargas estáticas e de impacto geradas pela ação do corpo humano.

Na sequência, serão apresentadas revisões em normas nacionais e internacionais pertinentes a realização de trabalhos em altura e sistemas provisórios para trabalho em altura na construção civil, apresentando comparativos entre essas quanto a requisitos geométricos, de resistências, ensaios experimentais estáticos e de impacto.

Também serão apresentados estudos sobre ensaios estáticos e de impactos realizados em estruturas de guarda-corpos para fundamentar a pesquisa realizada.

2.1 Sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos

De acordo com a Recomendação Técnica de Procedimentos, Medidas de proteção contra quedas de altura, conhecida como RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003), sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos é definido como estruturas destinadas a proteger contra riscos de queda de altura pessoas, materiais e ferramentas, que possam estar sobre o nível de trabalho.

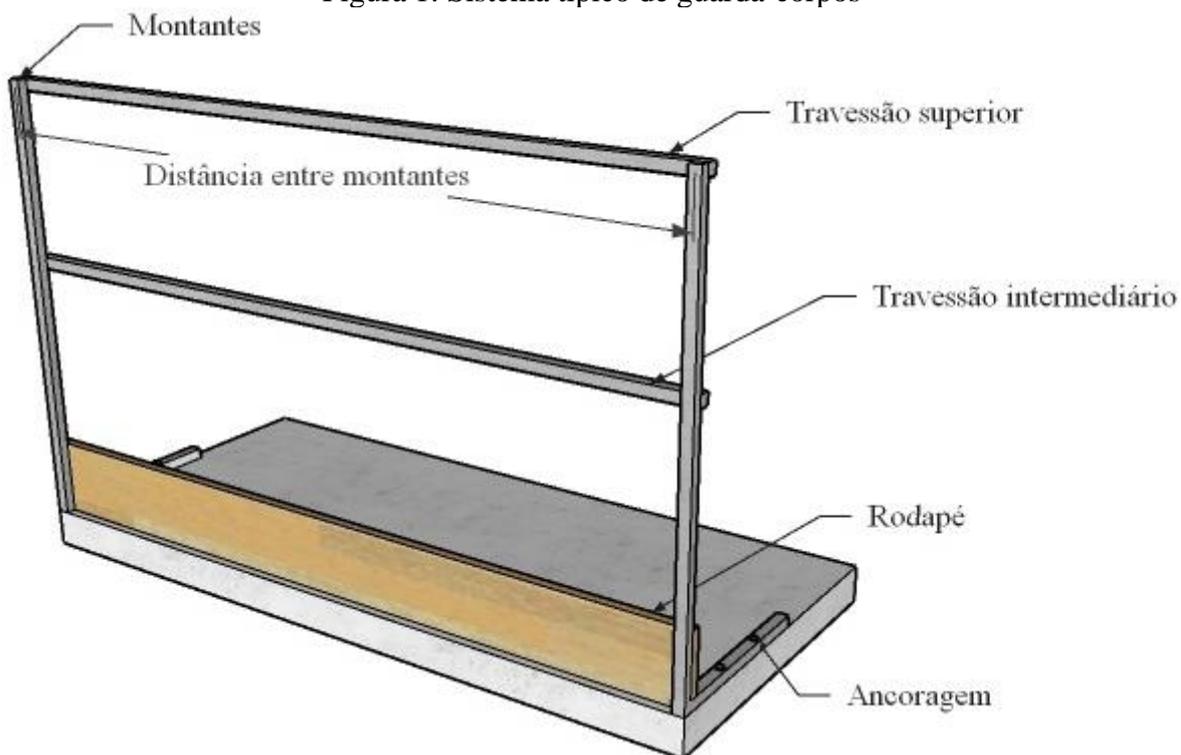
A EN 13374 (DIN, 2013) define como conjunto de componentes destinados a proteger as pessoas de cair para um nível inferior e reter materiais.

Conforme AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) um sistema de proteção de periferia é composto por travessões e montantes projetados para garantir a segurança em borda de telhados, plataforma ou laje.

Observa-se que os diferentes conceitos envolvem a principal questão da utilização das estruturas que é a proteção dos trabalhadores contra quedas.

Ainda, um sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos é composto por elementos de travessão superior, travessão intermediário, rodapé e montantes, constituído por uma proteção sólida, de material rígido e resistente (FUNDACENTRO, 2003). A Figura 1 apresenta um sistema típico de guarda-corpos e os componentes do sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos.

Figura 1: Sistema típico de guarda-corpos



Fonte: Elaborado pela autora.

2.1.1 Montante

O montante consiste em um elemento vertical com objetivo de realizar a ligação entre a laje e a estrutura do guarda-corpo, a partir de pontos de ancoragem e fornece suporte aos travessões e ao rodapé (FUNDACENTRO, 2003).

2.1.2 Travessão

O travessão equivale ao elemento horizontal do sistema de guarda-corpos com finalidade de impossibilitar a queda de pessoas. Caso uma queda venha a ocorrer, esse é o elemento a impedir a pessoa a cair. Chama-se de travessão superior se instalado na extremidade superior do sistema; e de travessão intermediário, quando instalado entre o travessão superior e o rodapé (FUNDACENTRO, 2003).

2.1.3 Rodapé

O rodapé é um elemento instalado, horizontalmente, na estrutura sobre o piso de trabalho, a finalidade desse elemento é evitar, principalmente, a queda de materiais (FUNDACENTRO, 2003).

2.1.4 Ancoragem

A ancoragem é o elemento que realiza a fixação do sistema de guarda-corpos com a superfície de trabalho, podendo ser por meio de ancoragens, também denominados: chumbadores e parafusos para fixação no concreto.

2.2 Estudo antropométrico e cinemático de impacto

O estudo antropométrico e cinemático apresentado refere-se ao trabalho de Fattal e Cattaneo em 1976 que desenvolveram uma investigação dos sistemas de guarda-corpos para a *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA). Na ocasião, os autores realizaram uma pesquisa analítica e experimental de requisitos estruturais e de segurança para as estruturas, apresentando um modelo de projeto para os sistemas. Esse trabalho foi avaliado como essencial para argumentos que serão apresentados no decorrer desta investigação.

O estudo surgiu de um acordo da OSHA e do *National Bureau of Standards* (NBS), atualmente conhecido como *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Nesse acordo, ficou determinado que o estudo seria realizado para estruturas utilizadas de forma temporária e permanente para a segurança do trabalho, considerando apenas fatores associados ao uso dessas estruturas por adultos do sexo masculino na condução de suas tarefas, sem considerar questões administrativas de obrigatoriedade, já determinadas pelas normas da OSHA (FATTAL; CATTANEO, 1976).

O estudo de Fattal e Cattaneo (1976) passou por seis etapas, sendo quatro delas na fase exploratória e duas correspondendo à análise experimental de preparação das orientações e recomendações para as estruturas, considerando projetos de guarda-corpos, acidentes de trabalho, as condições antropométricas e cinemáticas de um impacto.

Avalia-se que o foco do estudo foi para utilização tanto temporária como permanente. Sabe-se que estruturas permanentes demandam critérios mais rigorosos do que as estruturas temporárias, como no caso de guarda-corpos. Ainda, considera-se que o estudo antropométrico utilizado foi para pessoas com nacionalidade dos Estados Unidos da América, as questões antropométricas variam conforme a nacionalidade. Nesse sentido, os diferentes países, podem adotar critérios diferenciados, diante da antropometria da localidade.

Para a determinação de requisitos geométricos, foram realizados ensaios para verificar a altura mínima para as barreiras, considerando um indivíduo com peso e altura aproximados de um percentual de 95% dos homens, de 1,933 m e 90,7 kg.

A conclusão foi de que, a uma altura de 76,2 cm, o indivíduo já não tinha mais alcance ao outro lado da barreira. De acordo com as observações realizadas durante os testes, a barreira deveria ter uma altura mínima abaixo da articulação do quadril, de 99 cm para o percentual de 95% dos homens e de 102,9 cm do indivíduo selecionado (FATTAL; CATTANEO, 1976).

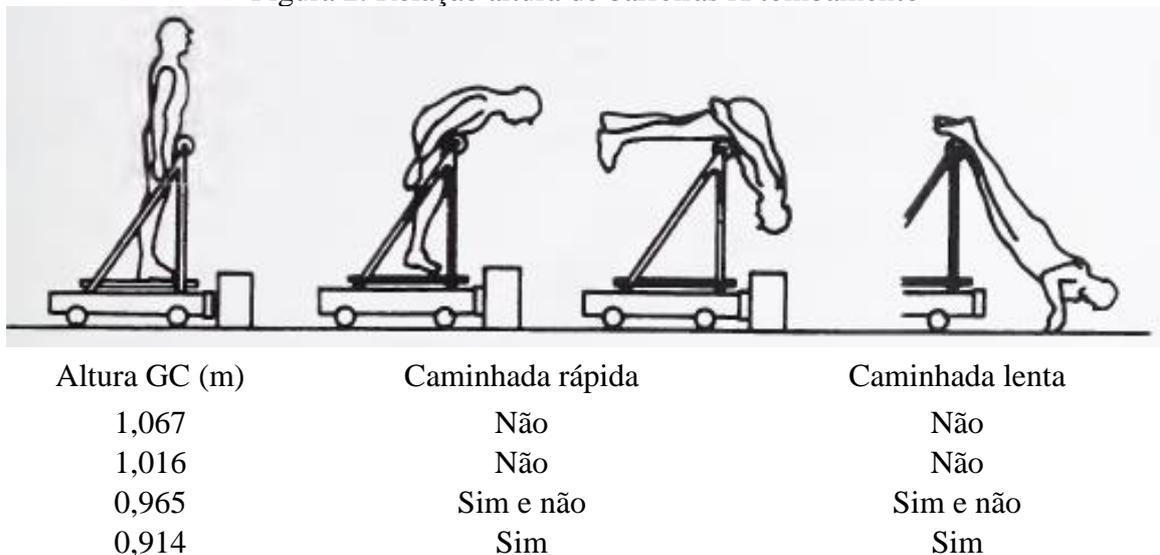
Outro ensaio foi realizado para o caso em que o indivíduo caía de costas sobre a barreira. Os resultados demonstram que a uma altura de 76,2 cm é, geralmente, consistente (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Também foi realizado um ensaio para determinar uma altura de proteção adequada na qual largura não é um fator determinante. A situação crítica de acidentes, nesse caso, foi a de uma pessoa atingir diretamente o guarda-corpo. Os testes variaram a velocidade do carro e a altura do travessão superior. Foram usadas as velocidades normais de caminhada de seres humanos de 4 km/h (1,11 m/s), e a máxima velocidade atingível dentro das restrições de espaço do laboratório 5,3 km (1,47 m/s). A intenção era desenvolver a velocidade de caminhada rápida de 7,2 km/h (2 m/s) (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Os resultados dos testes determinaram que com exceção de dois ensaios, os dados de teste para as duas velocidades são idênticos. Tal resultado indica que a tendência de rotação do corpo não é sensível a variações nas velocidades de caminhada (FATTAL; CATTANEO, 1976).

A Figura 2 demonstra a sequência de eventos e a relação com a altura do travessão superior. Nenhum tombamento ocorreu a uma altura de 101,6 cm e a presença de uma relação crítica entre a tendência do corpo a derrubar e a proximidade do trilho com as articulações do quadril do indivíduo pode ser sugerida (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Figura 2: Relação altura de barreiras X tombamento



Fonte: Adaptado de Fattal e Cattaneo (1976).

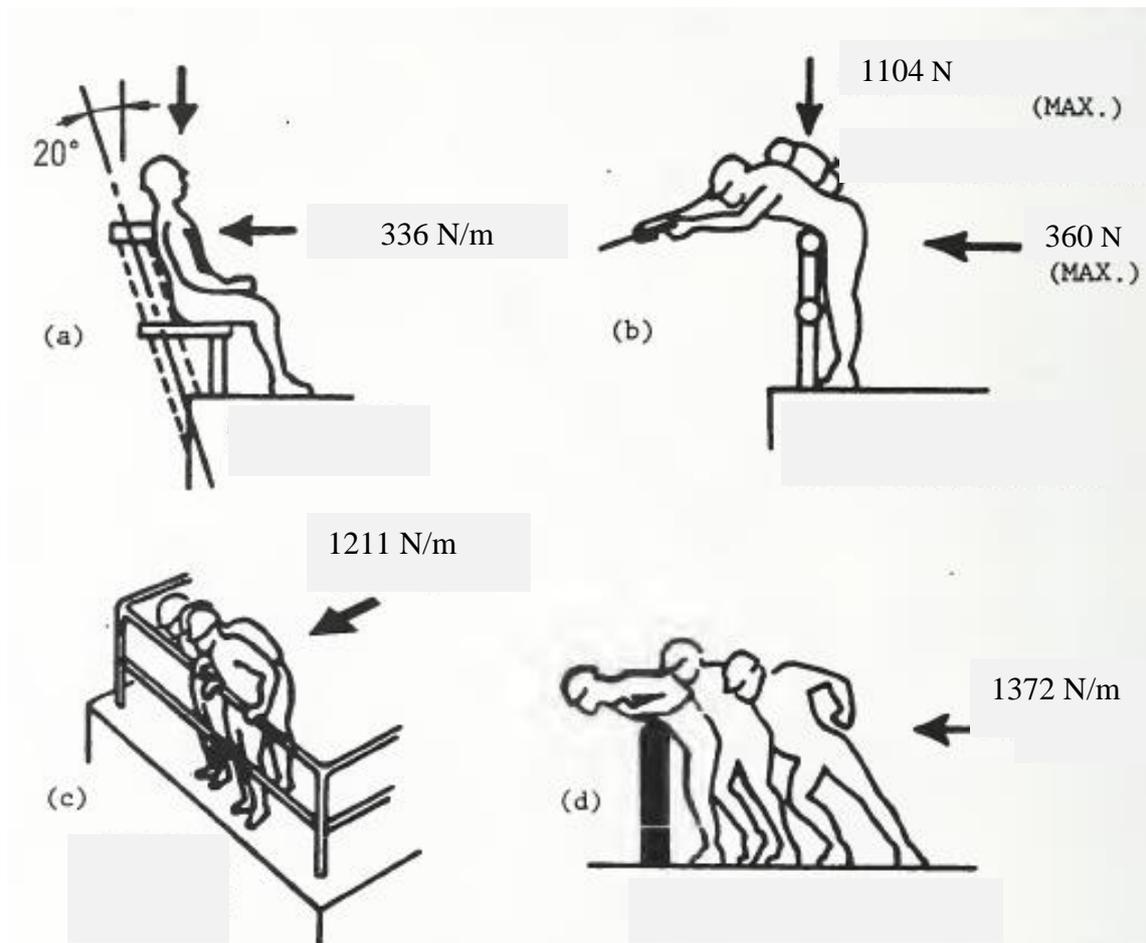
Observa-se no estudo que a altura das estruturas de guarda-corpos variou de acordo com os ensaios, mas para o caso de uma queda, é desejável que a altura do quadril com a altura do travessão superior deve ser avaliada, considerando a estatura dos trabalhadores dos Estados Unidos da América, qual seja, aproximadamente, um valor de 101,6 cm.

Para a determinação de cargas estáticas, foram realizados 5 ensaios experimentais, variando a postura do manequim, porém, os principais testes ocorreram na posição de costas. Os quatro tipos de posturas estáticas para as quais foram feitas as medições de carga estão ilustrados na Figura 3, juntamente com uma amostragem das forças de pico induzidas em cada caso (FATTAL; CATTANEO, 1976).

A Figura 3a demonstra o caso de um sistema ser utilizado para conter pessoas sentadas na periferia. Nesse caso, as estruturas são inclinadas em torno de 15° a 20° e verificou-se que a carga de 336 N/m pode ser considerada uma carga de trabalho. Para esse caso, não foi realizado um estudo dinâmico de aplicação de carga simultânea (FATTAL; CATTANEO, 1976).

A Figura 3b demonstra uma situação de trabalhadores trabalhando na pulverização em cima de caminhões com barreiras por exemplo. A carga vertical de 1104 N representa o peso da pessoa com o carregamento do material de pulverização nas costas, essa é a carga vertical máxima nesse caso. A força horizontal máxima exercida será de 360 N (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Figura 3: Diversas cargas de postura estática em guarda-corpos



Fonte: Adaptado de Fattal e Cattaneo (1976).

A Figura 3c representa a situação de carga estática aplicada por duas fileiras de pessoas inclinadas sobre o travessão superior observando um evento que ocorre abaixo. Nesse caso, observou-se um carregamento distribuído de 1211 N/m, podendo chegar a um carregamento crítico de 1313 N/m, assumindo esse como vertical e horizontal para um dimensionamento mais conservador (FATTAL; CATTANEO, 1976).

A última fase do ensaio de cargas estáticas de posturas diversas simula três filas de pessoas empurrando-se contra a estrutura de guarda-corpos, simulando uma multidão, caso em que a força distribuída máxima é de 1372 N/m, Figura 3d (FATTAL; CATTANEO, 1976).

A carga de surto foi multiplicada por 1,08 pela proporção do peso médio dos três corpos humanos utilizados no ensaio chegando a uma carga de 1459 N/m, essa carga é inclinada em relação à horizontal, de forma conservadora, a carga de surto pode ser aplicada

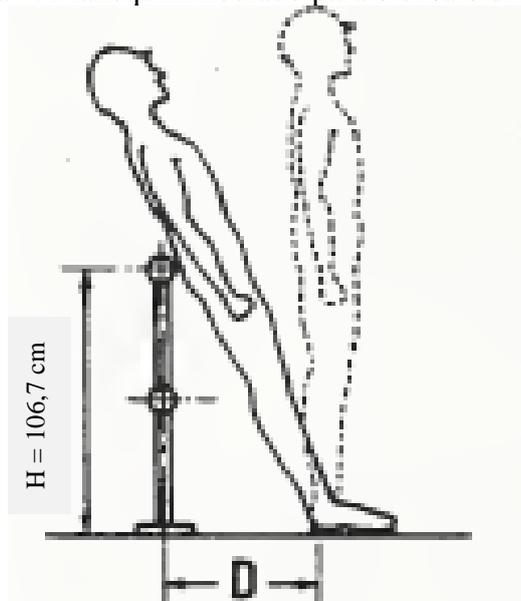
em qualquer direção entre horizontal e vertical para produzir a condição de carga mais crítica para o projeto (FATTAL; CATTANEO, 1976).

O estudo supracitado foi realizado considerando também uma situação permanente de trabalho, com mais de uma pessoa, gerando carregamento nas estruturas. Para o caso de guarda-corpos provisórios, utilizados em periferias da construção civil tem-se a finalidade de conter uma queda acidental, caso em que uma pessoa escorregue ou perca o equilíbrio próximo à periferia.

Ainda, a orientação para trabalhadores é de que eles não utilizem estruturas para apoio em momentos de descanso. Nesse caso, a queda seria de forma individual, considerando-se essa apresentaria uma solicitação inferior às situações analisadas na Figura 3, principalmente as situações c e d, sendo inferiores à situação de carga de surto analisada de 1459 N/m.

Fattal e Cattaneo (1976) realizaram também ensaios de cargas dinâmicas para compreender as forças produzidas pelo impacto do corpo humano, caindo nas estruturas, conforme Figura 4. Na primeira fase de ensaios, o manequim foi liberado para trás em uma posição ereta com o travessão superior instrumentado e a uma altura de 106,7 cm, altura considerada segura nos ensaios realizados. Na segunda fase, repetiram o mesmo ensaio, porém, sem a instrumentação do travessão superior.

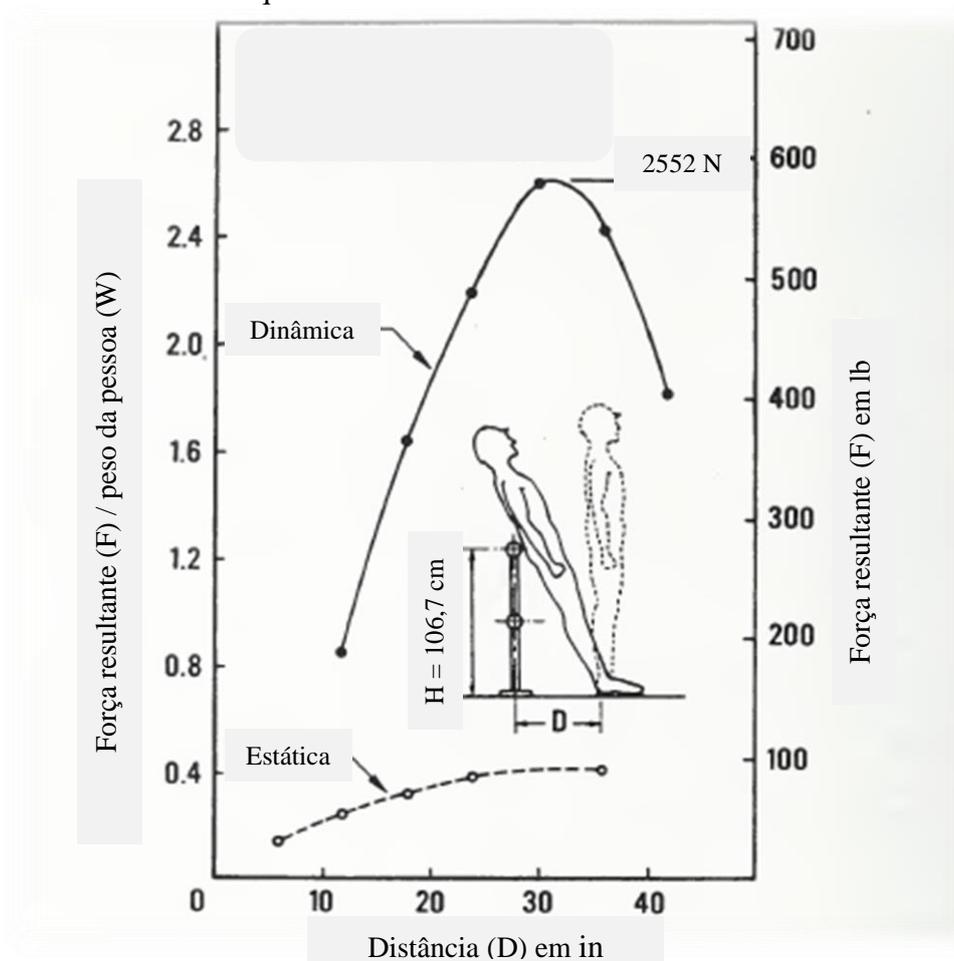
Figura 4: Manequim liberado para o ensaio dinâmico



Fonte: Adaptado de Fattal e Cattaneo (1976).

Os resultados dos ensaios dinâmicos no travessão superior são mostrados graficamente na Figura 5. Cada valor representado na curva aponta o valor médio de cinco testes, com variação entre os testes de 3%.

Figura 5: Força dinâmica e estática no travessão superior exercida pelo percentual de 95 do manequim X distância do calcanhar da estrutura



Medidas antropológicas manequim
 Altura = 189,48 cm; Peso = 974,15 N; Centroide da altura: 106,2 cm

Transformações de unidades:

Converter de:
 lb
 in

Para:
 N
 cm

Multiplicar por:
 4,4482
 2,54

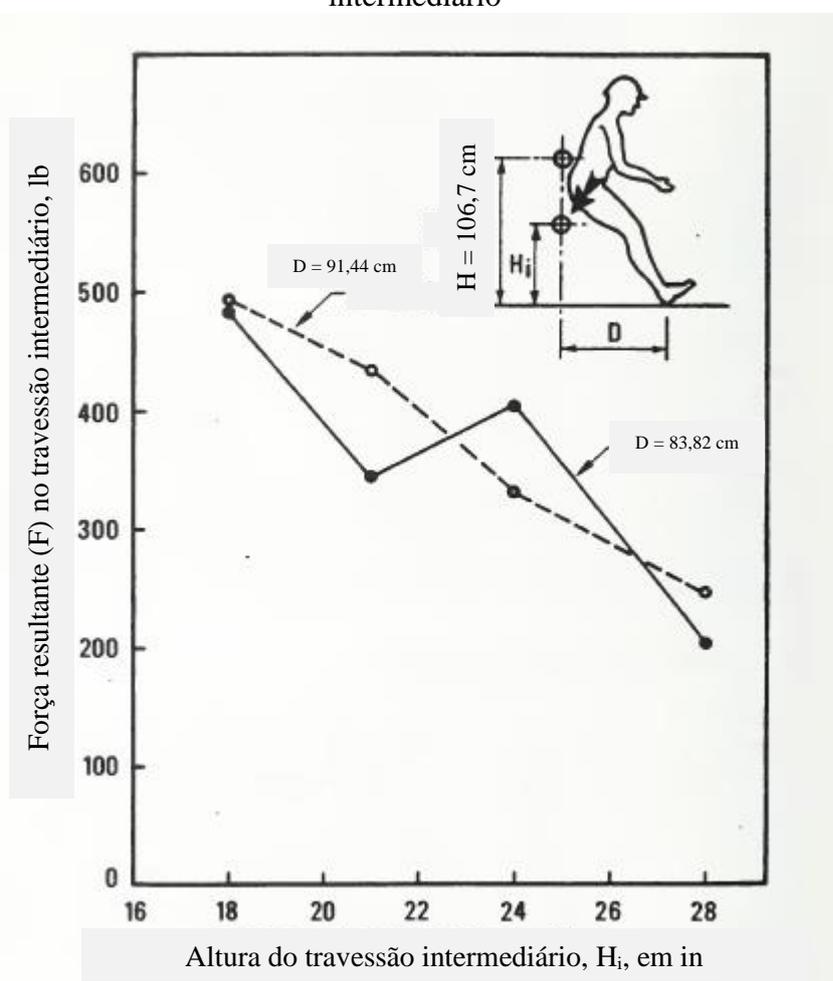
Fonte: Adaptado de Fattal e Cattaneo (1976).

A média máxima (F) foi 2552 N uma distância D do calcanhar de 76,2 cm enquanto que a resposta máxima ocorrida em todos os ensaios foi de 2575 N a uma distância D de 83,8 cm (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Além disso, os autores analisaram que o centroide do manequim alcançará uma velocidade de, aproximadamente, 7,2 km (2 m/s) antes do contato com o travessão. Consideram que essa configuração de ensaio seria a responsável pelos tipos das forças resultantes da situação de acidente em guarda-corpos (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Para os travessões intermediários, a **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** oferece um resumo dos resultados. A força máxima, nesse caso, foi em torno de 2225 N para as duas distâncias D utilizadas de 83,82 cm e 91,44 cm e ocorre quando a altura do travessão intermediário é cerca de 45,7 cm acima da superfície do piso (FATTAL; CATTANEO, 1976).

Figura 6: Força dinâmica no travessão intermediário exercida X altura do travessão intermediário



Transformações de unidades:

Converter de:

lb
in

Para:

N
cm

Multiplicar por:

4,4482
2,54

Fonte: Adaptado de Fattal e Cattaneo (1976).

2.3 Revisão de requisitos geométricos e de resistência

Neste item, apresentam-se as principais recomendações geométricas e de resistência que definem as normas brasileiras, NR 18, RTP 01 e NR 35, norma da união europeia EN 13374, norma da Australia e Nova Zelândia AS/NZS 4994, nos Estados Unidos da América com a norma OSHA 1926.502 e no Canadá com o código do Quebec S-2.1 r.4, quanto às estruturas de guarda-corpos.

Ao final desse item são apresentados quadros comparativos com os dados levantados a fim de sintetizar as definições de cada norma e possibilitar uma comparação dos itens em que ocorrem as maiores divergências.

2.3.1 Requisitos geométricos

As normas brasileiras que definem o uso e os sistemas do tipo guarda-corpo são as normas, NR 18, versão 2018 e versão 2020, NR 35 e a recomendação técnica de procedimentos RTP 01.

O item 18.13.5 da NR 18, versão 2018, dispõe sobre a utilização de guarda-corpos provisórios em obras da construção civil e determina:

A proteção contra quedas, quando constituída de anteparos rígidos, em sistema de guarda-corpo e rodapé, deve atender aos seguintes requisitos:

- a) ser construída com altura de 1,20m (um metro e vinte centímetros) para o travessão superior e 0,70m (setenta centímetros) para o travessão intermediário;
- b) ter rodapé com altura de 0,20m (vinte centímetros);
- c) ter vãos entre travessas preenchidos com tela ou outro dispositivo que garanta o fechamento seguro da abertura (BRASIL, 2018b, p. 14).

Considerando que a NR 18, versão 2018, é restrita às definições geométricas das estruturas foi implantada a RTP 01, elaborada pela Fundacentro, com a intenção de preencher as lacunas deixadas na NR 18, instrumento pelo qual se baseia o MTE para as auditorias realizadas na construção civil e aplicabilidade das medidas de segurança do trabalho (BRASIL, 2018b; FUNDACENTRO, 2003).

A RTP 01 tem como objetivo fornecer embasamento técnico e procedimentos necessários para garantir a proteção contra queda de altura, na indústria e na construção civil, e tem como princípio básico de segurança que: “Onde houver risco de queda é necessária a instalação da proteção coletiva correspondente” (FUNDACENTRO, 2003, p. 7).

Além das disposições apresentadas na NR 18, a RTP 01 apresenta requisitos geométricos para as estruturas, orientando um distanciamento máximo entre montantes para guarda-corpos de madeira de 1,50 metros (FUNDACENTRO, 2003).

Ainda, com a atualização da NR 18, versão 2020, com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, os requisitos geométricos permanecem os mesmos, com exceção do rodapé que teve sua altura mínima reduzida para 0,15m (quinze centímetros) (BRASIL, 2020).

A altura do travessão superior definida pela versão atual e versão que entrará em vigor da NR 18, de 120 cm, está a favor da segurança, conforme a altura definida por Fattal e Cattaneo (1976) como segura, de 101,6 cm para um indivíduo analisado de 1,933 m de altura e 90,7 kg de massa.

Baruffi (2017) realizou um estudo para avaliar a altura e o peso dos trabalhadores da construção no município de Passo Fundo – RS, no qual os resultados indicaram que os trabalhadores apresentaram massa média de 79,93 kg e altura média de 1,71 m, valores inferiores ao indivíduo utilizado nos ensaios de Fattal e Cattaneo (1976). Os critérios geométricos estão diretamente ligados à antropometria local. Nesse sentido, a NR 18, mostra-se uma norma com critérios mais exigentes de segurança.

Quanto às medidas que devem ser tomadas, a NR 35 não determina, especificamente, os procedimentos, mas estabelece a ordem do planejamento do trabalho, sendo:

- a) medidas para evitar o trabalho em altura, sempre que existir meio alternativo de execução;
- b) medidas que eliminem o risco de queda dos trabalhadores, na impossibilidade de execução do trabalho de outra forma;
- c) medidas que minimizem as consequências da queda, quando o risco de queda não puder ser eliminado (BRASIL, 2019b, p. 4).

Orienta, ainda que o sistema de proteção contra quedas deve ser adequado ao serviço a ser realizado, considerando as orientações de acordo com a Análise de Risco, selecionado por profissional qualificado, resistência de acordo com a carga máxima a ser aplicável no caso de uma queda, atendendo a normas nacionais, e, no caso de inexistência, atendendo a normas internacionais aplicáveis (BRASIL, 2019b).

A seleção do sistema adotado deve ser realizada considerando a utilização, inicialmente, de um sistema coletivo de proteção contra quedas e nas situações da impossibilidade da utilização desse ou em que o sistema coletivo de proteção não forneça completa proteção contra quedas de altura, procede-se a adoção de um sistema de proteção individual (BRASIL, 2019b).

Percebe-se que por meio das orientações da NR 35, o sistema de proteção de periferia do tipo guarda-corpos provisórios é a primeira opção de proteção para trabalhos realizados em altura.

Nesse contexto, a NR 18 e NR 35 apresentam as medidas que devem ser implantadas no planejamento, organização e execução de obras, dispondo sobre análise e itens necessários para o atendimento das normas, sem muitas informações sobre avaliação dessas estruturas, deixando a responsabilidade para o profissional legalmente habilitado para tomar decisões a respeito dos sistemas a serem adotados.

Para orientações sobre estruturas de guarda-corpos provisórios para a da União Europeia, tem-se a normativa EN 13374:2013, Sistemas de proteção de borda temporária – Especificações do produto – Métodos de ensaio, determinando os requisitos e métodos de ensaio para sistemas de proteção de borda temporária para uso durante a construção ou manutenção de edifícios e outras estruturas. Essa norma define três classes de guarda-corpos, sendo elas A, B e C, variando a carga a ser aplicada e o uso a que se destinam (DIN, 2013).

A classe A, oferece resistência apenas a cargas estáticas, sendo utilizada para apoiar uma pessoa inclinada ou caminhando ao lado, sobre a proteção, e também, para uma pessoa no coletivo que esteja andando ou caindo em direção à proteção (DIN, 2013).

A proteção de classe B oferece resistência a cargas dinâmicas e estáticas, sendo solicitada para além da classe A, para uma pessoa em meio a coletividade que esteja correndo e venha a cair numa superfície inclinada (DIN, 2013).

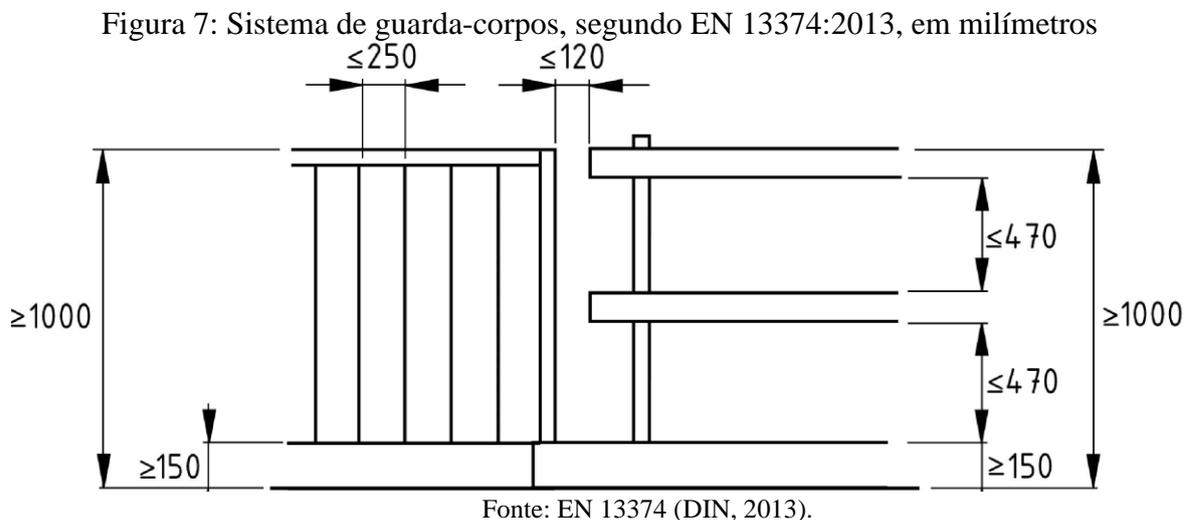
A classe C destina-se a proporcionar resistência às forças dinâmicas elevadas, com base nos requisitos de segurança para evitar a queda de uma pessoa que deslize em telhados inclinados (DIN, 2013).

Quanto às estruturas avaliadas nesse trabalho, classificam-se como classe A, visto que o objetivo é conter a queda em situação de trabalho em periferias, sendo nesse caso exigido a resistência a cargas estáticas.

Quanto à geometria, a EN 13374 (DIN, 2013), define que a altura mínima entre a superfície de trabalho e o travessão superior deve ser de, no mínimo, 100 cm, sendo que os espaçamentos entre os travessões entre si e a superfície de trabalho não devem ser superiores a 47 cm, e eventuais espaços de descontinuidade entre os guarda-corpos não superiores a 12 cm, conforme Figura 7.

A altura do travessão superior definida pela EN 13374, de 100 cm, está próxima da altura definida por Fattal e Cattaneo (1976) como segura, de 101,6 cm. Essa orientação com

uma exigência inferior, varia conforme dados antropométricos locais, mostrando-se como uma norma com uma exigência inferior nesse critério.



As orientações sobre guarda-corpos provisórios na Austrália e Nova Zelândia são determinadas pela AS/NZS 4994. Essa norma contém quatro partes, sendo a primeira delas a AS/NZS 4994.1, Proteção temporária de periferia – Parte 1: Requisitos Gerais, que tem como escopo requisitos padrões para o projeto, a fabricação e os testes de equipamentos, que se destinam a fornecer proteção para o trabalho realizado em periferias de telhados, em edifícios com declividades não superiores a 35° em relação à horizontal e para periferias em gerais (AS/NZS, 2009a).

Quanto aos materiais utilizados, a norma AS/NZS 4.994.1 determina que devem atender às normatizações específicas desses países e, além disso, quando forem utilizados perfis de aço, devem ser resistentes à corrosão, tanto interna, quanto externamente. Quando a espessura da parede for inferior a 2,5 mm e a seção for fabricada a partir de soldagem, o componente deverá ser galvanizado a quente para garantir que ambas as superfícies internas e externas sejam revestidas de acordo com AS/NZS 4680 (2009a).

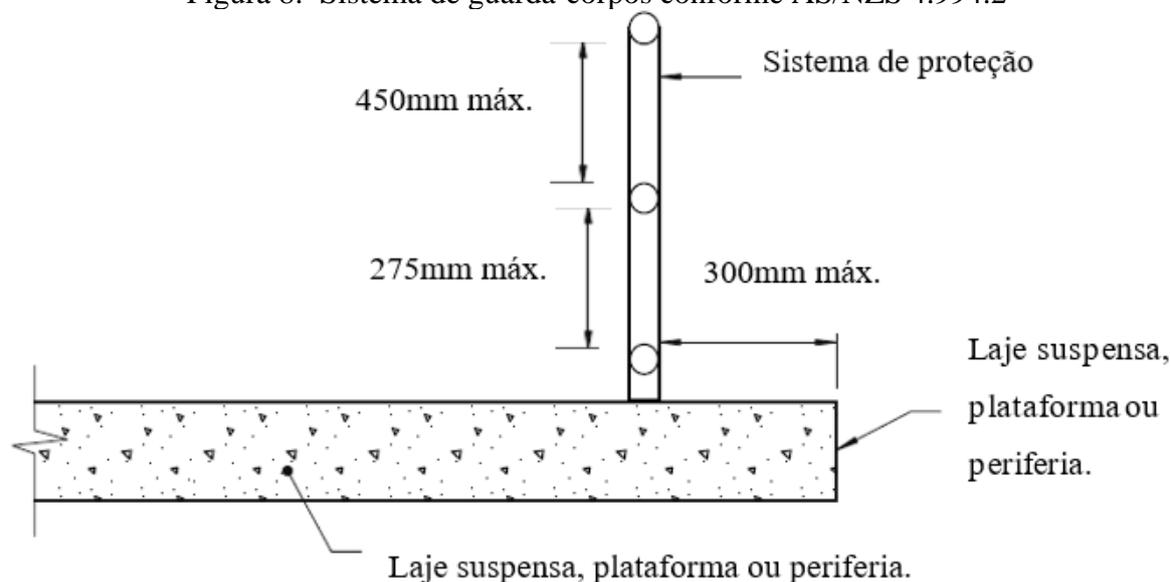
Quanto à geometria dos rodapés, a AS/NZS 4.994.1 define que devem ter altura superior a 150 mm, com resistência suficiente e rigidez para evitar que uma pessoa passe pelo rodapé, que deve ser conectado de forma segura com os montantes. A distância máxima entre o rodapé e a laje é de 10 mm (AS/NZS, 2009a).

A segunda parte da norma AS/NZS 4.994.2 (2009b), Proteção temporária de periferia – Parte 2: Proteção de periferia em telhado – instalação e desinstalação, recomenda que para a instalação de um sistema de proteção de periferia, deve-se ter o cuidado especial com as

peessoas que vão realizar essa montagem, de forma que seja assegurado o processo de instalação (AS/NZS, 2009b).

Sobre a altura mínima, a AS/NZS 4.994.2 recomenda que a estrutura de guarda-corpo seja superior a 900 mm, a contar do piso da laje, instalada a uma distância de 300 mm da periferia, conforme Figura 8, considera, ainda, que outros tipos de anexos à estrutura do edifício podem ser usados, diferente do apresentado na Figura 8 (AS/NZS, 2009b). Esse critério mostra-se como o menos exigente de todas as normativas avaliadas.

Figura 8: Sistema de guarda-corpos conforme AS/NZS 4.994.2



Fonte: Adaptado de AS/NZS, 2009b.

A distância utilizada entre os travessões não deve ser superior a 450 mm e a distância entre rodapé e travessão intermediário não deve ultrapassar a 275 mm (AS/NZS, 2009b).

Nos Estados Unidos da América, tem-se disponível para consulta as orientações da norma da OSHA 1926.502 que fornece critérios e práticas dos sistemas de proteção contra quedas. O acesso às normatizações da OSHA é livre e para as definições apresentadas neste capítulo para trabalho em altura podem ser encontradas no link: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.502>.

Para a OSHA, é exigido que os empregadores forneçam e instalem, antes de se iniciarem os trabalhos todos os sistemas de proteção contra quedas exigidos pela OSHA 1926.502 subparte M, Proteção contra quedas (OSHA, 2016).

As determinações quanto à geometria do sistema de guarda-corpos é de que o travessão tenha uma altura de 1,1 m, medido do nível do trabalho com uma tolerância de

mais ou menos 8 cm. Em situações que se justificarem, a altura poderá ultrapassar 1,15 m desde que o sistema cumpra todos os outros critérios (OSHA, 2016).

Comparando a altura exigida pela OSHA 1926.502 com o estudo realizado por Fattal e Cattaneo (1976), observa-se notoriamente o estudo realizado em que foi definida como segura a altura de 101,6 cm, e as indicações da OSHA de 1,1 m com a variação de 8 cm, a altura do travessão superior poderá variar entre 102 cm a 118 cm, ficando acima do valor definido de 101,6 cm.

Para elementos intermediários, a OSHA 19.26.502 (2016) considera a obrigatoriedade de sua utilização entre o travessão superior e o nível de trabalho, podendo ser, telas, malhas, membros verticais intermediários ou estruturais, com vãos menores que 53 cm. Para travessões intermediários considera o uso na altura média entre o travessão superior e o nível do piso. Para o caso de elementos intermediários verticais e outros membros estruturais utilizados entre os montantes, esses devem ser instalados para que não haja aberturas no sistema maiores que 48 cm (OSHA, 2016).

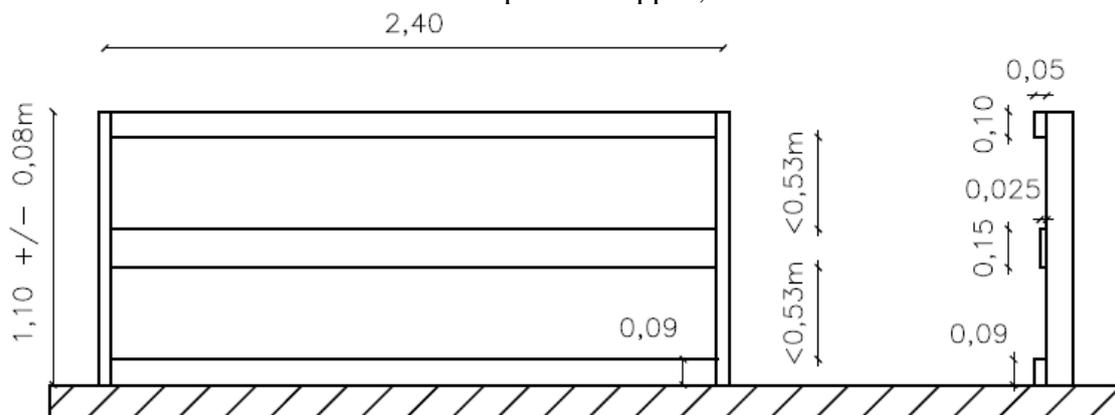
A OSHA apresenta, ainda, diretrizes não obrigatórias para o cumprimento de 1926.502 (b) para os sistemas de guarda-corpos, em que orienta a utilização dessas informações como ponto de partida, porém, as diretrizes não fornecem todas as informações necessárias para construir um sistema completo, ficando a cargo do empregador a responsabilidade pelo projeto e montagem desses componentes de tal forma que o sistema atenda aos requisitos de 1926.502 (OSHA 1926 subparte M App B – Link de acesso: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartMAppB>).

Para a OSHA 1926 subparte M App B, caso o material adotado seja a madeira, deve ter no mínimo, 1500 lb.ft/in², grau de tensão das fibras da madeira correspondente à unidade no sistema internacional de unidade de N.m/m². Observa-se a importância de a madeira apresentar requisitos de resistência mecânica adequados para a utilização em estruturas.

A seção do perfil utilizado para o montante deverá ser, no mínimo, 5x10 cm, os travessões superiores deverão ser, no mínimo, 5x10 cm e o travessão intermediário deverá ser de 2,5x15cm com os montantes espaçados a, no máximo, 240 cm, conforme Figura 9.

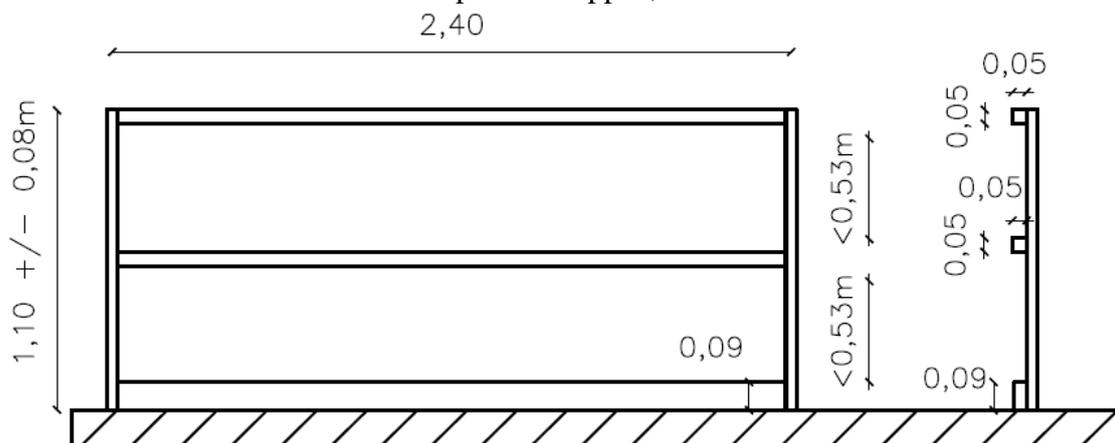
Caso o material seja perfis de aço estrutural, a seção recomendada é um perfil tubular de 50x50x10mm, conforme Figura 10 (OSHA, 2016).

Figura 9: Sistema de Guarda-corpos de madeira, segundo diretrizes não obrigatórias a OSHA 1926 subparte M App B, em metros



Fonte: Baruffi (2017).

Figura 10: Sistema de Guarda-corpos de aço, segundo diretrizes não obrigatórias, a OSHA 1926 subparte M App B, em metros



Fonte: Baruffi (2017).

Para as orientações no Canadá, foi consultado o código de *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4). Assim, como as normas da OSHA, tal normativa é de livre acesso pelo link: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%204>.

O código de *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) define que devem ser instaladas medidas de proteção do tipo guarda-corpos e medidas de proteção em lados abertos de piso, teto, plataforma, rampa, andaimes, escadas, em volta de uma escavação ou qualquer área em que forem realizados trabalhos com riscos de queda, como descrito:

- a) em um líquido ou substância perigosa.
- b) uma distância vertical de 1,2 m ou mais, onde se use um carrinho de mão ou outro veículo.

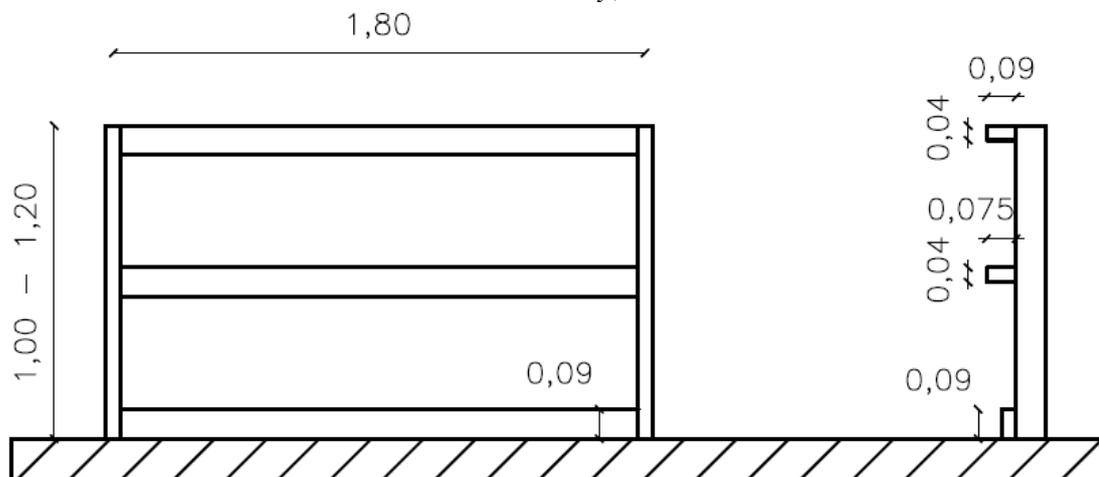
c) uma altura superior a 3 m, em caixas ou outras (QUÉBEC, 2021).

Quanto à geometria, o código *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) recomenda que a altura dos guarda-corpos, deve ser compreendida, entre 1,0 m e 1,20 m acima do nível de trabalho (QUÉBEC, 2021).

Observa-se, assim como a OSHA, uma similaridade das indicações de altura do travessão em torno de 101,6 cm, definida no estudo de Fattal e Cattaneo (1976), podendo chegar até a 120 cm acima do nível de trabalho.

Caso o material utilizado seja a madeira, o código *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) define que a seção do travessão superior e montante devem ser, no mínimo, 4 x 9 cm com os montantes espaçados a uma distância máxima de 180 cm, o travessão intermediário, com dimensão de, no mínimo, 4 x 7,5 cm e o rodapé com, no mínimo, 9 cm de altura, ambos fixados internamente ao montante, com segurança, conforme Figura 11 (QUÉBEC, 2021).

Figura 11: Sistema de guarda-corpos de madeira, segundo *Québec Safety Code for the Construction Industry*, em metros



Fonte: Baruffi (2017).

Caso o material seja de aço, as recomendações do código *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) são de que os guarda-corpos devem ser concebidos, construídos, instalados e mantidos de forma a oferecer uma resistência e uma segurança, igual ou superior, à necessária para os sistemas de madeira (QUÉBEC, 2021).

Com as diferentes normas analisadas e também o estudo de Fattal e Cattaneo em 1976, observa-se ser fundamental que as estruturas tenham uma altura superior a 100 cm,

porém, devem ser considerados aspectos de antropometria local para avaliar de forma adequada as exigências para as estruturas.

Critérios que limitem a passagem de pessoas entre o elemento de rodapé e o travessão superior também são importantes, de modo que possam impedir a passagem de uma pessoa. O travessão intermediário apresenta-se como um requisito para impedir que pessoas passem pelos vãos entre as estruturas em caso de uma queda; e o elemento rodapé torna-se substancial para conter queda de materiais na superfície de trabalho para níveis inferiores. Os critérios elencados foram avaliados em todas as normas citadas.

Com esses critérios, constatou-se que as normas analisadas apresentam divergências com a norma da Austrália e Nova Zelândia, AS/NZS 9449 (AS/NZS, 2009), a qual apresenta menos exigência em relação à altura mínima de 90 cm.

Os critérios de travessões intermediários e rodapés variam conforme as normas analisadas. Observa-se que pelas normas brasileiras, NR 18, versão 2018 e versão 2020, os vãos ficariam inferiores a 50 cm, devido à dimensão do elemento utilizado nos elementos de travessão superior e intermediário. Nas demais normas, o critério da OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) é de vãos inferiores a 53 cm, as outras normas apresentam critérios mais restritivos e o código do Canadá não traz orientação sobre, mas indica a necessidade de um travessão intermediário.

2.3.2 Comparação dos requisitos geométricos entre as normatizações

No Quadro 1, é possível analisar as diferentes normas regulamentadoras nacionais Brasileiras, NR 18 (BRASIL, 2018b), NR 18 (BRASIL, 2020) e NR 35 (BRASIL, 2019b) e o que preconiza cada uma delas, quanto ao trabalho em altura. Além dessas, tem-se a Recomendação Técnica de Procedimentos, RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003) que complementa a NR 18, versão 2018.

As normas internacionais analisadas, neste estudo, foram as normas dos Estados Unidos da América, OSHA 1926.502 (OSHA, 2016), da União Europeia, EN13374 (DIN, 2013), do Québec S-2.1, r.4 (QUÉBEC, 2020) e da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994.1 (2009a) e AS/NZS 4994.2 (2009b).

Quadro 1: Revisão de requisitos geométricos em normas

Requisitos		Normas Brasileiras				Normas Internacionais			
		NR 18 (BRASIL, 2018b)	RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003)	NR 18 (BRASIL, 2020)	NR 35 (BRASIL, 2019b)	EN 13374 (DIN, 2013)	AS/NZS 4994 (AS/NZS 2009a, 2009b)	OSHA 1926.502 (OSHA, 2016)	S-2.1, r.4 (QUÉBEC, 2021)
Altura Mínima	Travessão superior (m)	1,20	N.D.	1,20	N.D.	1.00	> 0,90	1,1 +/- 0,08	1 - 1,20
	Travessão intermediário (m)	0,70	N.D.	0,70	N.D.	vãos < 0,47	< 0,45 ^{c)} < 0,275 ^{d)}	vãos < 0,53	N.D.
	Rodapé (m)	0,20	N.D.	0,15	N.D.	0.15	0.15	0.09	0.09
Distância entre montantes (m)	Madeira	N.D.	1.50	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	1.80
	Aço	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	N.D.
Seção indicada	Madeira	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	50x100 ^{a)} 25x150 ^{b)}	40x90 ^{a)} 40x75 ^{b)}
	Aço	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	50x50x10	3,00 ou 1,2 ^{e)}
Trabalho em altura		N.D.	N.D.	N.D.	2.00	N.D.	N.D.	1.8	N.D.

N.D. Não disponível. ^{a)} Para montantes e travessão superior; ^{b)} Para travessão intermediário; ^{c)} Entre travessão superior e intermediário; ^{d)} Entre travessão intermediário e rodapé; ^{e)} Dependendo das condições de trabalho.

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.3 Requisitos de resistência

Para as normas brasileiras, considerando que a NR 18 (BRASIL, 2018b), versão vigente era restrita a questões de geometria e implantação das estruturas, a RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003) orienta quanto à resistência.

A RTP 01 determina que os travessões deveriam ser de material sem aspereza e a resistência mínima que a peça deverá apresentar é de “esforços concentrados de 150 kgf/metro linear (centro e cinquenta quilogramas-força por metro linear), no centro do vão”. Quanto ao rodapé, deveria apresentar as mesmas características e resistência dos travessões.

Essa orientação da RTP 01 gera dúvidas na forma como a redação é indicada. Essa carga é aplicada em todo o sistema ou deverão ser aplicados os valores de 150 kgf/metro para o travessão superior, para o travessão intermediário e, também, para o rodapé? Nesse caso, deverá ser aplicado 450 kgf/metro no sistema?

Também, sabe-se que a unidade padrão para carga é N, kg trata-se de uma unidade de quantidade de massa, nesse caso, por que a norma não dispõe da unidade padrão de peso para o Sistema Internacional de Unidades?

Esse texto gera algumas dúvidas e varia conforme a interpretação do leitor, para o estudo em questão, adota-se a interpretação de que deve ser calculada a carga de acordo com o vão do travessão e aplicá-la de forma concentrada no centro do vão.

Adota-se também a interpretação que a estrutura deve resistir a esse esforço e não que a carga deverá ser aplicada simultaneamente nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, visto que essa carga já é considerada uma carga elevada diante dos padrões adotados internacionalmente.

A partir dessas considerações, a carga de ensaio é definida a partir da Equação 1:

$$P = q \times L \quad (1)$$

P = carga de ensaio (N);

q = carga distribuída (N/m), segundo a RTP 01 = $1500 \frac{N}{m}$;

L = vão entre montantes em m.

No caso dos estudos de Fatal e Cattaneo (1976), analisando carregamentos, provisório e permanente, para o caso de duas fileiras de pessoas inclinadas e olhando para

baixo, a carga gerada e distribuída é de 1211 N/m, podendo chegar a um carregamento crítico de 1313 N/m.

Ainda, Fattal e Cattaneo (1976) analisaram a situação que simula três filas de pessoas empurrando-se contra a estrutura de guarda-corpos, simulando uma multidão, caso em que a força distribuída máxima é de 1372 N/m, que multiplicada por uma carga de surto, considerando os critérios de ensaio, chegaria a um valor de 1459 N/m.

Com essa configuração, a carga definida pela NR 18 ultrapassaria o critério de três filas de pessoas empurrando-se contra a estrutura, se a indicação fosse dos 1500 N/m (150 kgf/m) para o sistema. Caso fosse aplicada por elemento, superaria em mais de três vezes o critério analisado por Fattal e Cattaneo (1976).

Ainda, conforme um critério de avaliação de impacto, Fattal e Cattaneo (1976) consideraram que é gerada uma força máxima média, de um impacto de uma pessoa de costas no travessão superior, no valor de 2552 N. E para o caso de um impacto no travessão intermediário de 2225 N.

Considera-se que, caso ocorra uma queda, tanto o travessão superior, como o travessão intermediário irão contribuir para conter o objeto impacto, com isso, essas forças seriam distribuídas entre os dois elementos.

Apresentando tais discussões, avalia-se que a redação atual da norma não é clara quanto a como essas cargas devem atuar no sistema e também excedem o critério de carregamento.

Esse trabalho foi realizado entre os anos de 2017 e 2021. Nesse período, foi publicada a atualização da NR 18 em 2020 com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022. Com isso, foi considerado no trabalho a versão vigente na publicação deste, versão 2018 juntamente com a RTP 01 e a versão que entrará em vigor em 2022. Visto as dúvidas apresentadas na versão atual da NR 18, a mesma é alterada para a nova versão, apresentando a redação:

- a) travessão superior a 1,2 m (um metro e vinte centímetros) de altura e resistência à carga horizontal de 90 kgf/m (noventa quilogramas-força por metro), sendo que a deflexão máxima não deve ser superior a 0,076 m (setenta e seis milímetros);
- b) travessão intermediário a 0,7 m (setenta centímetros) de altura e resistência à carga horizontal de 66 kgf/m (sessenta e seis quilogramas-força por metro);
- c) rodapé com altura mínima de 0,15 m (quinze centímetros) rente à superfície e resistência à carga horizontal de 22 kgf/m (vinte e dois quilogramas-força por metro);
- d) ter vãos entre travessas preenchidos com tela ou outro dispositivo que garanta o fechamento seguro da abertura (BRASIL, 2020, p. 19).

Percebe-se uma alteração no texto, definindo as cargas para os elementos constituintes do sistema, que antes era apresentado de forma genérica, e, também, descolamentos limites para o travessão superior.

Com essa configuração, o sistema deverá apresentar 178 kgf/m ou 1780 N/ m de resistência, observa-se que o critério novamente se apresenta superior à carga estática analisada por Fattal e Cataneo (1976) de 1459 N/m para a situação de três pessoas enfileiradas e apoiadas nas estruturas. Porém, mostra-se uma norma mais clara nos critérios de resistência e, também, do ponto da aplicação e deslocamentos máximos permitidos.

Ainda, ocorreu a publicação de alterações da NR 18 (CPN, 2015), para votação nacional, em que a carga exigida para as estruturas de guarda-corpos passaria a ser aplicada simultaneamente nos elementos horizontais, sendo que o travessão superior deveria resistir a 900 N (90 kgf), o travessão intermediário deveria resistir a uma carga de 600 N (66 kgf) e o rodapé deve resistir a uma carga de 220 N (22 kgf), similar a carga exigida pela OSHA 1926.502, totalizando uma carga aplicada de 178 kgf, ou seja, 1780 N, no sistema. Observa-se que, para a versão atualizada em 2020 e a consulta nacional em 2015, houve a alteração da carga aplicada para cada metro da estrutura.

Quanto às cargas a serem utilizadas pela EN 13374 (DIN, 2013), o dimensionamento deve ser realizado com o estado limite de serviço, estado limite último e ações acidentais, tal como definido no Quadro 2.

O estado limite de serviço, 6.3.2 do Quadro 2 é ilustrado pelas Figura 12 e 13, demonstrando como as cargas definidas devem atuar separadamente nos montantes, travessões e rodapés, sendo os valores de F_{T1} e F_{T2} de 300N e 200N, respectivamente.

O estado limite último: 6.3.3, cargas pontuais, do Quadro 2, é ilustrado pelas Figura 14 e 15, com valores definidos no quadro, diferenciados para montantes e travessões, F_{H1} de 300 N, e rodapé F_{H2} de 200N, com um fator de majoração de cargas de 1,5 (EN 13374, DIN, 2013).

Quadro 2: Requisitos de carga estática pela EN 13374:2013

Linha n°	Cláusula	Caso de carga	Designação	Carga Pontual [N]	Carga Distribuída q_i [N /m ²]	γF	Requisitos
1	6.3.2	Estado Limite de Serviço (ELS) Rodapé	F_{T2}	200	-	1	Máx. 55 mm deformação elástica do sistema
		Estado Limite de Serviço (ELS) Guarda-Corpo	F_{T1}	300			
2	6.3.3	Estado Limite Último (ELU) Rodapé	F_{H2}	200	-	1,5	$E_d \leq R_d$
		Estado Limite Último (ELU) Guarda-corpo	F_{H1}	300			
3	6.3.4	Estado Limite Último, (ELU) Máxima vento	Q_{MW}	-	600	1,5	$E_d \leq R_d$
4	6.3.5	Estado Limite Último, (ELU) Combinação de carga Rodapé	Q_{WW+FH2}	200	200	1,5	$E_d \leq R_d$
		Estado Limite Último, (ELU) Combinação de carga Guarda-corpo	Q_{WW+FH1}	300			
5	6.3.6	Estado Limite Último, (ELU)	F_{H3}	200	-	1,5	$E_d \leq R_d$
6	6.3.7	Estado Limite Último (ELU) com cargas acidentais	F_D	1250	-	1	$E_d \leq R_d$ máx. 300 mm durante deflexão carga

Em que:

E_d é o valor de cálculo do efeito das ações, por exemplo, flexão, uma força interna ou momento.

R_d valor de cálculo correspondente de resistência.

F_{T1} é a força vertical para montantes e travessões.

F_{T2} é a força vertical para rodapés.

F_{H1} é força horizontal para montantes e travessões.

F_{H2} é a força horizontal para rodapés.

Q_{MW} é a carga de vento.

Q_{WW} é a combinação de carga determinada em 6.3.4.

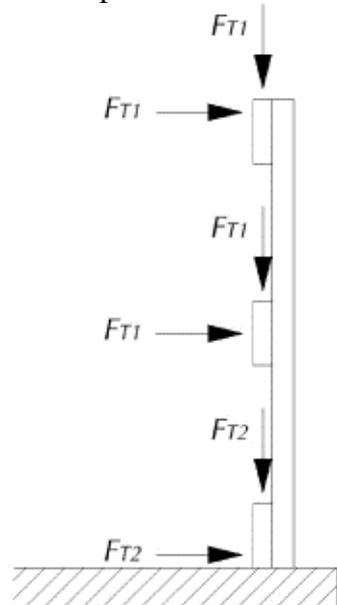
F_{H3} é força paralela ao sistema.

F_D é a força vertical atuando em um ângulo de até $\pm 10^\circ$ em relação a face do sistema de guarda-corpos.

γF coeficiente de segurança

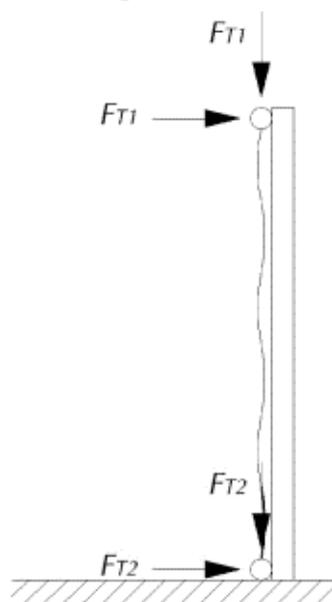
Fonte: Adaptado EN 13374 (DIN, 2013).

Figura 12: Estado limite de serviço, alternativa 1. Cargas agindo separadamente



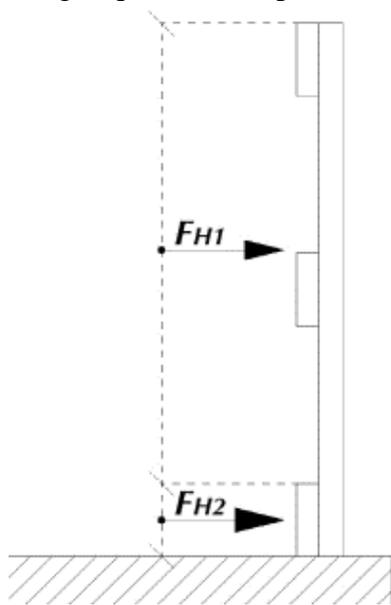
Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Figura 13: Estado limite de serviço, alternativa 2. Cargas que atuam separadamente



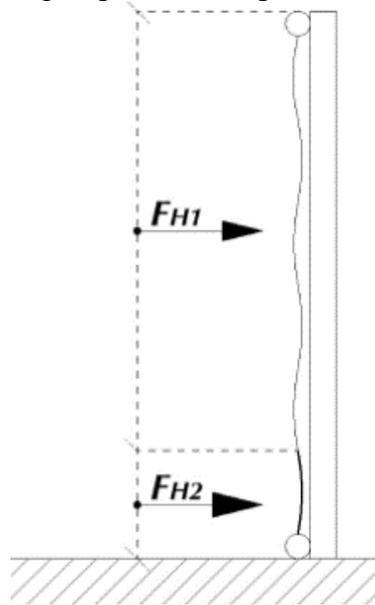
Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Figura 14: Estado limite último, alternativa 1 Cargas que atuam separadamente



Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Figura 15: Estado limite último, alternativa 2 Cargas que atuam separadamente



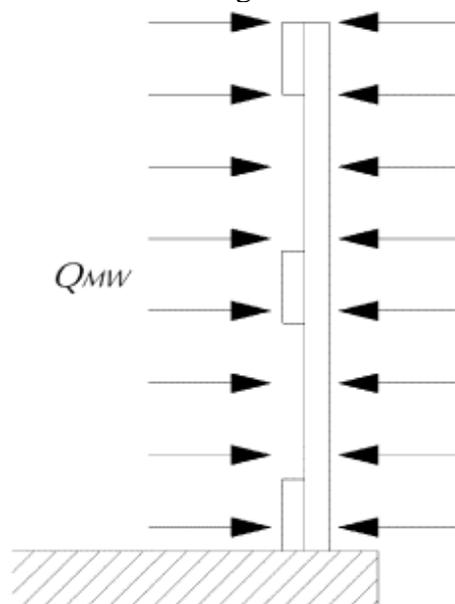
Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Para o caso de carregamento em estado limite de serviço, de cargas isoladas, a norma apresenta um requisito menos exigente de carregamento. Já para o caso de majoração para o estado limite último, a orientação é para aplicar a carga no elemento intermediário e rodapé,

consideração que se deve ao fato de a pior situação ser considerada na Europa, para uma queda em cobertura, ou seja, estruturas em declive. Com isso, caso a queda ocorra, ela será mais exigente na parte inferior da estrutura, não na superior, uso este diferente do analisado neste trabalho, em que as estruturas são instaladas em periferias de lajes de edifícios de múltiplos pavimentos.

O estado limite último, carga máxima de vento, item 6.3.4 do Quadro 2 é ilustrado na Figura 16, em valor de 600 N/m^2 , com um fator de majoração de cargas de 1,5.

Figura 16: Estado limite último – Carga de vento máxima, ambas as direções



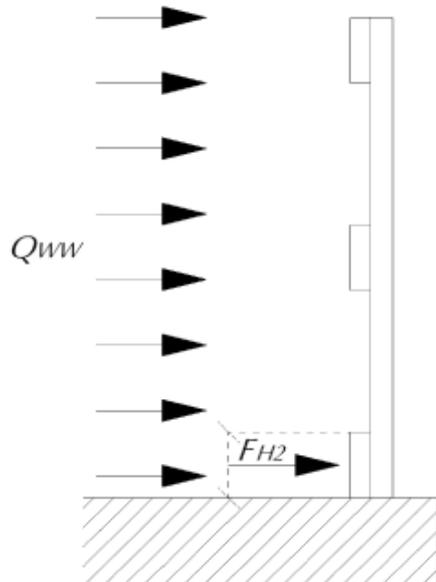
Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

A EN 13374 (DIN, 2013) ressalta que o valor de 600 N/m^2 abrange a maioria dos ventos da Europa, representando um vento nas condições de 40 m de altura e um período de 6 meses de exposição, com uma velocidade de vento de cerca de 32 m/s, sendo que outras condições podem ocorrer.

Para o estado último, item 6.3.5 do Quadro 2, as combinações são realizadas a partir de cargas de vento e cargas horizontais, com valores definidos no quadro de F_{H1} de 300 N, F_{H2} de 200 N e carga distribuída de vento, nesse caso, de 200 N/m^2 , com um fator de majoração de cargas de 1,5 e a aplicação, conforme Figura 17 e Figura 18.

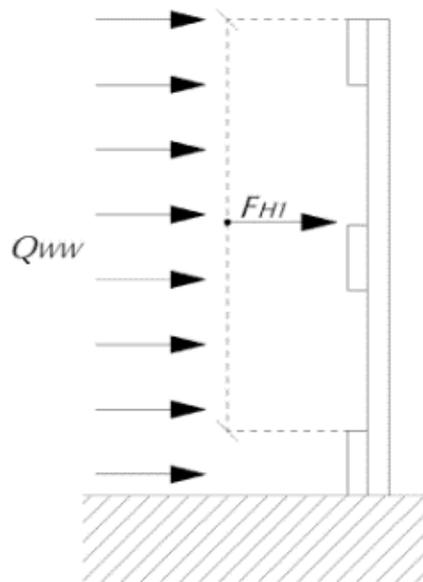
A EN 13374 (DIN, 2013), em seus estados de carregamento, prescreve também uma carga atuando de forma horizontal na estrutura no valor de 200 N e considerando um fator de majoração de cargas de 1,5, conforme estado limite último – 6.3.6 do Quadro 2 e a Figura 15Figura 19.

Figura 17: Combinação de carga Rodapé



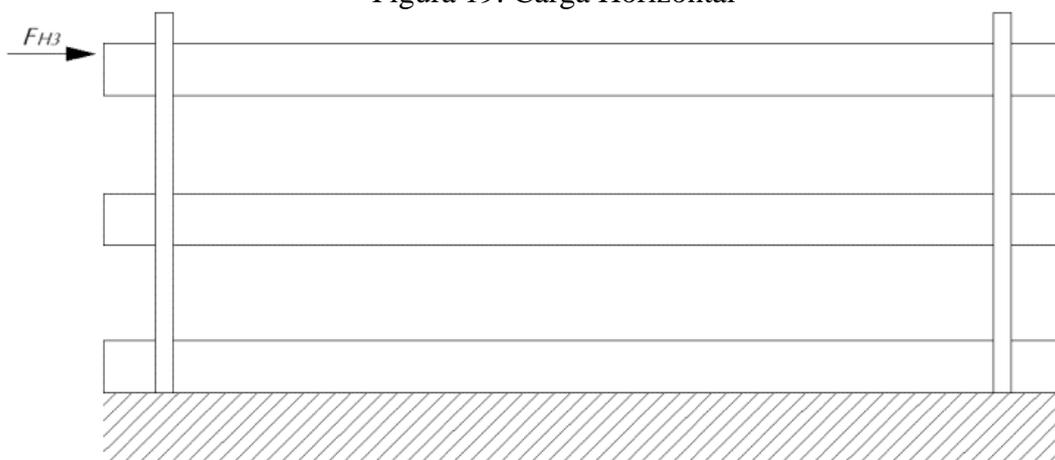
Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Figura 18: Combinação de carga. Todas as outras peças



Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

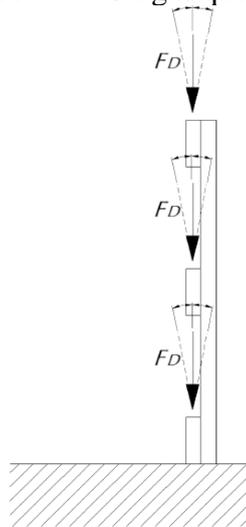
Figura 19: Carga Horizontal



Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Por fim, o estado limite último com cargas acidentais, item 6.3.7 do Quadro 2 da norma EN 13374 (DIN, 2013) prescreve uma carga acidental vertical F_D de 1250 N, aplicada em um ângulo de até $\pm 10^\circ$ em relação à face do sistema de guarda-corpos, conforme a Figura 20.

Figura 20: Carga acidental – Cargas que atuam separadamente



Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

A norma da Austrália e Nova Zelândia indica que as estruturas devem resistir as cargas estáticas aplicadas em qualquer ponto e qualquer direção dos montantes ou travessões superiores, no valor de 600 N, e o deslocamento máximo, tanto em montantes como em travessões, não deve exceder ao valor de 101 mm (AS/NZS, 2009a). No projeto, deve-se prever, além das cargas citadas, as cargas de vento, conforme especificado pela AS/NZS 1.170.2 e outras cargas ambientais (AS/NZS, 2009b).

Segundo a determinação da AS/NZS 4.994.1, as cargas dinâmicas devem prever uma pessoa impactando contra a proteção de borda, na forma, por exemplo, do resultado de um tropeço, deslizando do telhado, ou em queda, calculando a força transmitida pelo impacto. O deslocamento não deve ultrapassar os limites especificados nos Apêndices C e D detalhados no item destinado aos ensaios experimentais recomendados pela norma em questão (AS/NZS, 2009a).

Como base para o projeto, a AS/NZS 4.994.1 determina que o projeto estrutural deve incorporar quesitos de flexibilidade estrutural para minimizar prejuízos, caso ocorra o impacto entre estrutura e pessoa, não utilizando bordas afiadas. Ainda, deve ser concebido de forma que a força de impacto seja transferida para o equipamento e evite deslocamentos da estrutura e queda de pessoas. Deve ser verificada a resistência, por meio de ensaios ou, empiricamente, incluindo testes de verificação para esse padrão (AS/NZS, 2009a).

Para a norma da OSHA 1926.502 (2016), quanto ao desempenho das estruturas, os travessões superiores devem suportar, sem ruptura, uma força de 890 N, aplicada em 5,1 cm do travessão superior, em qualquer direção, horizontal ou vertical.

Para elementos intermediários, devem suportar, sem ruptura, uma força de 666 N aplicada em qualquer direção, horizontal ou vertical.

Como requisito de desempenho, a norma estipula que quando a carga de teste de 890 N for aplicada verticalmente na estrutura, o travessão superior do guarda-corpo não deve deslocar para uma altura menor que 100 cm acima do nível de trabalho (OSHA, 2016).

Para a proteção contra queda de materiais, é definido a instalação de rodapés sobre o piso de trabalho que devem suportar, sem ruptura, uma força de 222 N, aplicada em qualquer direção, horizontal ou vertical, ao longo da periferia; devem ser constituídos de altura mínima de 9 cm, com possíveis folgas de, no máximo, 0,6 cm com a superfície de trabalho; ser sólidos e não conter aberturas superiores a 2,5 cm (OSHA, 2016).

A nova redação da NR 18, versão 2020, com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, apresenta cargas similares a essas, com a orientação por metro da estrutura, considerando que a carga deverá ser multiplicada pela distância entre montantes.

O código de *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) determina que as resistências que os guarda-corpos devem apresentar são as que seguem.

- a) Uma carga horizontal concentrada de 900 N aplicada em qualquer ponto do travessão superior.
- b) Uma carga vertical concentrada de 450 N aplicada em qualquer ponto do travessão superior.

Em casos especiais de concentração de trabalhadores bem como áreas onde um guarda-corpo pode ser submetido a pressões anormais, o guarda-corpo deve ser reforçado em conformidade com o prescrito em *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) (QUÉBEC, 2021).

2.3.4 Comparação dos requisitos de resistência

A partir do Quadro 3, é possível verificar os itens em que as diferentes metodologias as normativas analisadas divergem entre si. As maiores variações entre as normas estão na aplicação da carga com 1500 N/m na RTP 01, a OSHA 1926.502:2016 determina 890 N para montantes e travessões superiores, elementos intermediários e de fechamento com resistência de 666 N e rodapé com 222 N. Quanto à EN 13374:2013, é normatizado um método de cálculo com cargas para o Estado Limite de Serviço (ELS), Estado Limite Último (ELU) e Cargas Acidentais para cada constituinte do guarda-corpo; a norma do Québec (S-

2.1, r.4:2021) prescreve uma resistência mínima para o travessão de uma carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N e a norma AS/NZS 4994.1:2009 com 600 N, aplicados em qualquer ponto e qualquer direção da estrutura.

Ainda, a partir da versão atualizada da NR 18, é possível analisar que, a norma brasileira vai ao encontro das disposições da norma dos Estados Unidos da América, com o requisito de aplicações de cargas, diferenciando-se pelas distâncias entre os montantes, que para o caso da norma brasileira, é determinado um valor para cada metro da estrutura de guarda-corpos de 900 N/m (90 kgf/m), 660 N/m (66 kgf/m) e 220 N/m (22 kgf/m).

Quadro 3: Revisão de requisitos de resistência em normas

NR 18 (BRASIL, 2018b)	RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003)	NR 18 (BRASIL, 2020)	EN 13374 (DIN, 2013)	AS/NZS 4994 (AS/NZS 2009a)	OSHA 1926.502 (OSHA, 2016)	S-2.1, r.4 (QUÉBEC, 2021)
1500 N/m		900 N/m ^{a)} 660 N/m ^{b)} 220 N/m ^{c)}	Método de cálculo com ELS, ELU e cargas acidentais, conforme Quadro 2	600 N ^{d)}	890 N ^{a)} 666 N ^{b)} 222 N ^{c)}	900 N ^{e)} 450 N ^{f)}

^{a)} Travessão Superior

^{b)} Travessão intermediário

^{c)} Rodapé

^{d)} Horizontal para fora, para dentro e vertical

^{e)} Horizontal

^{f)} Vertical

Fonte: Elaborado pela autora.

2.4 Métodos de ensaio para estruturas de guarda-corpos

A seguir, são apresentadas as metodologias de ensaios experimentais, para estruturas de guarda-corpos pelas normas Europeia EN 13374 (DIN, 2013) e da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994 (2009a). A OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) apresenta alguns critérios que nortearam os ensaios, porém não se trata de uma metodologia de ensaio.

As normas nacionais, NR 18 (BRASIL, 2018b; BRASIL, 2020), NR 35 (BRASIL, 2019b) e RTP 01 (Fundacentro, 2003) e internacional do código de *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) (QUÉBEC, 2020) não apresentam informações relativas a ensaios experimentais de guarda-corpos provisórios para a construção civil.

2.4.1 Ensaio estáticos

Neste item, são apresentadas as orientações para métodos de ensaios estáticos segundo as normas que apresentam metodologias definidas, a Europeia (EN 13374) e da Austrália e Nova Zelândia (AS/NZS 4994), ainda, apresenta-se as recomendações genéricas da norma dos Estados Unidos da América (OSHA – 1926.502).

2.4.1.1 Ensaio estático segundo a norma Europeia EN 13374

A norma Europeia EN 13374 (DIN, 2013) define um método de ensaio estático e um método de ensaio dinâmico. A metodologia do ensaio estático consiste na aplicação de um carregamento na etapa de pré-teste, chamado de ensaio de manutenção, partindo-se para a etapa de teste, as quais são aplicadas para o estado limite de serviço e, ainda, um ensaio de resistência, considerando um estado limite último. Os procedimentos indicados pela norma são apresentados.

Para a determinação das cargas a serem aplicadas, a EN 13374 (DIN, 2013) orienta a determinação por meio do cálculo do estado limite de serviço, estado limite último e cargas acidentais, conforme apresentado no item 2.3.3.

Para o procedimento de ensaio de manutenção, na etapa pré-teste, tem-se:

- 1º) Aplicar a carga de teste durante um minuto;
- 2º) Remover a carga;
- 3º) Registrar o deslocamento como δ_1 .

Para a etapa de teste deve-se:

4º) Aplicar a carga calculada para o travessão superior e intermediário em uma componente vertical e outra horizontal e aplicar a carga calculada para o rodapé também em uma componente vertical e outra horizontal, no ponto mais desfavorável da estrutura;

- 5º) Registrar o deslocamento como δ_2 (EN 13374, DIN, 2013).

Para a avaliação de deslocamentos, deverá ser calculada a deflexão média ($\delta_2 - \delta_1$) dos testes efetuados, devendo ser, no máximo, 55 mm, de modo que os valores isolados não podem exceder a 60 mm (EN 13374, DIN, 2013).

Na etapa para o ensaio de resistência, o sistema deverá ser carregado pela carga máxima de teste, sendo definida pela Equação 2:

$$F_{max} = \gamma_M \times \gamma_F \times Q_k \quad (2)$$

Em que: γ_M e γ_F são fatores de segurança, sendo:

$\gamma_F = 0,9$ para cargas a favor da segurança e $1,5$ para cargas permanentes e variáveis.

$\gamma_M = 1,1$ para materiais dúcteis metálicos, $1,25$ para materiais metálicos frágeis e $1,3$ para madeiras.

E o Q_k é a carga característica para o caso a ser considerado, linhas 2 e 6 do Quadro 1, respectivamente.

O procedimento consiste em:

- 1º) Aplicar a carga máxima na estrutura durante 1 minuto;
- 2º) Registrar possíveis rupturas do sistema;
- 3º) O sistema deverá ser levado a ruptura;
- 4º) Registrar a carga de ruptura do sistema (EN 13374, DIN, 2013).

Os critérios de aceitação do ensaio dizem que a carga de ruptura do sistema deve ser maior que a carga máxima calculada. Quando aplicada a carga máxima, essa não pode apresentar falhas e/ou ruptura (EN 13374, DIN, 2013).

2.4.1.2 Ensaio estático segundo a norma da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994

Na Austrália e na Nova Zelândia, existe a normatização AS/NZS 4994 para proteções de periferias. A AS/NZS 4994.1 (2009a), Proteção temporária de periferia – Parte 1: Requisitos Gerais, dispõem sobre estruturas de guarda-corpos e determina os métodos de ensaio.

O primeiro ensaio que é definido trata-se de um ensaio estático do montante da estrutura. Nesse ensaio, deve ser instalado um montante, conforme prevê o projeto.

O procedimento de ensaio consiste em:

1º) aplicar uma pré-carga no montante de 100 N, horizontalmente, por no mínimo 60 segundos para estabilizar a estrutura;

2º) Retirar a pré-carga e aplicar a maior carga entre 600 N ou 350 N/m, por um tempo entre 300 e 315 segundos, retirar o deslocamento;

3º) Aplicar um carregamento máximo de 1200 N por um tempo de, aproximadamente, 300 e 315 segundos e remover a carga, anotando qualquer falha do sistema (AS/NZS, 2009a).

Os critérios de aceitação definidos pela AS/NZS 4994.1 (2009a) para a etapa de carga de 600 N ou 350 N/m são deslocamentos menores que 101 mm e, para a etapa de carga máxima, o sistema não pode apresentar nenhuma ruptura ou falha estrutural.

O segundo ensaio definido pela AS/NZS 4.994.1 (2009a) trata-se de um ensaio estático de travessão superior, travessão intermediário, rodapé, fixação e painéis de fechamento. Para esse ensaio, deve-se instalar a estrutura como o projeto. Painéis não estruturais devem ser retirados.

Para o teste de carregamento vertical e horizontal, o procedimento de ensaio é realizado da mesma forma, variando a ordem e a forma de aplicação da carga, vertical, horizontal para dentro e horizontal para fora, a seguir os passos para o ensaio:

- 1º) Aplicar uma pré-carga de 100 N, remover a pré-carga e medir os deslocamentos;
- 2º) Aplicar a força de 600 N por um período de 300 a 315 segundos;
- 3º) Medir o deslocamento na estrutura;
- 4º) Retirar a carga (AS/NZS 4.994.1, 2009a).

Os critérios de aceitação para a etapa de carga de 600 N são deslocamentos inferiores a 101 mm, e o sistema não pode apresentar nenhuma ruptura ou falha estrutural (AS/NZS 4.994.1, 2009a).

2.4.1.3 Ensaio estático segundo a norma dos Estados Unidos da América OSHA – 1926.502

A norma internacional da OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) determina apenas que as estruturas devem suportar sem falhas, uma força de 890 N, aplicadas em uma largura de 5,1 cm do travessão superior, em qualquer direção para fora ou para baixo, em qualquer ponto ao longo do travessão superior.

Quando a aplicação da carga de 890 N for na direção descendente, a estrutura não pode deformar de modo que fique com uma altura inferior a 1,0 metro. Porém, não é apresentada metodologia de ensaio.

2.4.2 Ensaios de impacto

As normas EN 13374 e AS/NZS 4994, Europa e Austrália e Nova Zelândia, referem também método de ensaio de impacto para as estruturas de guarda-corpos, que são apresentados.

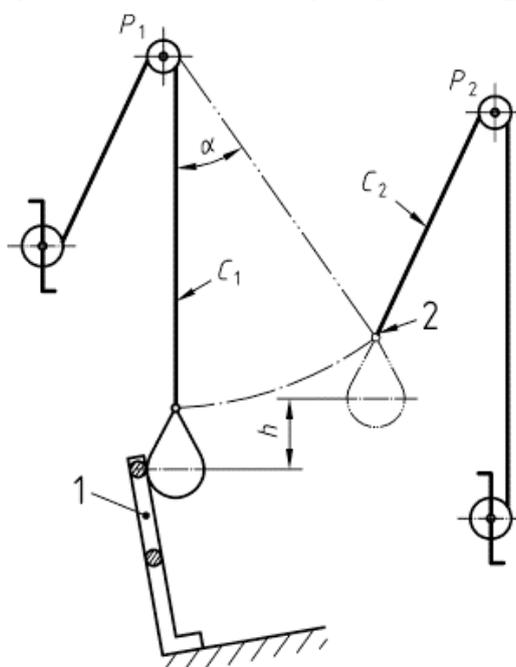
2.4.2.1 Ensaio de impacto segundo a norma Europeia EN 13374

O ensaio de impacto, conforme a EN 13374 (DIN, 2013), prevê a queda pendular que, ao bater no guarda-corpo, o objeto de impacto esteja em posição aproximadamente vertical. Na Figura 21, está apresentado um aparelho de teste recomendado pela EN 13374 (DIN, 2013).

O ensaio consiste em:

- 1º) Determinar um ponto de referência para as medições de deslocamentos;
- 2º) Levantar o objeto na posição inicial e liberar para que ocorra o impacto e registrar o deslocamento instantâneo no ponto de impacto.

Figura 21: Esquema do ensaio com aplicação da carga com impacto



Fonte: EN 13374 (DIN, 2013).

Devem ser realizados dois impactos no montante, um no topo com impacto de 500 J, seguido por um impacto na parte mais baixa do montante, no valor de 1100 J. Para o caso dos travessões, deve-se proceder de maneira similar aos montantes, primeiramente, produzir um impacto no valor de 500 J no travessão superior, em seguida, um impacto de 1100 J na parte mais baixa da proteção de periferia (DIN, 2013).

Durante esses procedimentos, nenhum componente do sistema pode ser substituído. Os dados que devem ser registrados são: as deflexões instantâneas, δ , para os dois pontos de impacto.

Os critérios de aceitação são de que o objeto ensaiado deve ser parado pela proteção de guarda-corpos e o deslocamento máximo deve ser de 100 mm no momento em que a energia é absorvida pelo sistema de proteção. O sistema, após o teste, poderá ficar deformado (DIN, 2013)

2.4.2.2 Ensaio de impacto segundo a norma da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994

O ensaio de impacto determinado pela norma consiste em um ensaio com carga pendular no montante, travessão superior apoiado em dois montantes, travessão intermediário e rodapé. A estrutura deve ser montada, conforme projeto, simulando o local que será instalada em obra (AS/NZS, 2009a).

A massa de impacto deve ter 60 kg, ser composta de um bloco de aço de 300mm x 300mm e ser revestida na face do impacto de uma camada de borracha com espessura de 15mm \pm 5 mm. O impacto deve ser realizado no topo do montante e no centro do vão do travessão superior, travessão intermediário e rodapé. Os deslocamentos horizontais devem ser medidos em um ponto de referência (AS/NZS, 2009a).

O procedimento consiste em:

- 1º) Elevar a massa de impacto a uma altura de 1000 mm do ponto de impacto, medida do centro de gravidade do bloco;
- 2º) Soltar a massa de impacto e deixar que ela impacte na estrutura;
- 3º) Registrar o deslocamento máximo no local do impacto e anotar qualquer falha estrutural visível (AS/NZS, 2009a).

Os critérios de aceitação são: deslocamento máximo no topo do montante e travessão superior, inferior a 401 mm, deslocamento máximo para travessão intermediário e rodapé

inferior a 201 mm e nenhum componente da estrutura testada deve desprender-se ou sofrer falha estrutural (AS/NZS, 2009a).

2.5 Comparação dos métodos de ensaio entre as normativas

A seguir, são apresentados os quadros comparativos com os principais itens para a realização dos ensaios estáticos, Quadro 4; e para os ensaios de impacto, Quadro 5; e, juntamente dos itens para as metodologias de ensaios, são apresentados os critérios de aceitação para cada ensaio.

Assim como nos aspectos geométricos, percebe-se uma variação nos métodos de ensaios determinados pelas normativas. As normas que apresentam metodologia definida, EN 13374 (DIN, 2013) e AS/NZS 4.994.1 (AS/NZS, 2009a) se diferem, além das cargas já apresentadas, também no tempo de aplicação das cargas de ensaio, de instantâneo para a primeira, e em torno de 5 minutos para a segunda, e no valor da pré-carga que para a norma europeia trata-se do próprio valor da carga de ensaio, e, para a norma da Austrália e Nova Zelândia, de 100 N. Os critérios de aceitação também apresentam divergência entre as respectivas normas.

A norma EN 13374 (DIN, 2013) e AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) apresentam critérios para verificação de resistência, por meio da medição e da verificação do deslocamento no ponto de aplicação da carga, com indicação de critérios de aceitação, avaliando os valores limites desses deslocamentos.

A primeira define deslocamento limite de 55 mm, não podendo deslocar mais de 60 mm nas fases do ensaio e a segunda deslocamentos inferiores a 101 mm. Ambas exigem que a estrutura não apresente falhas e/ou ruptura. A EN 13374 (DIN, 2013) ainda apresenta um ensaio de ruptura, segundo o qual deve ser calculada a carga máxima que a estrutura deverá resistir sem romper.

A OSHA 1926.502 (OSHA, 2016), apresenta especificações de deslocamento limites, que quando aplicado o carregamento vertical, essa não pode deslocar para uma altura de travessão superior inferior a 100 cm em relação ao piso, nesse caso, o deslocamento pode variar conforme a altura da estrutura.

Considerando que a carga a ser aplicada na EN 13374 (DIN, 2013) é 300 N e a AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) é 600N, o deslocamento limite da AS/NZS 4994.1:2009 apresenta-se mais restritivo, em torno de 0,16667 mm/N.

Quadro 4: Revisão de requisitos para ensaios experimentais estáticos em normas

Requisitos	EN 13374 (DIN, 2013)			AS/NZS 4994 (AS/NZS 2009a, 2009b)			OSHA 1926.502 (OSHA, 2016)	
Elemento	Travessão superior, intermediário e rodapé			Ensaio de montante			Travessão superior, intermediário e rodapé	
Etapas de ensaio	Pré-carga	Carga	Carga máxima	Pré-carga	Carga	Carga máxima	Pré-carga	Carga
Cargas aplicadas (N)	200* 300**	200* 300**	$F_{max} = \gamma_M \times \gamma_F \times Q_k$	100	600 N ou 350 N/m	1200 N	100 ***	600 ***
Duração da aplicação da carga (s)	60	Instantâneos	60	≥ 60	300 a 315	300 +/- 1	N.D.	300 a 315
Medidas realizadas	δ_1	δ_2	Registrar possíveis falhas	δ		Registrar possíveis falhas	δ	
Critérios de aceitação	$\delta_1 < 60$ mm $\delta_2 < 60$ mm $\delta_2 - \delta_1 \leq 55$ mm		Levar a estrutura a ruptura Registrar carga de ruptura ($F_{ruptura}$) $F_{ruptura} > F_{max}$	$\delta < 101$ mm		Nenhuma ruptura/falha	$\delta < 101$ mm Nenhuma ruptura/falha	
	Quando a aplicação da carga for na direção descendente a estrutura não pode deformar de uma forma que fique com uma altura inferior a 1,0 metro							

* Rodapé

** Travessão Superior e intermediário

*** Carregamentos no sentido para fora, para dentro e vertical

**** Horizontal e vertical

N.D.: Não disponível

 δ : Descolamento

Fonte: Elaborado pela autora.

O critério da OSHA não é possível de ser avaliando, considerando que a altura da estrutura é um critério variável de projeto de 1,1 m +/- 0,08m.

Quanto aos ensaios de impacto, observa-se que a EN 13374 (DIN, 2013) indica um impacto no topo da estrutura inferior ao da base, isso deve-se ao fato de que os ensaios de impacto para as estruturas são indicados para classe B e C que são superfícies inclinadas, a exemplo de coberturas. Nesse sentido, caso ocorra uma queda e a pessoa deslize nessa superfície inclinada, a estrutura será mais solicitada na sua base.

No caso do impacto maior, este é indicado no valor de 1100 J e para a região menos impactada no valor de 500 J. Já a norma da Austrália e Nova Zelândia indica um impacto de 600 J na estrutura de forma geral, calculado a partir das considerações da configuração de ensaio.

As normas ainda indicam que o impacto deve ocorrer nos elementos horizontais (travessão superior, intermediário e rodapé) e também nos elementos verticais (montantes).

Quadro 5: Revisão de requisitos para ensaios experimentais de impacto em normas

Requisitos	EN 13374 (DIN, 2013)				AS/NZS 4994 (AS/NZS 2009a, 2009b)
	Montante Topo	Montante Base	Travessão Superior	Rodapé	Montante, travessão superior, intermediário e rodapé
Impacto aplicado (J)	500	1100	500	1100	600
Objeto impacto	Objeto esférico cônico Mass a definir de acordo com o impacto				Massa de 60 kg Bloco de aço de 300mm x 300mm Revestido na face do impacto de uma camada de borracha com espessura de 15mm ± 5 mm
Altura de impacto	A definir de acordo com o impacto				1000 mm
Forma do impacto	Pendular				Pendular
Medidas realizadas	Deslocamentos instantâneos (δ) no ponto de impacto				Deslocamentos instantâneos (δ) no ponto de impacto
Critérios de aceitação	Objeto ensaiado deve ser parado pela proteção de guarda-corpos $\delta < 100$ mm sistema, após o teste, poderá ficar deformado				$\delta < 401$ mm * $\delta < 201$ mm **

* Para travessão superior e montante

** Para travessão intermediário e rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nesses critérios, considera-se a norma europeia mais exigente, com um critério de deslocamento limite inferior a 0,0909 mm/J, e a norma da Austrália e Nova Zelândia com um critério de 0,6666 mm/J, para travessão superior e montante, e 0,3333 mm/J, para travessão intermediário e rodapé.

A avaliação da estrutura é realizada por meio de medição dos deslocamentos no ponto de impacto com deslocamentos limites e critérios de falha da estrutura. Para a norma europeia, o critério é que a estrutura apresente deslocamentos inferiores a 100 mm. Para a norma da Austrália e Nova Zelândia, os deslocamentos devem ser inferiores a 401 mm para o travessão superior e montantes e 201 mm para o travessão intermediário, a primeira ainda indica que a estrutura poderá ficar deformada após o impacto, mas deve conter a queda.

2.6 Revisão bibliométrica

Com a finalidade de basear a revisão sistêmica apresentada na sequência, foi realizada uma revisão bibliométrica sobre o tema a partir do software *RStudio* e do pacote *bibliometrix*. As bases de dados adotadas foram a *Scopus* e *Web of Science* (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

As palavras-chaves utilizadas nas buscas foram *guardrail** (guarda-corpos), *and safety* (segurança), *and falls* (quedas), *and construction* (construção) e as exclusões foram *bridge* (pontes) *and scaffold** (Andaime). Com isso, foram encontrados em torno de 25 artigos publicados nas bases de dados.

Ao adicionar *experimental* (experimental) na pesquisa, os dados fornecidos pela *Scopus* foram quatro artigos, sendo três deles os mesmos já fornecidos anteriormente e um ensaio experimental numérico de andaime, sendo excluído da base de dados. Em relação à base de dados da *Web of Science*, nenhuma correspondência foi fornecida para a pesquisa nessas configurações.

O Quadro 6 apresenta os trabalhos aos quais foi possível o acesso, sendo, portanto, analisados na revisão sistêmica a partir da busca da revisão bibliométrica com as informações de autores, revista da publicação, título do trabalho (na língua em que foi publicado e traduzido) e o ano de publicação.

Quadro 6: Resultado da revisão bibliométrica sobre o tema (continua)

Autores	Revista	Títulos	Ano
GALY B.	<i>Practice Periodical on Structural Design and Construction</i>	<i>In Situ Testing of Temporary Steel Guardrails Installed on Existing Flat-Roof Parapets</i> (Teste em loco de Guarda-corpos Temporários de Aço Instalados em Parapeitos de Telhado Plano Existentes)	2021
GALY B.; LAN A.	<i>Practice Periodical on Structural Design and Construction</i>	<i>Strength of Temporary Wooden Guardrails Installed on Open Joists and Prefabricated Walls</i> (Resistência das proteções temporárias de madeira instaladas em vigas treliças e paredes pré-fabricadas)	2020
JOKKAW N.; SUTEECHAR UWAT P.; WEERAWET WAT P.	<i>Engineering Journal</i>	<i>Measurement Of Construction Workers Feeling by Virtual Environment VE Technology for Guardrail Design in Highrise Building Construction Projects</i> (Medição do sentimento dos trabalhadores da construção pelo ambiente virtual Tecnologia VE para projeto de guarda-corpo em projetos de construção de edifícios altos)	2017
SIDDULA M.; DAI F.; YE Y.; FAN J.	<i>Construction Innovation</i>	<i>Classifying construction site photos for roof detection: A machine-learning method towards automated measurement of safety performance on roof sites</i> (Classificação de fotos do canteiro de obras para detecção de trabalhos em telhado: um método de aprendizado de máquina para medição automatizada de desempenho de segurança in loco de telhado)	2016

Quadro 6: Resultado da revisão bibliométrica sobre o tema (continua)

SIDDULA M; DAI F; YE Y; FAN J	<i>Procedia Engineering</i>	<i>Unsupervised Feature Learning for Objects of Interest Detection in Cluttered Construction Roof Site Images</i> (Aprendizagem não supervisionada de recursos para detecção de objetos de interesse em imagens desordenadas de telhados de construção)	2016
ESCAMILLA A.; GARCA M.; PREZ N.	<i>Revista de La Construcción</i>	<i>Static Load Behavior and Energy Absorption of Safety Guardrails for Construction Works</i> (Comportamento de carga estática e absorção de energia de guarda-corpos de proteção para obras de construção)	2016
GONZALEZ M.; COBO A.; CASTAO A.; PRIETO M.	<i>Informes de La Construcción</i>	<i>A Comparison of the Resistance of Temporary Edge Protection Systems to Static and Dynamic Loads</i> (Uma comparação da resistência dos sistemas de proteção temporária de borda a cargas estáticas e dinâmicas)	2015
SULOWSKI A.	<i>Informes de La Construcción</i>	<i>Collective Fall Protection for Construction Workers</i> (Proteção coletiva contra quedas para trabalhadores da construção)	2014
POMARES J.; IRLES R.; SEGOVIA E.; BOIXADER D.	<i>Informes de La Construcción</i>	<i>Barandillas de protección personal con solicitación dinámica</i> (Guarda-corpos para proteção individual com carregamento dinâmico)	2013
RAJENDRAN S.; GAMBATESE J.	<i>Practice Periodical on Structural Design and Construction</i>	<i>Risk And Financial Impacts of Prevention Through Design Solutions</i> (Riscos e impactos financeiros da prevenção por meio de soluções de projetos)	2013

Quadro 6: Resultado da revisão bibliométrica sobre o tema (conclusão)

GONZÁLEZ M; COBO A; FUENTE J; BRESO S; LOZANO C	<i>Informes de La Construcción</i>	<i>Behavior Under Static Loads of Temporary Edge Protection Systems Built with Steel Elements</i> (Comportamento sob cargas estáticas de sistemas temporários de proteção de borda construídos com elementos de aço)	2011
BOBICK T; MCKENZIE J E; KAU T	<i>Journal of Safety Research</i>	Evaluation of Guardrail Systems for Preventing Falls Through Roof and Floor Holes (Avaliação de sistemas de guarda-corpo para prevenção de quedas através de furos no telhado e no piso)	2010
LAN A; DAIGLE R	<i>Safety Science</i>	<i>Development And Validation of a Method for Evaluating Temporary Wooden Guardrails Built and Installed on Construction Sites</i> (Desenvolvimento e validação de método para avaliação de guarda-corpos temporários de madeira construídos e instalados em canteiros de obras)	2009
HSIAO H; SIMEONOV P	<i>Ergonomics</i>	Preventing Falls from Roofs a Critical Review (Prevenção de quedas de telhados, uma revisão crítica)	2001
JOHNSON H; SINGH A; YOUNG R	<i>Journal of Construction Engineering and Management</i>	<i>Fall Protection Analysis for Workers on Residential Roofs</i> (Análise de proteção contra quedas para trabalhadores em telhados residenciais)	1998

Fonte: Adaptado de Aria e Cuccurullo (2017).

2.7 Revisão Sistêmica

A seguir, são apresentados estudos, nacionais e internacionais, realizados na área de guarda-corpos, focando, principalmente, em métodos de ensaios, estáticos e de impacto, e principais conclusões que os autores chegaram após pesquisas.

A revisão sistêmica foi realizada a partir de trabalhos que foram considerados relevantes para o tema e a partir de uma revisão bibliométrica realizada sobre o assunto.

Hsiao e Simeonov (2001) avaliaram fatores que se relacionam à perda de equilíbrio em atividades em coberturas. Concluíram no trabalho que em relação a fatores ambientais que podem influenciar na perda de equilíbrio estão fatores como superfícies inclinadas, elevações, mudanças na superfície do telhado. Em relação às tarefas desenvolvidas podem estar relacionadas fatores como manuseio de cargas, esforço físico, fadiga, complexidade da atividade e grau de atenção requerido. Ainda, em relação a fatores pessoais, experiência e treinamento do trabalhador, o uso dos equipamentos de proteção, diferenças pessoais. Indicam ainda que são necessários diversos melhoramentos pontuais nos ambientes de trabalho que podem contribuir para um melhor controle do equilíbrio dos trabalhadores em atividades em coberturas para aperfeiçoar o desempenho, reduzindo riscos de quedas e garantindo a segurança (HSIAO; SIMEONOV, 2001).

Percebe-se que os autores indicam situação de obras em que geram o risco de uma queda, sendo necessária a adoção de estruturas para impedir ou limitar a queda das periferias. Indicam, também, a importância de medidas de proteções e ainda ressaltam a relevância de treinamentos e experiências dos trabalhadores, assim como fatores da própria atividade desenvolvida.

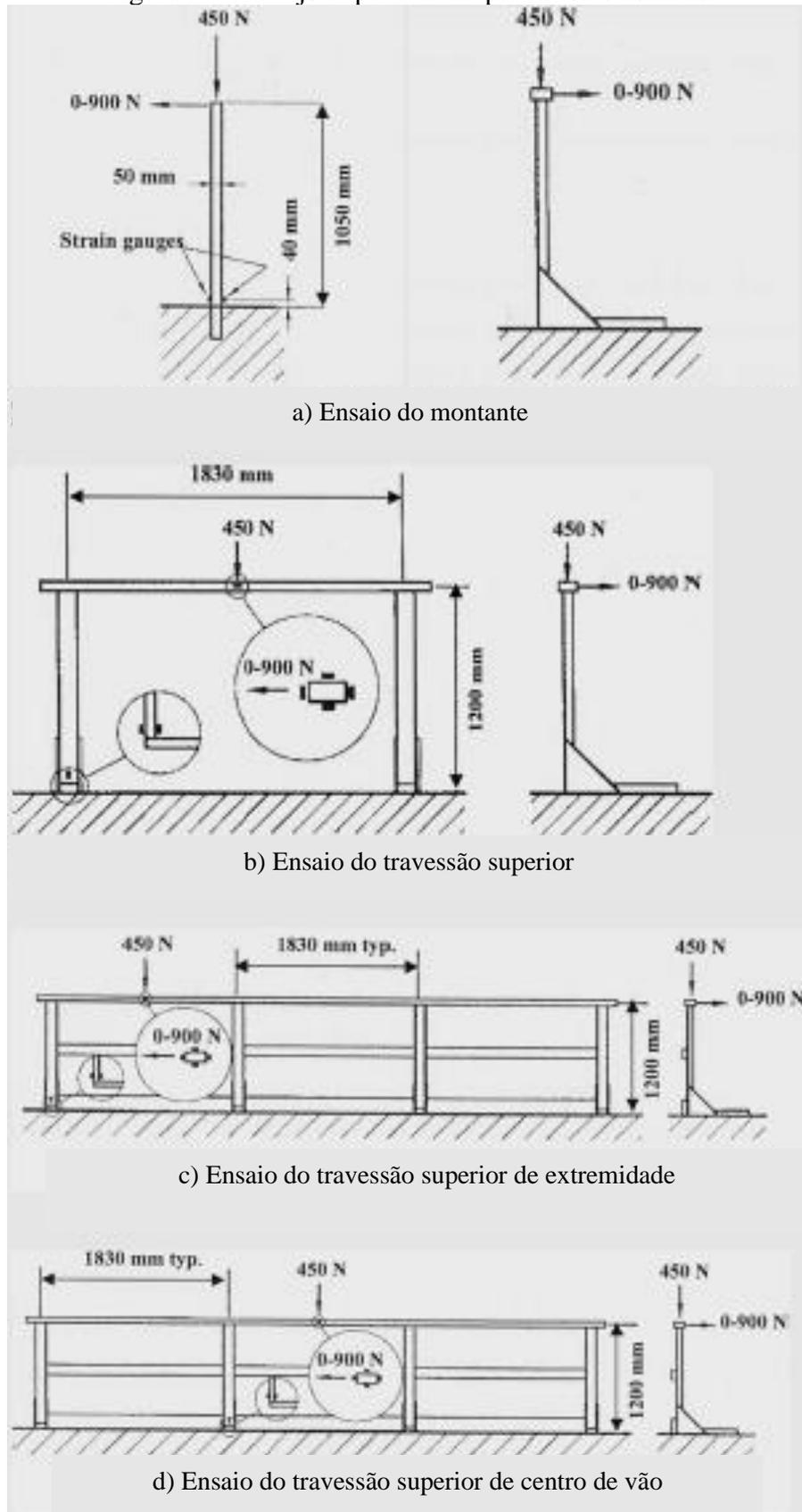
Lan e Daigle (2009) realizaram um estudo sobre guarda-corpos de madeira, a fim de atender à determinação do código de Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1, r.6). Os autores realizaram, além da verificação da resistência das estruturas e atendimento aos requisitos do código do Québec, uma entrevista com profissionais da área de Segurança e Saúde do Trabalho e visitas aos locais de obra com a finalidade de verificar o conjunto de guarda-corpos mais adequado e as principais dificuldades encontradas na instalação e utilização desses sistemas.

As estruturas de guarda-corpos foram pregadas no chão, com um cuidado com as fixações e um reforço dessa estrutura, o perfil utilizado foi madeira de 38 mm x 89 mm, a madeira foi do tipo serrada, adquirida em lojas em que as construtoras fazem a compra do material utilizado nas estruturas. O travessão superior foi pregado no topo de montantes espaçados a 1,80 m, o travessão intermediário, fixado a metade da altura dos guarda-corpos. A altura do sistema variou de 1 m a 1,2 m (LAN; DAIGLE, 2009).

Lan e Daigle (2009) ensaiaram, inicialmente, as estruturas estaticamente de acordo com as cargas estipuladas pelo código de *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1, r.6). A seguir, é apresentado o procedimento de ensaio estático.

- 1) Ensaio do montante com a finalidade de verificar a fixação com a laje de concreto, Figura 22a:
 - a. aplicação simultânea de uma carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N no topo do montante;
 - b. medição do deslocamento para traçar o diagrama de força x deslocamento;
 - c. medição da deflexão a 900 N;
 - d. medição do deslocamento máximo na base do montante;
 - e. observação do comportamento do montante sob carga.
- 2) Ensaio do travessão superior conforme instalação no canteiro de obras, com a instalação de 2 montantes e o travessão superior, Figura 22b:
 - a. aplicação simultânea de uma carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N no centro do vão do travessão superior;
 - b. medição dos deslocamentos máximos nos pontos críticos da estrutura;
 - c. observação do comportamento da estrutura sob carga.
- 2) Ensaio do travessão superior de extremidade, conforme instalação no canteiro de obras, com uma série de 4 montantes e 2 travessões, Figura 22c:
 - a. aplicação simultânea de uma carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N no centro do vão do travessão superior;
 - b. medição dos deslocamentos máximos nos pontos críticos da estrutura;
 - c. observação do comportamento da estrutura sob carga.
- 3) Ensaio do travessão superior de centro de vão, conforme instalação no canteiro de obras, com uma série de 4 montantes e 2 travessões, Figura 22d:
 - a. aplicação simultânea de uma carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N no centro do vão do travessão superior;
 - b. medição dos deslocamentos máximos nos pontos críticos da estrutura;
 - c. observação do comportamento da estrutura sob carga.

Figura 22: Arranjo experimental para ensaio estático



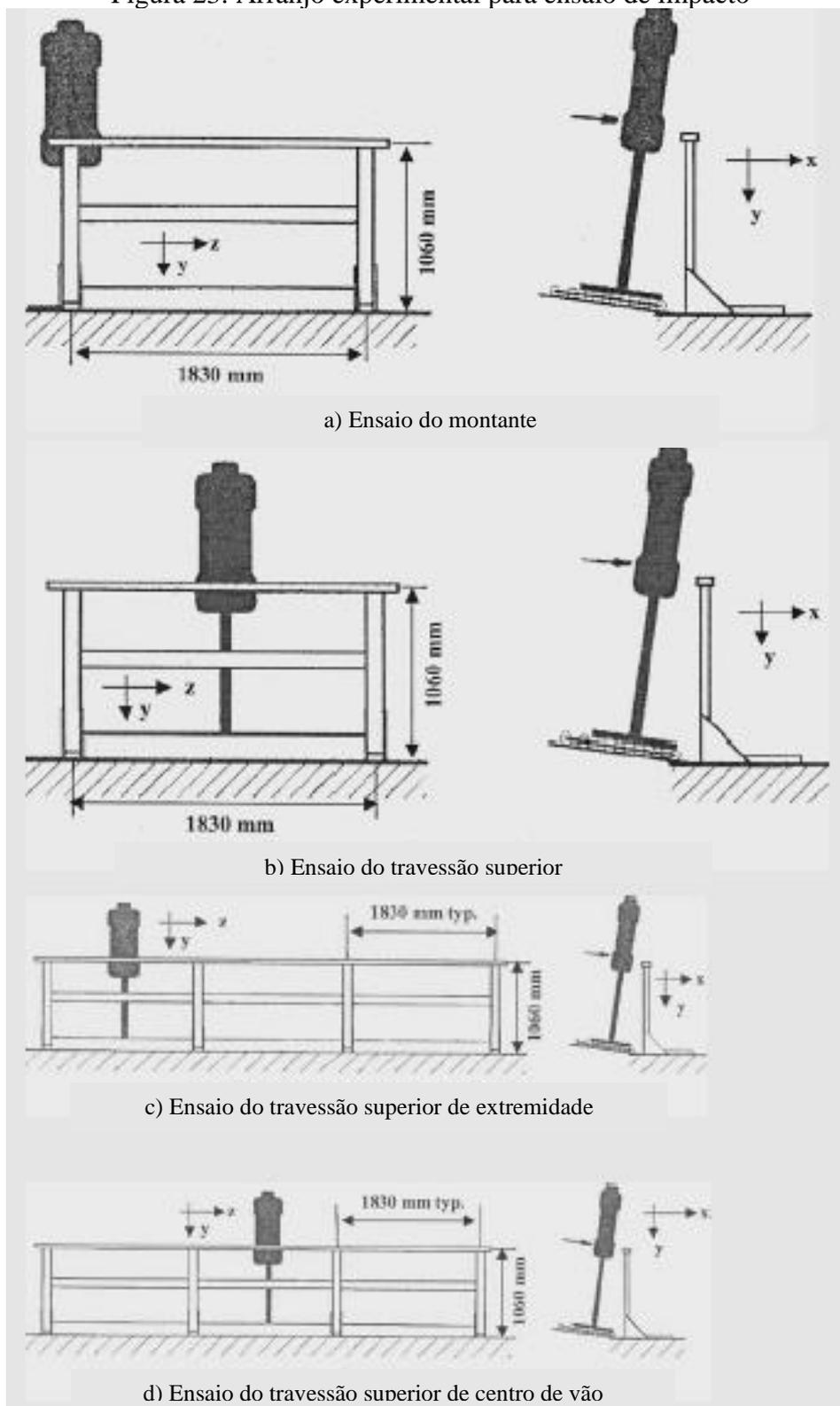
Fonte: Adaptado de Lan e Daigle (2009).

Após a realização dos ensaios estáticos, foram realizados ensaios de impacto adaptados do *Institut National Recherche et de Sécurité*, sendo aplicada uma carga de 100 kg, por meio de um tronco de madeira preparado para os ensaios a uma velocidade de 2 m/s (LAN; DAIGLE, 2009).

O procedimento adotado para os ensaios de impacto foi:

- 1) Impacto no montante, Figura 23a:
 - a. impacto de 100 kg a uma velocidade de 2 m/s;
 - b. medição dos deslocamentos nas direções xx, yy, zz com transdutores de deslocamento;
 - c. fotografias tiradas com a câmera de alta velocidade;
 - d. capacidade resistente do montante em absorver o impacto do tronco de madeira;
 - e. observação do comportamento do montante sob a força de impacto.
- 2) Impacto no travessão superior conforme instalação no canteiro de obras, com a instalação de 2 montantes e o travessão superior, Figura 23b:
 - a. impacto de 100 kg a uma velocidade de 2 m/s;
 - b. medição dos deslocamentos nas direções xx, yy, zz com transdutores de deslocamento;
 - c. fotografias tiradas com a câmera de alta velocidade;
 - d. capacidade resistente do montante em absorver o impacto do tronco de madeira;
 - e. observação do comportamento do montante sob a força de impacto.
- 3) Impacto no travessão superior de extremidade, conforme instalação no canteiro de obras, com uma série de 4 montantes e 2 travessões, Figura 23c:
 - a. impacto de 100 kg a uma velocidade de 2 m/s;
 - b. medição dos deslocamentos nas direções xx, yy, zz com transdutores de deslocamento;
 - c. fotografias tiradas com a câmera de alta velocidade;
 - d. capacidade resistente do montante em absorver o impacto do tronco de madeira;
 - e. observação do comportamento do montante sob a força de impacto.

Figura 23: Arranjo experimental para ensaio de impacto



Fonte: Adaptado de Lan e Daigle (2009).

- 4) Impacto no travessão superior de centro de vão, conforme instalação no canteiro de obras, com uma série de 4 montantes e 2 travessões, Figura 23d:

- a. Impacto de 100 kg a uma velocidade de 2 m/s;
- b. Medição dos deslocamentos nas direções xx, yy, zz com transdutores de deslocamento;
- c. As fotografias tiradas com a câmera de alta velocidade;
- d. Capacidade resistente do montante em absorver o impacto do tronco de madeira;
- e. Observação do comportamento do montante sob a força de impacto.

De acordo com as conclusões dos autores, os ensaios estáticos demonstraram que nem sempre as estruturas de madeira vão resistir aos esforços horizontais aplicados de 700 N, 800 N e 900 N. Quanto aos reforços realizados nos montantes, observaram que esses ajudam, consideravelmente, no sistema, fazendo com que os deslocamentos sejam menores (LAN; DAIGLE, 2009).

Quanto aos testes dinâmicos, esses mostraram, novamente, que os guarda-corpos de madeira, na concepção utilizada no ensaio, não resistem aos esforços gerados pela queda de um trabalhador, apresentando ruptura dos elementos construtivos (LAN; DAIGLE, 2009).

Com a pesquisa em canteiro de obras, os autores chegaram à conclusão de que os guarda-corpos com maior rigidez têm uma maior probabilidade de passar nos testes de resistência (LAN; DAIGLE, 2009).

Os autores ainda recomendam que a seção maior da madeira de 89 mm seja instalada de forma que a maior inércia receba as cargas horizontais e que sejam utilizadas madeiras de melhor qualidade, madeiras estruturais. Com isso, sugerem uma alteração no código utilizado, a fim que determine a qualidade da madeira a ser utilizada nos sistemas. Também quanto à fixação da estrutura na laje, sugerem que seja incluído a necessidade de reforço (LAN; DAIGLE, 2009).

Bobick, McKenzie e Kau (2010), em uma pesquisa pelo Instituto Nacional de Segurança e Saúde do Trabalho (NIOSH), Divisão de Investigação de Segurança, *Morgantown, West Virginia*, avaliaram dois sistemas comerciais de guarda-corpos, de madeira com seção, de aproximadamente, 5 cm x 10 cm, típico de obra de Construção Civil, com objetivos de verificar o atendimento à exigência de carga da OSHA, método de instalação e força global do sistema assim como a quantidade de madeira utilizada para cada sistema e a influência da qualidade da madeira.

Para o trabalho, Bobick, McKenzie e Kau (2010) realizaram ensaios experimentais das estruturas. Inicialmente, nove trabalhadores da construção civil foram selecionados para

realizar a montagem de diferentes sistemas de guarda-corpos, conforme o uso em aberturas de telhados comuns nas obras locais. Cada um dos trabalhadores construiu cinco sistemas, sendo três para uso em superfícies planas e dois para superfícies de telhados inclinados.

O material utilizado foi madeira do tipo pinho branco, com poucos nós e sem visualização de defeitos e os guarda-corpos foram construídos em peças de seção de 5x10 cm, conforme recomendações da OSHA (BOBICK; MCKENZIE; KAU, 2010).

Bobick, McKenzie e Kau (2010) simularam um telhado em laboratório para representar um telhado real conforme a situação de trabalho em obras. Os autores ainda indicam que, como a OSHA 1926.502 não especificava se os 900 N da carga eram aplicados de forma estática ou dinâmica e o objetivo do estudo era simular a queda de um trabalhador pesando 900 N ou mais na estrutura de guarda-corpo de forma mais real possível, criaram um manequim de teste, na forma de um corpo humano, o qual foi preenchido com grânulos de borracha e areia para fornecer o peso desejado. Posteriormente, foi criada uma estrutura de aço articulada na altura dos joelhos para recriar a situação de queda de um ser humano ao tropeçar e cair no travessão. As estruturas foram ensaiadas a partir de um impacto, conforme Figura 24.

Figura 24: Manequim de impacto e estrutura articulada para o impacto



Fonte: Bobick, McKenzie e Kau (2010).

Bobick, McKenzie e Kau (2010) afirmam que, ao trabalhar em um telhado inclinado, há apenas uma direção que o trabalhador vai cair, essa direção é o declive. Com isso, para o telhado inclinado, o ensaio consistiu em posicionar o manequim acima do guarda-corpo e deixá-lo cair livremente impactando no travessão superior por meio da estrutura de aço criada para o impacto.

Para que a força causada pelo manequim no travessão superior fosse a determinada pela OSHA, de 900N ou mais, os autores realizaram calibrações dos ensaios, variando a distância de queda de impacto por meio de uma abordagem iterativa. A força média aplicada nas estruturas variou entre 900 N a 1720 N, com um valor médio de 1135 N. A velocidade de impacto foi estimada em 1,52 m/s (BOBICK; MCKENZIE; KAU, 2010).

Ainda, após os ensaios de impacto, os autores carregaram a estrutura até a ruptura por meio de um teste estático de puxar a estrutura no mesmo sentido do impacto com a finalidade de avaliar as forças que levavam à ruptura das diferentes configurações dos sistemas de guarda-corpos montados, sendo que as forças máximas aplicadas superaram a recomendação da OSHA de 900N, chegando até em 3600 N (BOBICK; MCKENZIE; KAU, 2010).

Com o estudo, os autores chegaram à conclusão de que é imprescindível a instalação de guarda-corpos, fabricados com madeira nova, e que a reutilização da madeira se torna uma prática insegura que deve ser evitada, devido a relatos de um acidente fatal ocorrido em obra após um trabalhador se encostar e cair em um sistema reinstalado usando as mesmas tábuas pregadas e buracos de pregos para economizar tempo e custos de materiais. Em vez de proteger o trabalhador, o trilho superior se soltou, e o trabalhador caiu para a frente, caindo para sua morte (BOBICK; MCKENZIE; KAU, 2010).

Com os testes realizados, os autores afirmam que todas as 45 configurações de guarda-corpos resistiram ao teste de impacto. Ainda, que os dois sistemas de guarda-corpos de madeira de 5 cm x 10 cm, conforme recomendações da OSHA, podem ser utilizados com segurança, desde que os parafusos e/ou pregos sejam dimensionados adequadamente (BOBICK; MCKENZIE; KAU, 2010).

Percebe-se que o trabalho de Lan e Daigle (2009) aponta a questão da utilização da seção de maior inércia do perfil de madeira para receber as cargas horizontais. Juntamente com Bobick, McKenzie e Kau (2010) orientam para o cuidado com a qualidade da madeira. Guarda-corpos provisórios devem ser considerados como estruturas provisórias, com isso, deve-se ter dimensionamento adequado e observar que seja uma madeira estrutural quando concebida em madeira.

Ainda, quanto ao atendimento do desempenho das estruturas, Lan e Daigle (2009) apontam que nem sempre as estruturas irão resistir à força horizontal estática de 700 N, 800 N e 900 N e ao impacto. Concluem, também, que as estruturas não resistem aos esforços gerados pela queda de um trabalhador, simulado por 100 kg a uma velocidade de 2 m/s. Os

modelos ensaiados pelos autores eram de madeira serrada de 38 mm x 89 mm, com montantes espaçados a 1,80 m.

Já os modelos ensaiados por Bobick, Mckenzie e Kau (2010) eram também de madeira, usuais da construção civil, de aproximadamente, 50 mm x 100 mm, consideram que essas estruturas atenderiam às exigências da OSHA, apresentando segurança para a utilização em obras. As ligações realizadas por pregos e parafusos são apontadas como um fator que se deve ter cuidado no dimensionamento das estruturas.

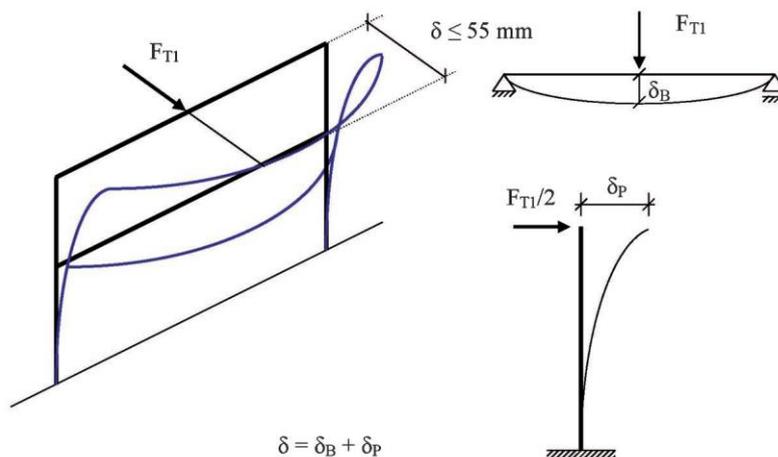
Gonzalez *et al.* (2011) realizaram estudos analíticos e ensaios experimentais de estruturas de guarda-corpos para atender aos requisitos definidos pela normatização EN 13374:2004 em obras da Construção Civil.

Os estudos analíticos basearam-se na análise do Estado Limite de Serviço (ELS), Estado Limite Último (ELU) e carga acidental conforme UNE-EN13374:2004, e, em caso de estruturas de aço, a norma de referência EN 1993-1-1 – Eurocode 3 (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

O cálculo da estrutura foi considerado separadamente, incluindo, nas análises, os efeitos produzidos pelo restante, como se o travessão fosse uma viga simplesmente apoiada e o montante um suporte incorporado na estrutura de concreto (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

A Figura 25 demonstra como é realizada a aplicação de cargas na estrutura pelos autores, levando em consideração o método de dimensionamento da EN 13374 (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

Figura 25: Método de dimensionamento da estrutura de guarda-corpo



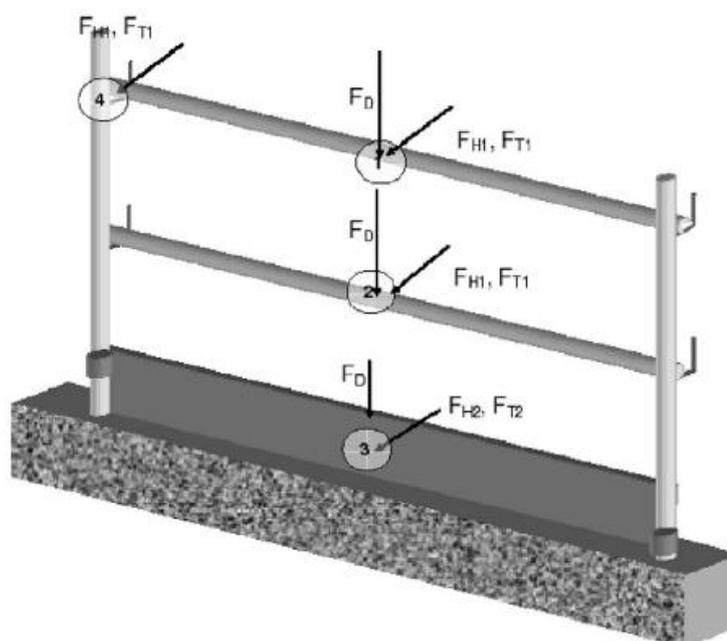
Fonte: GONZÁLEZ *et al.* (2011).

Após o dimensionamento da estrutura conforme citado, os autores analisaram três configurações diferentes de estrutura de aço. A primeira, com travessões de seção circular com 25 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura e os montantes com seção circular de 40mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura. O segundo modelo, foi feito com travessões de seção circular de 40 mm e espessura de 1,5 mm e montantes de seção quadrada de 35 mm e espessura de 1,5 mm. Para o terceiro modelo, foi utilizado tanto para travessões, como para montantes, seção circular de 40 mm e espessura de 2 mm. Nos três modelos, os montantes se distanciaram 2,40 m e com uma altura de 1 m. Para o rodapé, eles utilizaram uma placa de aço formada a frio (GONZÁLEZ et al., 2011).

Os ensaios experimentais foram realizados conforme a metodologia de ensaio definida na EN 13374:2004, para sistemas classificados como classe A, segundo a norma de referência. Com isso, foram realizados apenas ensaios estáticos, a metodologia adotada é a mesma que a descrita neste trabalho no item 2.4.1.1 (GONZÁLEZ et al., 2011).

González et al. (2011) utilizaram um pórtico para que fosse possível a aplicação das cargas na horizontal e vertical, conforme indica a Figura 26, os deslocamentos foram obtidos a partir de um sistema de aquisição de dados e software. Nesse trabalho, não fica claro se as cargas são aplicadas de forma simultânea nos elementos ou de forma individual.

Figura 26: Esquema de aplicação de cargas



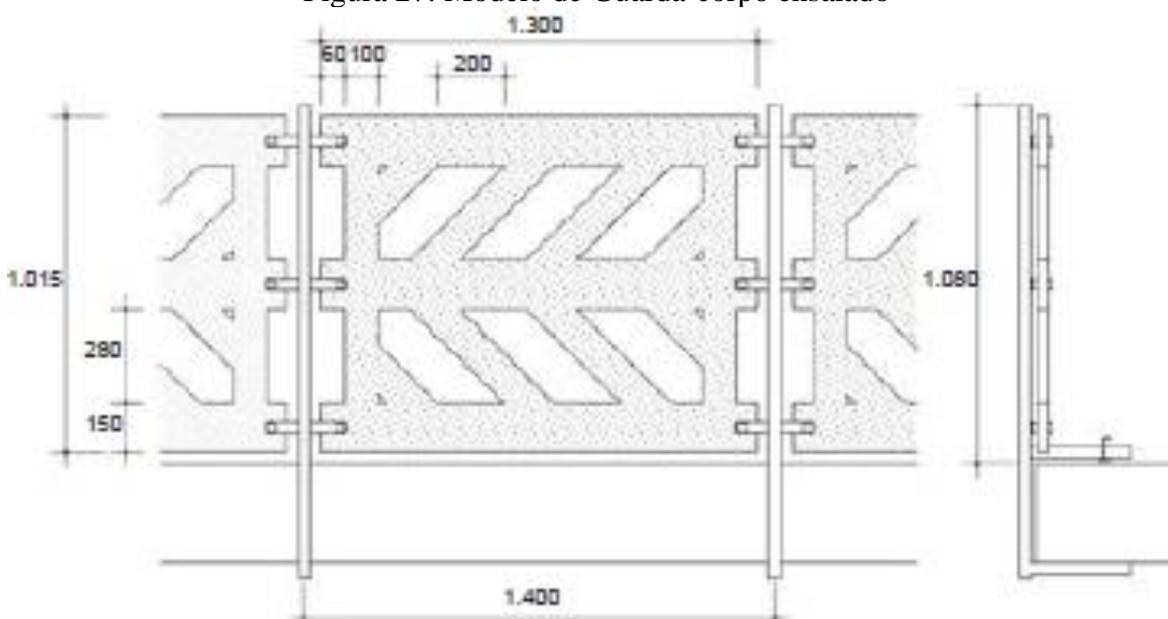
Fonte: González et al. (2011).

Os resultados encontrados pelos autores para o cumprimento da norma EN 13374, requisitos analíticos e experimentais apontam que, para o primeiro sistema, usualmente utilizados nas obras da Espanha, não se observou o cumprimento de ambos os requisitos. No segundo sistema, o montante excedeu os requisitos de resistência da norma analiticamente, mas não experimentalmente. O terceiro sistema, atende aos requisitos, em ambas as análises (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

González *et al.* (2013), em outro trabalho realizado com guarda-corpos, analisaram o comportamento de estruturas de guarda-corpos com material de polietileno de alta densidade, com adição de fibra de vidro, sob cargas estáticas e de impacto, como método de ensaios que utilizaram a EN 13374:2004.

A geometria do modelo baseou-se em três travessões com 15 cm de altura, dois elementos verticais nas laterais e elementos intermediários na diagonal, os montantes instalados em aço com 108 cm de altura, seção circular de 35 mm e espessura de 1,5 mm distanciados a 140 m, conforme Figura 27 (GONZÁLEZ *et al.*, 2013).

Figura 27: Modelo de Guarda-corpo ensaiado



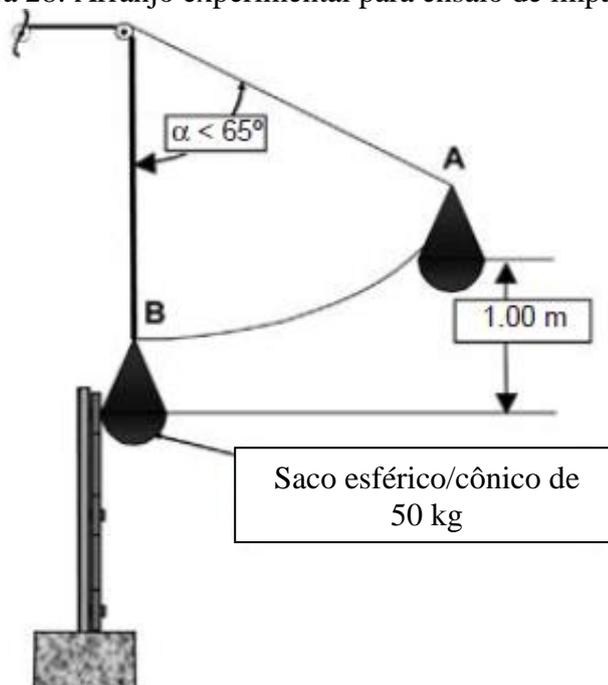
Fonte: González *et al.* (2013).

A metodologia dos ensaios adotada para o trabalho foi segundo a UNE-EN 13374, para sistemas de classe A e B. Os ensaios estáticos seguiram a metodologia descrita no item 2.4.1.1 e os ensaios de impacto foram realizados conforme item 2.4.2.1. O arranjo experimental adotado pelos autores para o ensaio de impacto com 500 J no topo da estrutura é indicado na Figura 28.

Os autores ressaltaram que o material utilizado se mostrou mais adequado do que a estrutura de aço e de madeira, no caso de solicitações tanto estáticas como dinâmicas, os sistemas suportaram os ensaios realizados, porém, ultrapassaram os valores de deslocamentos limites definidos na norma EN 13374. A adição de fibra de vidro aumenta consideravelmente o módulo de elasticidade e tensão de ruptura do material composto para o carregamento estático, menores coeficientes de fluência e maior resistência a impacto (GONZÁLEZ *et al.*, 2013).

O foco do trabalho dos autores citados era analisar o material de polietileno de alta densidade, com adição de fibra de vidro. Com isso, eles não se detiveram a detalhes de metodologia de ensaios.

Figura 28: Arranjo experimental para ensaio de impacto



Fonte: Adaptado de González *et al.* (2013).

Nos estudos realizados por González *et al.* (2011) e González *et al.* (2013), destaca-se a importância da resistência do material utilizado, assim como o dimensionamento das estruturas. O atendimento dos requisitos variou nas estruturas de aço, conforme os perfis utilizados e a estrutura de polietileno de alta densidade, com adição de fibra de vidro, mesmo ultrapassando os deslocamentos limites definidos na norma EN 13374, mostrou-se adequado pelo seu maior o módulo de elasticidade e tensão de ruptura do material.

No Brasil, tem-se registro do estudo de Costella *et al.* (2014), o qual traz ensaios do sistema de guarda-corpos de acordo com a NR18 e a NBR 14718:2001 – Guarda-corpos para edificação, com cargas estáticas de 800 N, conforme NBR 6120:1980, e 1500 N, conforme a RTP 01; e as cargas dinâmicas de 700 Joules. Os ensaios foram realizados em cinco obras do município de Chapecó-SC.

No total, os autores ensaiaram oito guarda-corpos com diferentes configurações, sendo, basicamente, de madeira e alguns com montantes de aço ou travessões pregados diretamente na estrutura da obra. As características de instalação dos guarda-corpos ensaiados são apresentadas no Quadro 7 (COSTELLA *et al.*, 2014).

Quadro 7: Características construtivas dos guarda-corpos

Ensaio	Travessão		Montante		Fixação do Guarda-corpo	
	Material	Fixação	Material	Fixação	Esquerda	Direita
1	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Escoras 7 cm	Pregado	Continuação do guarda-corpo	Continuação do guarda-corpo
2	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Madeira 2,5 cm - Mão Francesa	Pregado	Continuação do guarda-corpo	Pilar
3	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Sem montante		Pregado em tabuas fixadas entre vigas	
4	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Metálico	Encaixe de pressão	Livre	Continuação do guarda-corpo
5	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Barrotes de madeira 6,5 cm x 6,5 cm	Agulhas presas na viga	Livre	Livre
6	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Metálico	Caixaria das vigas	Pilar	Continuação do guarda-corpo
7	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Sem montante		Alvenaria	Alvenaria
8	Madeira 2,5 cm Pinheiro	Pregado	Metálico	Parafusado no piso	Livre	Livre

Fonte: Adaptado de Costella et al. (2014).

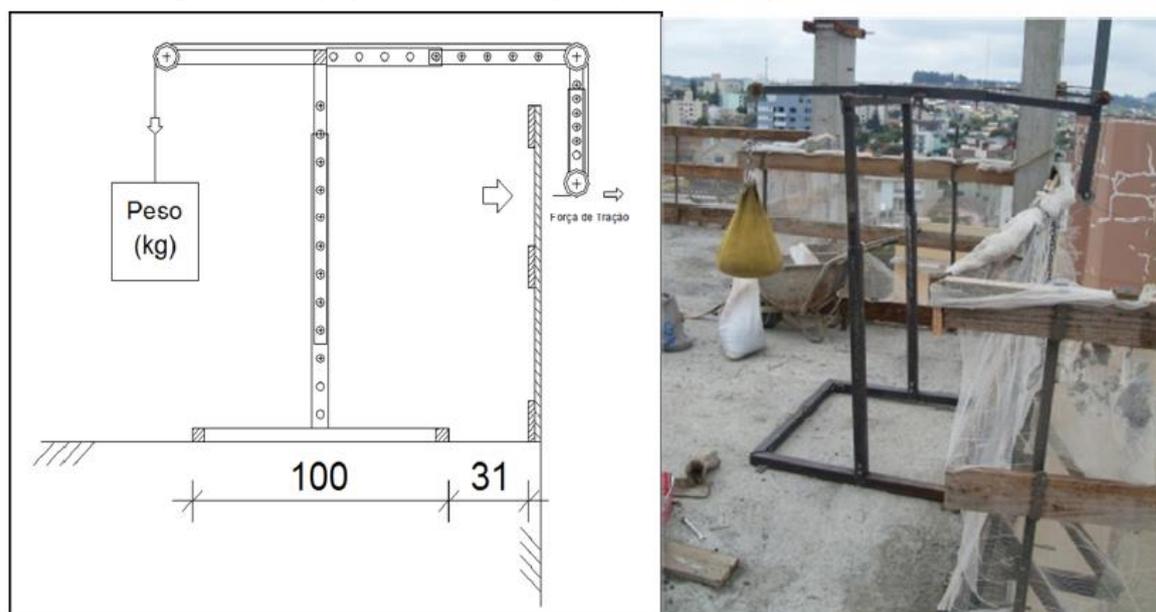
Para a realização dos ensaios, os autores criaram um pórtico que pudesse ser utilizado tanto nos ensaios estáticos como nos ensaios dinâmicos e ainda que fosse possível transportar entre as diferentes obras do município (COSTELLA *et al.*, 2014).

Para os ensaios estáticos, foram instalados relógios comparadores para leitura dos deslocamentos e retirados os valores desses após 15 minutos da aplicação da carga. Foi

verificado o deslocamento residual com a leitura dos deslocamentos após 5 minutos de alívio da carga, conforme orienta a NBR 14718:2001 (COSTELLA *et al.*, 2014).

A Figura 29 demonstra o equipamento utilizado pelos autores e o arranjo experimental adotado para os ensaios estáticos (COSTELLA *et al.*, 2014).

Figura 29: Equipamento e arranjo experimental para ensaio estático



Fonte: Costella *et al.* (2014).

Os critérios de aceitação para o ensaio estático adotado pelos autores, segundo a NBR 14718:2001 são: a estrutura não deve apresentar ruptura, afrouxamento ou destacamento de qualquer de seus componentes e elementos de fixação, o deslocamento inferior a $L/250$ e o deslocamento residual limitado a $L/1000$ ou 3 mm, sendo L o vão considerado para o ensaio (COSTELLA *et al.*, 2014).

Segundo ensaios realizados por Costella *et al.* (2014), foi utilizado um saco em couro com capacidade de 100 kg de chumbo em pó para aplicação do impacto na estrutura. Esse teste ocorreu elevando o saco de couro a uma altura de 0,7 m e soltando-o até o ponto de aplicação do impacto, no travessão intermediário. A Figura 30 demonstra o equipamento utilizado pelos autores e o arranjo experimental adotado para os ensaios de impacto.

Para o ensaio de impacto, a avaliação da estrutura foi realizada de forma visual, considerando os critérios de aceitação exigidos pela NBR 14718, quais sejam: não ocorrência de ruptura, destacamento das fixações, queda de painel ou de perfis e caso ocorra alguma queda de painel ou componente esse não deve fornecer risco ao trabalhador. São

conclusão foi de que os guarda-corpos construídos sobre as escoras metálicas são seguros e cumprem o código S-2.1, r.4.

Com foco em estruturas de escoras metálicas, para esse trabalho, os autores apresentam que o uso das estruturas analisadas é seguro, cumprindo o código do *Quebec*, diferente da conclusão do trabalho em estruturas de madeira realizado anteriormente em 2009.

González *et al.* (2015), em seus estudos, ensaiaram sete estruturas de guarda-corpos, dimensionados pela EN 13374, com montantes espaçados a 2400 mm e uma altura de 1000 mm, com montantes de aço de seções tubulares de 40 mm x 1,25 mm e 30 mm x 1,5 mm e para travessões de aço com seção tubular de 25 mm x 1,5 mm e de madeira com seções de 150 mm x 22 mm e 150 mm x 27 mm, com as estruturas ancoradas diretamente no concreto.

Os ensaios estáticos foram realizados conforme metodologia determinada pela EN-13374, aplicando, inicialmente, os 0,30 kN, posteriormente, majorando as cargas com um coeficiente de 1,5 γ_F para todas as cargas e coeficiente γ_M do material, que é $\gamma_M = 1,1$ no caso de estruturas de aço e $\gamma_M = 1,3$ para a madeira. Com isso, as cargas aplicadas no caso de um ensaio de estrutura de aço são apresentadas na Equação 3:

$$F_H = 0,30 \times 1,5 \times 1,1 = 0,5 \text{ kN} \quad (3)$$

Enquanto no caso de uma estrutura de madeira são demonstradas na Equação 4:

$$F_H = 0,30 \times 1,5 \times 1,3 = 0,6 \text{ kN} \quad (4)$$

O sistema também foi carregado para uma carga acidental vertical de 1,25 kN. A Figura 31 demonstra o ensaio estático realizado, com o ponto de aplicação da carga estática e deslocamento da estrutura.

O ensaio de impacto consistiu na aplicação de um impacto de 180 J no topo dos travessões e dos montantes a uma velocidade de 2 m/s. O impacto foi gerado por meio de uma bola esférica de 500 N a uma altura de 0,36 m, conforme demonstra a Figura 32.

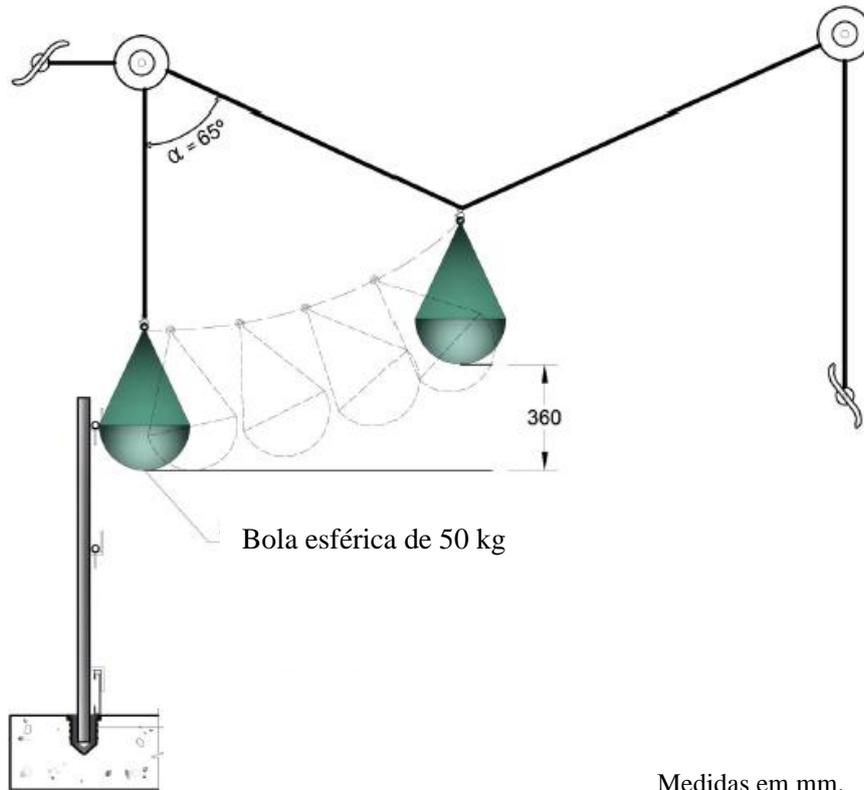
Após o impacto, os elementos foram verificados visualmente para detectar qualquer falha ou ruptura e foram colocados em uma mesa para medir qualquer deformação permanente.

Figura 31: Ponto de aplicação da força e deslocamento no ensaio estático



Fonte: Adaptado de González et al. (2015).

Figura 32: Arranjo experimental ensaio de impacto



Fonte: Adaptado de González et al. (2015).

Os resultados dos ensaios estáticos, para o sistema de guarda-corpo de aço, o travessão tubular de 25 mm x 1,5 mm a uma carga estática de 0,3 kN gerou um deslocamento de 66,67 mm e carga de 0,5 kN; o deslocamento foi de 138,24 mm, houve a ruptura do sistema com a aplicação de 0,57 kN, para o travessão de aço tubular de 40 mm x 1,5 mm, os deslocamentos foram em torno de 27,81 mm para a carga de 0,3 kN e 47,76 mm para a carga de 0,5 kN, com resistência à ruptura maior que 0,60 kN (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

Para as estruturas de madeiras para dois tipos de classificação da madeira, o perfil 150 mm x 22 mm apresentou deslocamentos entre 93,69 mm e 101,69 mm para a carga de 0,3 kN; para a carga de 0,5 kN, os deslocamentos foram em torno de 202,98 mm a 227,98 mm. Ainda, para o perfil 150 mm x 27 mm, com três classificações da madeira, os deslocamentos para a carga de 0,3 kN foram em torno de 39,69 mm a 55,54 mm e, para a carga de 0,5 kN, os deslocamentos foram em torno de 81,98 mm a 111,83 mm. Para os sistemas de madeira, a resistência última foi maior que 0,72 kN (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

Os resultados dos ensaios de impacto de 180 J, com um sólido de 50 kg com altura de impacto de 0,36 m a 2 m/s, embora tenham se comportado de maneiras diferentes, todos os sistemas resistiram. O guarda-corpo de travessão de aço tubular de 25 mm x 1,5 mm gerou deslocamentos excessivos de 115,01 mm e sofreu deformações plásticas. Os outros sistemas não obtiveram deformações plásticas (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

Os resultados obtidos com os sistemas de guarda-corpos demonstram que as estruturas são capazes de atender a requisitos de impacto de 180 J, mas que, em alguns casos, não atenderam aos requisitos estáticos da EN 13374, considerando que esses são mais exigentes do que o impacto de 180 J em todos os sistemas estudados (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

Os autores ainda acreditam que o saco usado no ensaio absorve menos o impacto do que o corpo humano, sendo que as estruturas são mais carregadas nos ensaios do que em um caso real de queda e argumentam que o ideal seria a modificação do sistema de ensaio que permitisse simular melhor a queda de uma pessoa (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

Escamilla, García e Perez (2016) ensaiaram diferentes materiais em estruturas de guarda-corpos provisórios, com os requisitos da norma EN 13374 para classe A, para os ensaios estáticos no ELS e no ELU e após compararam com um ensaio de impacto de 180 J. O trabalho trata-se basicamente da comparação das estruturas já apresentadas nos estudos de González *et al.* (2011), González *et al.*, (2013) e González *et al.* (2015).

As estruturas ensaiadas pelos autores e os resultados foram os mesmos apresentados em aço pelos autores González *et al.* (2011), em polietileno conforme González *et al.*, (2013) e em madeira com a geometria conforme González *et al.* (2015) (ESCAMILLA; GARCÍA; PEREZ, 2016).

Como conclusões dos ensaios para o ELS, os autores afirmam que nem todos os sistemas atenderam aos requisitos da EN 13374 de deslocamentos limites inferiores a 55 mm, sendo esse um requisito mais exigente. Nos sistemas de aço, com travessões tubulares de 25 mm x 1,5 mm, os deslocamentos foram em torno de 66,7 mm. Em relação às estruturas em polietileno, essas apresentaram grandes deslocamentos, bem acima dos 55 mm permitidos. Em relação às estruturas com travessão em madeira, a espessura de 30 mm foi a única que não excedeu os deslocamentos limites com as diferentes classificações de madeira (ESCAMILLA; GARCÍA; PEREZ, 2016).

Para os ensaios no ELU, as estruturas atenderam aos requisitos da EN 13374, porém, com comportamento bem diferenciados. Segundo os autores, o valor da energia absorvida nos ensaios permanece bem abaixo de 180 J, o que significa que os ensaios estáticos podem não ser capazes de reter o impacto de um trabalhador em torno de 80 kg a 90 kg a uma velocidade de 2 m/s (requisito considerado para o impacto de 180 J) (ESCAMILLA; GARCÍA; PEREZ, 2016).

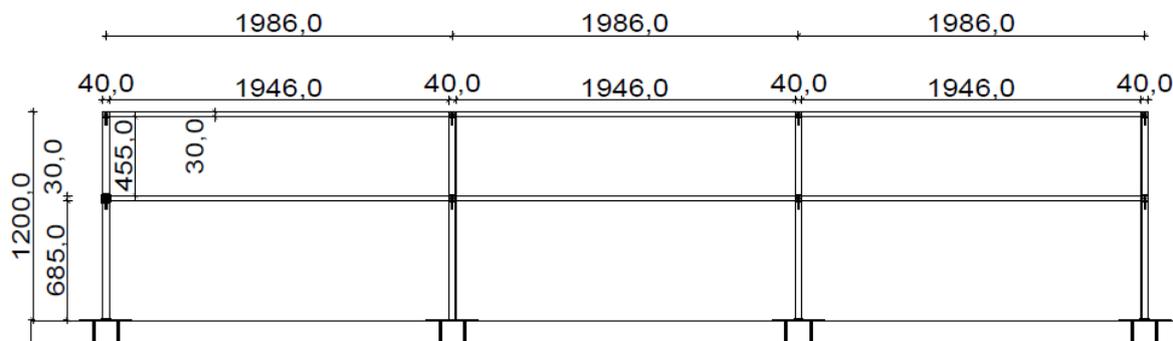
Novamente, os estudos realizados por González *et al.* (2015) e Escamilla, García e Perez (2016) destacam a importância da resistência do material utilizado, assim como o dimensionamento das estruturas. O atendimento dos requisitos variou nas estruturas de aço, conforme os perfis utilizados, de madeira, e, na estrutura de polietileno de alta densidade, com adição de fibra de vidro e, também, no carregamento estático e de impacto, resistindo ao impacto de 180 J em algumas situações e não resistindo à carga estática.

Baruffi (2017) realizou análise numérica com o Método dos Elemento Finitos (M.E.F.) e ensaios experimentais estáticos e de impacto em estruturas de aço e de madeira dimensionadas, conforme cargas definidas na NR 18 (2015) e RTP 01 (2003).

Para os modelos em aço, o dimensionamento foi realizado conforme critérios NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios e pela NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, os montantes de seção com perfil retangular 100 mm x 40 mm x 2mm e travessões de 50x30x2mm, sendo os montantes espaçados a 1986 mm, Figura 33 e Figura 34. O material

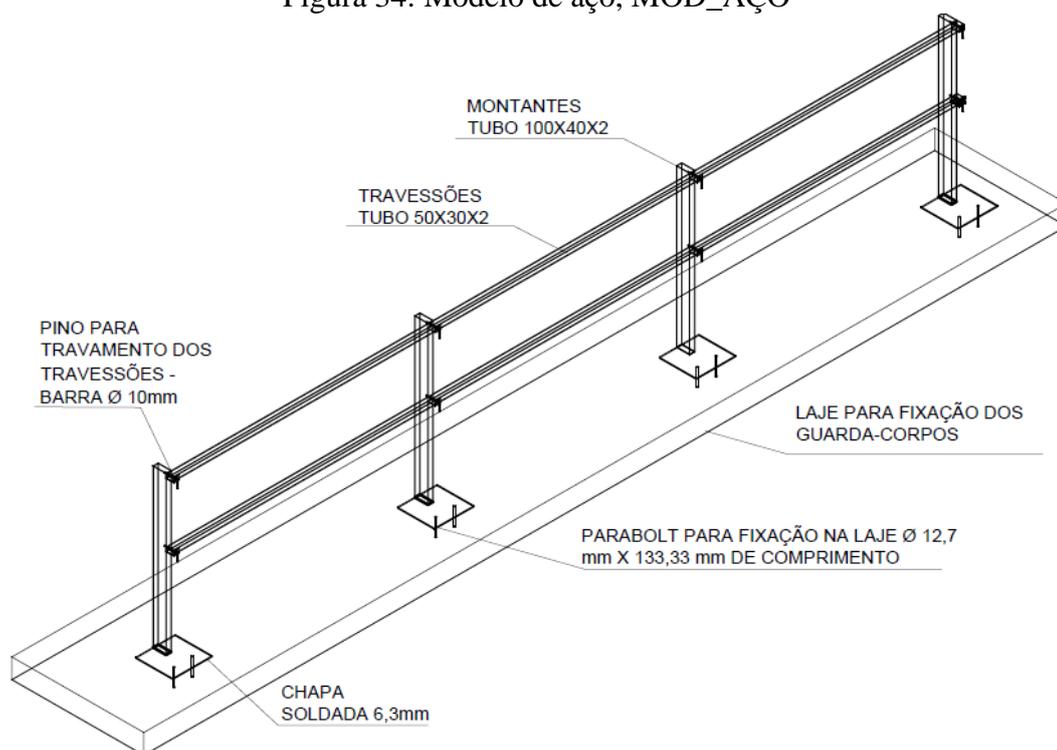
foi caracterizado como aço de construção mecânica carbono SAE 1005 com um módulo de elasticidade médio de 188,26 GPa (BARUFFI, 2017).

Figura 33: Modelo de aço, MOD_AÇO



Fonte: Baruffi (2017).

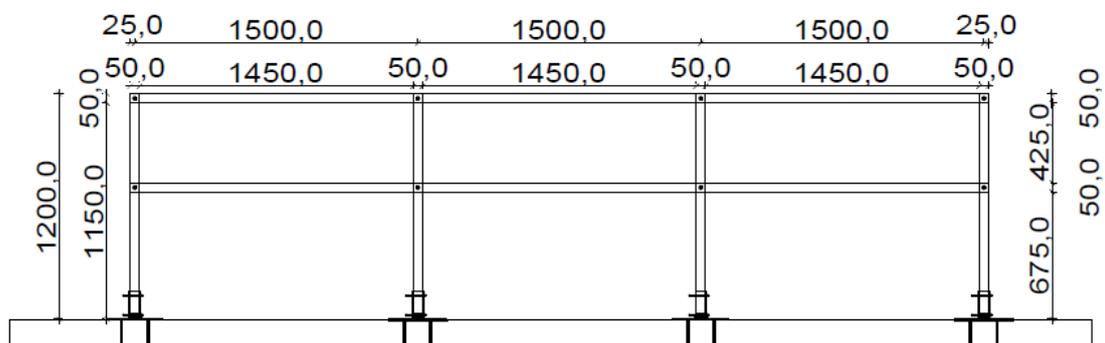
Figura 34: Modelo de aço, MOD_AÇO



Fonte: Baruffi (2017).

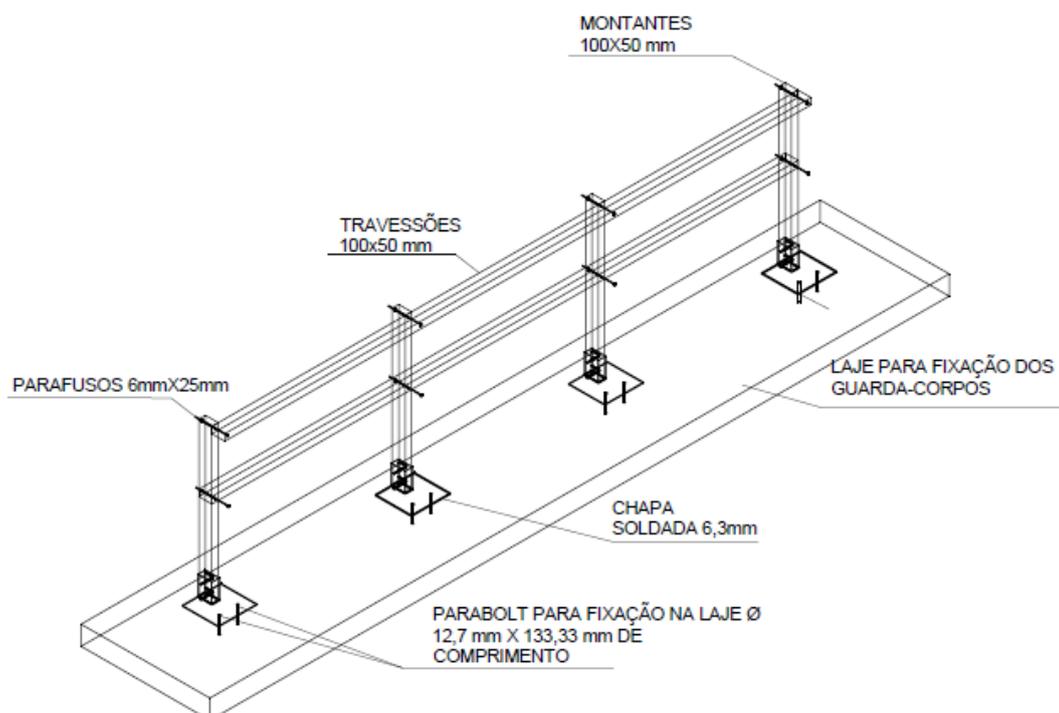
Para os modelos em madeira, foi realizado o dimensionado pela NBR 7190 (ABNT, 1997), com montantes e travessões de seção retangular de 100 mm x 50 mm, sendo os montantes espaçados a 1500 mm, Figura 35 e Figura 36. O material foi classificado como dicotiledônea/folhosa, com classe C20, com módulo de elasticidade médio de 11075,64 MPa (BARUFFI, 2017).

Figura 35: Modelo de madeira MOD_MAD



Fonte: Baruffi (2017).

Figura 36: Modelo de madeira MOD_MAD



Fonte: Baruffi (2017).

Inicialmente, o estudo contou com uma pesquisa da verificação de massa e altura dos trabalhadores da construção civil no município de Passo Fundo – RS. Nesse estudo, a autora concluiu que, na média, os trabalhadores apresentaram massa de 79,93 kg, altura de 1,71 m, idade de 39,82 anos, sendo que todos os funcionários são do sexo masculino (BARUFFI, 2017).

Os modelos numéricos foram realizados com aplicação de carga estática de uma pré-carga definida no método de ensaio do esforço estático horizontal da NBR 14718 de 200

N/m, aplicando na estrutura MOD_AÇO o valor de 400 N e 300 N para a estrutura MOD_MAD (BARUFFI, 2017).

Também foram aplicadas as cargas de 770 N, definidas a partir da pesquisa de pesos e massas realizada no município de Passo Fundo – RS. O carregamento de 1000 N também foi aplicado, considerando a carga definida pela NBR 15836 – Equipamento de proteção individual contra queda de altura – Cinturão de segurança tipo paraquedista, que determina o uso de um manequim de 100 kg para o ensaio de cinturões tipo paraquedista. Para trabalho em altura, considerou-se que o cinto de segurança será utilizado em fases da obra em que o guarda-corpo não esteja disponível e que os dois sistemas tenham a função de proteger o trabalhador contra quedas de altura, sendo utilizados pelos mesmos trabalhadores; ainda 3000 N para o MOD_AÇO e 2250 N para o MOD_MAD, considerando a carga definida pela NR 18 e RTP 01 de 1500 N/m (BARUFFI, 2017).

Para a análise numérica de impacto, foi considerado o choque do corpo rígido contra a estrutura de guarda-corpo, com massa gerada pelo sólido de, aproximadamente, 77 kg e 100 kg, simulando a queda de um trabalhador contra a estrutura de guarda-corpos provisórios. A distância de impacto foi 203,8 mm, considerando uma velocidade de impacto de 2 m/s (BARUFFI, 2017).

Os ensaios estáticos foram ensaiados conforme procedimento de ensaio definido na NBR 14718 para estruturas de guarda-corpos definitivos, visto que no Brasil não continham orientações de ensaios para as estruturas provisórias. E ainda foram realizados ensaios estáticos instantâneos nas estruturas. Da mesma forma que os modelos numéricos, foram realizados ensaios de impacto com sólido de, aproximadamente, 77 kg e distância de impacto de 203,8 mm, sendo que não foi possível alcançar a massa de 100 kg com o saco de testes utilizado (BARUFFI, 2017).

Como principais conclusões do estudo, Baruffi (2017) apresenta que as normas têm requisitos geométricos similares, divergindo no critério de aplicação de cargas. Considera-se adequada a modelagem numérica realizada no trabalho.

Quanto à avaliação dos deslocamentos observados nos modelos numéricos, avalia-se que para a carga de 1500 N/m, as estruturas não atenderam os requisitos da NBR 14718, inclusive com essa carga superando as exigências de um impacto de uma massa de 77 kg, a uma distância de 20,38 cm a uma velocidade de 2 m/s na estrutura (BARUFFI, 2017).

Quanto aos ensaios experimentais, Baruffi (2017) considera que a metodologia definida pela NBR 14718 não é adequada para a avaliação de estruturas provisórias,

considerando imprescindível a elaboração de um método de ensaio adequado para as estruturas provisórias.

Avaliando os ensaios experimentais realizados, a autora conclui que o guarda-corpo de aço não atende aos requisitos da NBR 14718 para o carregamento de 1500 N/m. A estrutura de madeira ultrapassou os limites da NBR 14718 para todos os carregamentos, no ensaio estático, segundo a NBR 14718 e ultrapassou, também, os deslocamentos limites para o carregamento de 1500 N/m para o ensaio estático instantâneo. Avalia, ainda, que as estruturas foram projetadas para tais carregamentos e que os deslocamentos gerados foram devidos à movimentação e folgas da estrutura como um todo, sendo que, visualmente, nem no ensaio estático e nem no ensaio de impacto, houve ruptura do sistema ou de seus componentes, sendo capazes de absorver um impacto de uma queda sem nenhuma ruptura local ou global do sistema (BARUFFI, 2017).

Por fim, Baruffi (2017) indica ser necessário orientação por normas regulamentadoras (NRs) e de referência da ABNT, com método de ensaio específico para guarda-corpos para provisórios para a construção civil.

O trabalho de Baruffi (2017) deu origem ao trabalho apresentado que busca propor uma metodologia de ensaio para aplicação no Brasil que busca contemplar ações representativas e limites de deformações aceitáveis a estruturas.

Zlatar *et al.* (2019) realizaram um estudo sobre quedas de altura para identificar as atividades em que as quedas ocorrem, análise de consequências, relacionando com a altura de queda e análise de gerenciamento de riscos para minimizar ou eliminar os riscos à segurança nas atividades desenvolvidas em situação de queda.

O estudo contou, inicialmente, com 386 estudos, após análise e exclusões restaram 114 casos que foram objeto da análise. Os dados coletados foram publicados *no Safety & Health Practitioner National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) (ZLATAR *et al.*, 2019).

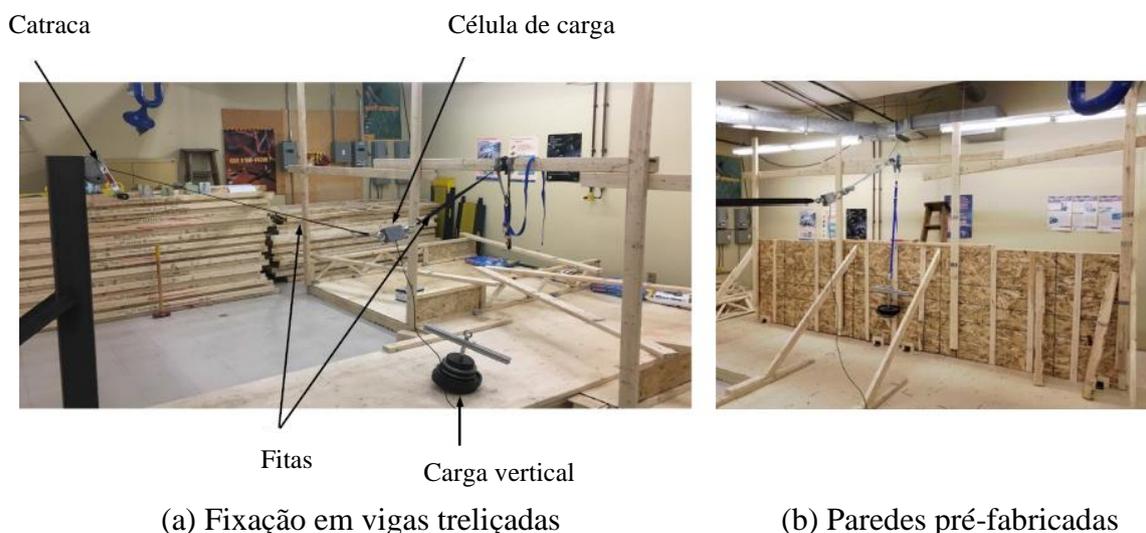
Zlatar *et al.* (2019) concluem que quedas de altura é um fator de risco, gerando mortes e acidentes de trabalho não fatais. Que dos casos analisados, 45,6% das quedas em alturas ocorreram entre 3 e 6,1 metros e em 49,1% foram em andaimes ou telhados, indicando o alto índice desses eventos na construção civil. Em relação às consequências geradas, caso a pessoa caia com a cabeça e sofra um traumatismo craniano, há maior probabilidade de morte e um índice de sobrevivência próximo a 55%, variando conforme a massa da pessoa e o material sobre qual ela venha a cair. Quanto ao gerenciamento de riscos, foram considerados

como inadequados e/ou como falhas em 65,8% os guarda-corpos, corrimãos, barreiras e proteção de arestas, que são os sistemas de proteção provisórios contra quedas.

Ressalta-se a importância da adoção de medidas para trabalho em altura e a necessidade de estruturas capazes de impedir uma queda acidental e garantir a segurança dos trabalhadores na construção civil.

Galy e Lan (2020) compararam as normativas norte-americanas quanto a estruturas provisórias de guarda-corpos e realizaram ensaios experimentais, avaliando a resistência de sistemas de madeira, conforme dimensões definidas pelo *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1, r.4) apresentadas no item 2.3. Os guarda-corpos foram fixados em vigas treliças e paredes pré-fabricadas, construídos em laboratórios, conforme Figura 37, demonstrando o arranjo experimental adotado em cada situação. Observa-se que o arranjo experimental adotado pelos autores é similar ao adotado neste trabalho e apresentado no capítulo destinado a apresentar a metodologia.

Figura 37: Arranjo experimental ensaio estático

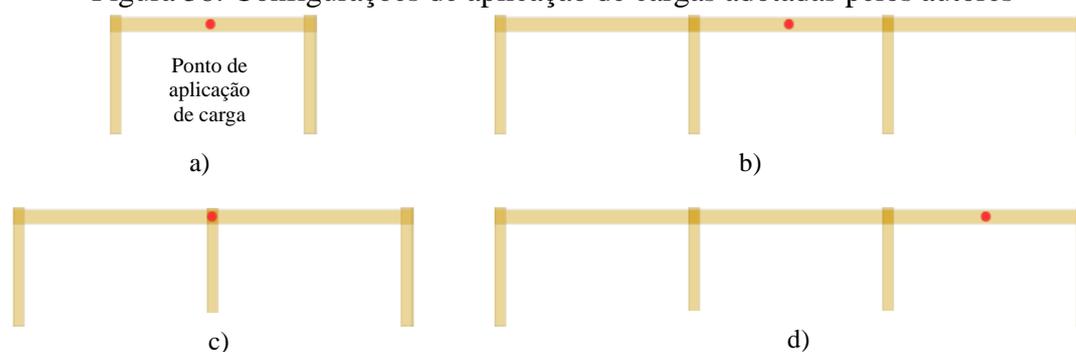


Fonte: Adaptado de Galy e Lan (2020).

Os ensaios estáticos seguiram a metodologia conforme *Safety Code for the Construction Industry in the Province of Québec* (S-2.1, r.4) e as cargas foram aplicadas de forma variada, conforme Figura 38, (a) no centro do travessão superior com dois montantes, (b) no centro do travessão superior com quatro montantes, (c) no topo do montante intermediário com a configuração de três montantes e um travessão e (d) no centro do travessão com quatro montantes, próximo ao montante da lateral (GALY; LAN, 2020).

Foram realizados 262 ensaios em vigas treliçadas, com diferentes configurações de altura das vigas, fixações dos guarda-corpos nas vigas e pontos de aplicação de carga. E em relação aos ensaios em paredes pré-fabricadas foram realizados 98 ensaios (GAL; LAN, 2020).

Figura 38: Configurações de aplicação de cargas adotadas pelos autores



Fonte: Adaptado de Galy e Lan (2020).

As conclusões do trabalho são de que a menor resistência quanto à configuração de aplicação de carga é conforme a Figura 38 (c). As situações com travessão superior contínuo, conforme Figura 38 (b) e (d) apresentaram as maiores resistências de carga e com um valor intermediário a estes a configuração conforme Figura 38 (a) (GALY; LAN, 2020).

Galy e Lan (2020) afirmam que quanto maior a altura do travessão superior menor será a resistência, pois, nesse caso, o braço de alavanca gera um momento fletor maior na base do montante. Orientam, com isso, que a altura do travessão seja a menor possível dentro das recomendações técnicas e, ainda, que a orientação do montante seja em relação à sua maior inércia, que a fixação dos elementos seja realizada com pregos e/ou parafusos mais compridos para aumentar a sua penetração na superfície a ser fixada.

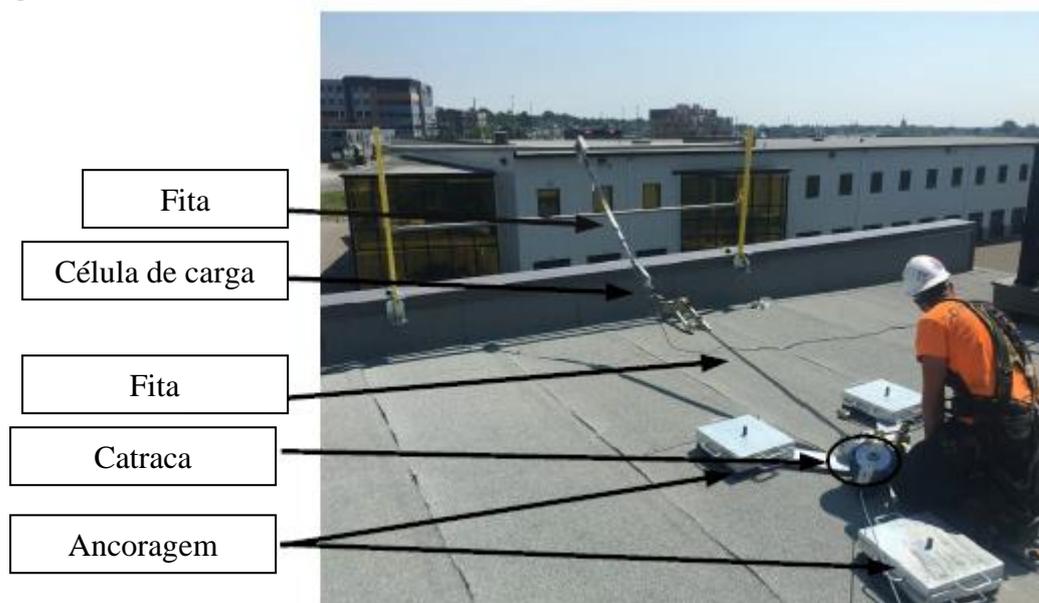
Quanto aos ensaios realizados para a fixação dos sistemas de proteção nas paredes pré-fabricadas não foi verificada a influência da altura desses nos resultados e indicam que mais estudos devem ser feitos para verificar a influência desse parâmetro na força medida (GALY; LAN, 2020).

Igualmente, os autores avaliam como limitações do estudo que o número de ensaios realizados foi relativamente baixo, três testes no mínimo, devido à grande variedade de acessório, tipos e configurações de teste (GALY; LAN, 2020).

Galy (2021) realizou ensaios em obras com guarda-corpos de aço instalados em periferias de telhados planos de edifícios existentes, considerando diferentes métodos de fixação dos montantes.

Na ocasião, Galy (2021) realizou 36 ensaios de resistência em guarda-corpos de aço, com parâmetros variáveis. Três configurações de guarda-corpos utilizadas na construção civil, fixadas em planos de um ou dois parapeitos, com placas horizontais de fixação parafusadas no parapeito, peça tubular em forma de L fixada no parapeito e braçadeira de parapeito fixada com parafusos na parte traseira; quatro parapeitos diferentes (tipo sanduíche e painel de isolamento) e três tipos de parafusos. O carregamento foi aplicado no centro de um vão, ou diretamente no montante vertical, o arranjo experimental adotado pelos autores para esse ensaio é apresentado na Figura 39. Observa-se que o arranjo experimental adotado pelos autores é similar ao adotado neste trabalho e apresentado no capítulo destinado a apresentar a metodologia.

Figura 39: Arranjo experimental para carregamento no centro do vão do travessão superior



Fonte: Adaptado de Galy (2021).

Os resultados mostram que, quando a fixação é realizada em apenas um plano do parapeito, a força máxima alcançada é abaixo do requisito *Safety Code for Construction Industry (SCCI)*, ao aplicar a carga diretamente no montante. Porém, quando são usados dois planos do parapeito para prender o montante do guarda-corpo, a força máxima alcançada

está muito além do *SCCI*, seja carregamento aplicado no centro de um vão ou diretamente no montante.

Conclui, também, que nem todos os guarda-corpos podem ser instalados em todos os parapeitos, principalmente os de dimensões menores. Os resultados do teste não mostraram uma grande influência do tipo de parafuso, mas o número total de parafusos usados para a fixação das proteções deve respeitar os requisitos do fabricante.

A partir dos estudos analisados, observa-se a importância de definir um ensaio a ser utilizado para avaliar estruturas de guarda-corpos provisórios para garantir a segurança dos trabalhadores da construção civil aplicável às normas brasileiras.

Os ensaios experimentais apresentados na revisão de literatura variam conforme a normativa padrão utilizada e as necessidades regionais, sendo necessário considerar o que se torna aplicável a realidade nacional. Para isso, será apresentada a metodologia adotada para considerar a proposta de ensaios estáticos deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os materiais e métodos utilizados neste trabalho para propor uma metodologia de ensaio experimental, aplicável no Brasil, para estruturas do tipo guarda-corpo e rodapé.

Por meio da avaliação de métodos de ensaios utilizados em estudos para as estruturas e determinados em normas internacionais, são realizados ensaios experimentais conforme as normas, EN 13374:2013 e AS/NZS 4994.1:2009, que apresentam metodologia de ensaio definidas.

Os ensaios realizados se basearam na avaliação de estado limite de serviço. As estruturas utilizadas na pesquisa foram doadas por construtoras locais, havendo poucos protótipos para a realização dos ensaios. Nesse caso, optou-se por não levar as estruturas à ruptura e trabalhar apenas com deslocamentos limites.

A partir das observações realizadas nesses dois ensaios, é proposto um método de ensaio padrão. O método de ensaio padrão foi aplicado para os carregamentos indicados pelas normas OSHA 1926.502 e código do Québec S-2.1, r.4. Após essa etapa, foram propostos dois ensaios estáticos para aplicação no Brasil, conforme a orientação das cargas exigidas pela norma NR 18, versão 2018 juntamente com a RTP 01, versão vigente, e ainda, versão 2020, com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022.

As metodologias utilizadas para os ensaios, instrumentação utilizada e arranjo experimental adotado variaram conforme a necessidade de aplicação de carga, horizontal, vertical e/ou simultâneas e os critérios de aceitação são considerados a partir da análise de requisitos mais exigentes das normativas.

Os ensaios foram realizados em área externa de laboratório, constando com uma pista de ensaio de concreto armado com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 MPa, simulando uma laje em que a estrutura é fixada em obras.

Para a montagem das estruturas, buscou-se reproduzir a instalação dos protótipos conforme ocorre em obras da construção civil e determinado no projeto estrutural. A seguir, são apresentados os modelos utilizados nos ensaios, com detalhes construtivos e resistências mecânicas avaliadas a partir de ensaios.

3.1 Modelos analisados

Os modelos dos ensaios experimentais referem-se a modelos em uso em obras do município de Passo Fundo – RS, doados para ensaios pelas construtoras, com projetos estruturais elaborados por Engenheiros, dimensionados para as cargas exigidas pela norma regulamentadora NR 18 em vigor e aprovados pelo órgão fiscalizador; dois modelos referente a montante e travessões de aço e outros dois que utilizam um montante em aço e travessão em madeira.

Os modelos com montante e travessão de aço têm uma grande aceitabilidade na construção civil pela facilidade de execução da alvenaria, que pelo seu formato em L, Figura 40, pode ser feita com a estrutura de guarda-corpos instalada para após a execução dessa, ser retirada a proteção das periferias, garantido a realização dos serviços de forma segura.

Para esse modelo, serão utilizadas 2 variações: uma variação com utilização de pinos para a fixação de travessões e rodapé, conforme apresentado na Figura 41, e outra sem a fixação por meio desses elementos. Os modelos foram doados por construtoras diferentes e são utilizados em obras no município de Passo Fundo - RS.

Para o desenvolvimento da pesquisa, a estrutura com pinos para a fixação dos travessões será chamada de modelo em aço com pinos (MOD_AÇO_PINOS) e a estrutura com os travessões somente apoiados nos suportes metálicos será chamada de modelo em aço (MOD_AÇO).

Figura 40: Detalhes construtivos do montante em formato de L, MOD_AÇO



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 41: Detalhes construtivos dos pinos para a fixação dos travessões e rodapé, MOD_AÇO_PINOS



Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 1 apresenta as dimensões dos perfis tubulares em mm, a tensão de escoamento média (f_y), tensão última média (f_u) e o respectivo coeficiente de variação obtidos em ensaio de tração do aço para os elementos de montantes do MOD_AÇO e do MOD_AÇO_PINOS e os elementos de travessões utilizados no ensaio.

Tabela 1: Propriedades mecânica dos modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS

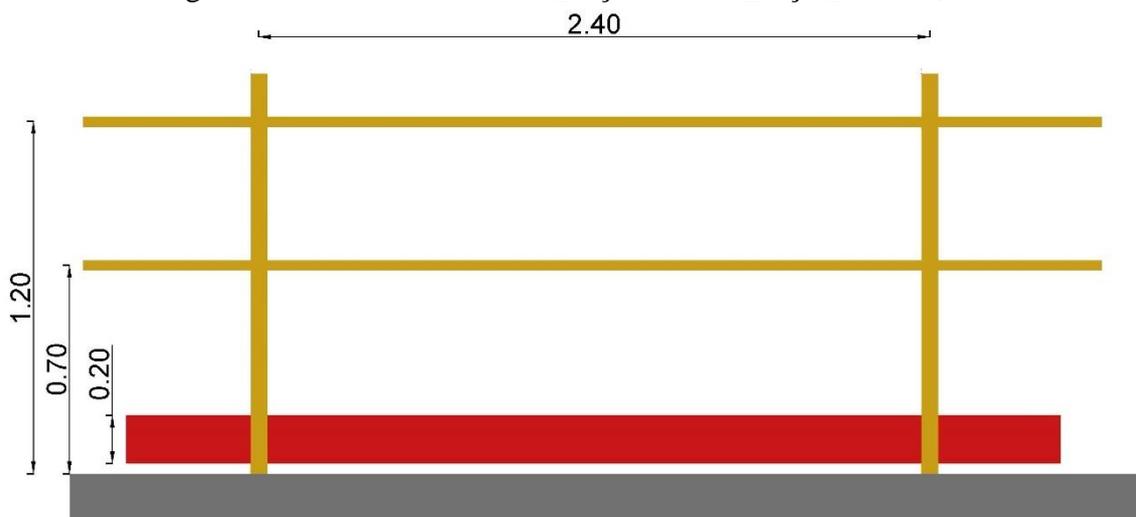
	Montantes MOD_AÇO	Montantes MOD_AÇO_PINOS	Travessões
Perfil (mm)	50x30x2,4	50x30x2,1	40x30x2,4
f_y (MPa)	368,20	414,17	417,98
Coeficiente de variação (%)	7,5	3,63	7,84
f_u (MPa)	426,06	490,12	461,66
Coeficiente de variação (%)	2,74	1,25	2,93

Fonte: Elaborado pela autora.

Ambos os modelos apresentam os montantes espaçados a 2,4 m, conforme projeto utilizado em obras. A Figura 42 apresenta uma vista externa da montagem final, e a Figura 43

, o esquema de montagem da estrutura em periferias.

Figura 42: Vista externa MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, em m



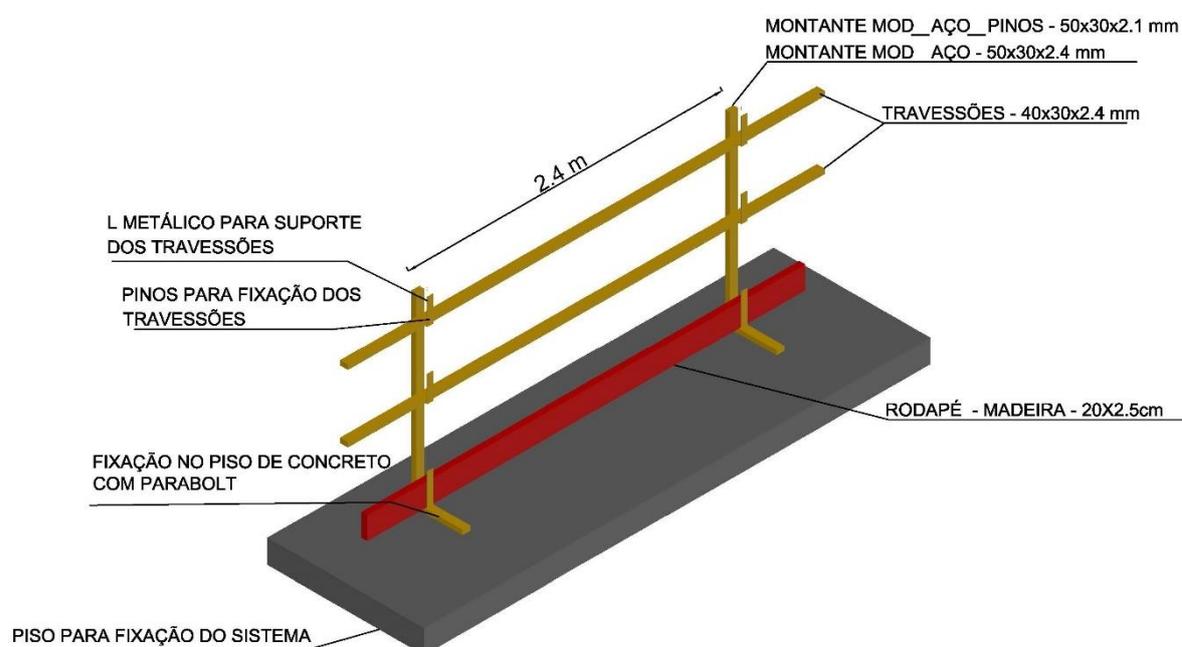
Fonte: Elaborado pela autora.

Nos modelos apresentados, a altura média dos guarda-corpos atendia à exigência da NR 18 de 1,20 m, porém, cada sistema apresentou uma altura, sendo 1,20 m para o

MOD_AÇO_PINOS e 1,25 m para o MOD_AÇO, essa diferença se deve ao fato de que alguns projetistas consideram a indicação da norma como sendo o centro do travessão superior e outros que a altura final tenha 1,20 m.

O rodapé utilizado nos modelos, MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, foi em madeira. Foram realizados os ensaios com madeira vendida comercialmente com o padrão utilizado nas obras da construção civil. As espécies consideradas foram de *Eucalyptus Citriodora Hooke* e com madeira de *Pinus Elliottii*. A dimensão do elemento de rodapé era de 20 cm x 2,5 cm, os projetos foram elaborados considerando a RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003) que indica uma altura mínima do elemento de 20 cm.

Figura 43: Esquema de montagem do MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS em periferias



Fonte: Elaborado pela autora.

O segundo modelo refere-se a um montante em forma de mão-francesa em aço com perfil cantoneira de 33 mm x 33 mm x 3,15 mm, conforme Figura 44 e elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé em madeira. Em ensaio de tração do aço foi determinado os valores de resistência média ao escoamento (f_y) e tensão última de (f_u), com os coeficientes de variação para o elemento de montante do tipo mão francesa, apresentados na Tabela 2.

Figura 44: Detalhes construtivos do montante em formato de mão-francesa



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 2: Propriedades mecânica dos montantes mão-francesa

Perfil cantoneira (mm)	33x33x3,15
f_y (MPa)	319,72
Coefficiente de variação (%)	5,41
f_u (MPa)	472,76
Coefficiente de variação (%)	0,44

Fonte: Elaborado pela autora.

Os montantes para esse modelo foram espaçados a uma distância de 1,5 m, conforme determinação da RTP 01 para estruturas de madeira. Com isso, os travessões desse projeto são em madeira de 15 cm x 2,5 cm (FUNDACENTRO, 2003).

Os elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé foram ensaiados com duas variações de madeiras tradicionalmente utilizadas na construção civil, uma combinação com madeira de *Eucalyptus Citriodora Hooke* e outra combinação com madeira de *Pinus Elliottii*.

Para o desenvolvimento da pesquisa, será chamada de modelo em madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC) e modelo em madeira de *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS).

Para determinar a resistência do material foi realizado ensaio de caracterização da madeira conforme orientações da NBR 7190:1997, determinando o valor de compressão paralela às fibras característica ($f_{c0,k}$) e o teor de umidade para as duas espécies adotadas nos modelos.

A Tabela 3 apresenta os resultados para a caracterização do material juntamente com a classificação adotada conforme NBR 7190 (ABNT, 1997) que para a espécie *Eucalyptus Citriodora*, podendo ser classificada com uma classe D20 das madeiras dicotiledôneas e para a madeira de *Pinus Elliottii* apresentou resistência inferior a classe C20 das madeiras coníferas.

Tabela 3: Propriedades mecânica dos travessões e rodapés em madeira

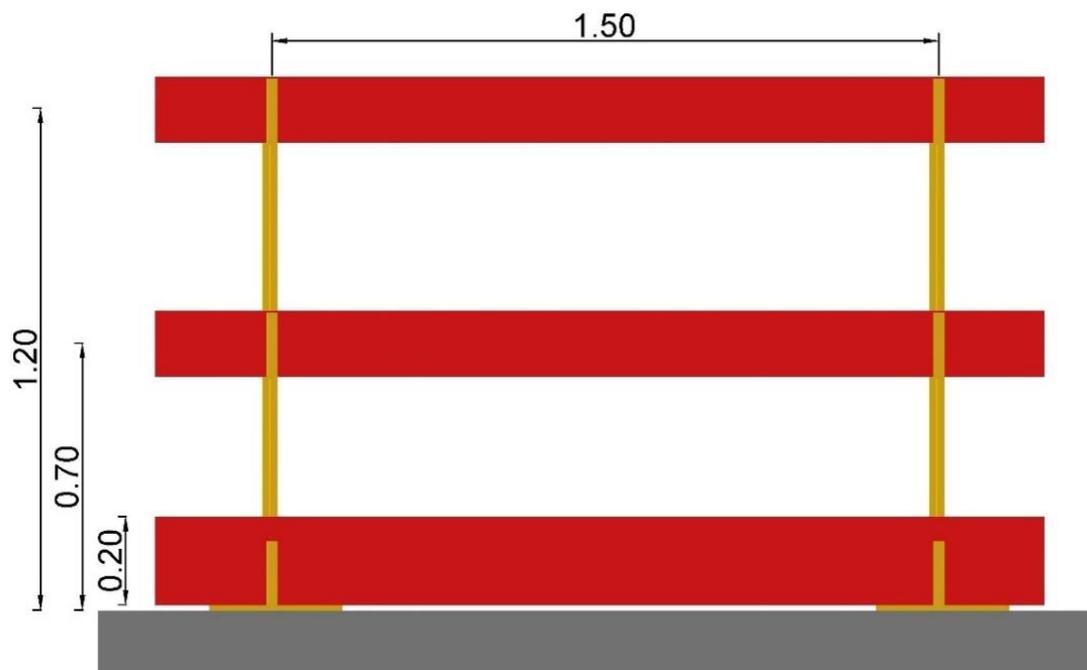
	Madeira: <i>Eucalyptus Citriodora</i>	Madeira: <i>Pinus Elliottii</i>
$f_{c0,k}$ (MPa)	22	15,1
Teor Umidade (%)	22,7	15,5
Classificação	Dicotiledôneas - D20	< Coníferas C20

Fonte: Elaborado pela autora.

Esse sistema apresentou uma altura média entre 1,21 m e 1,23 m, trata-se da diferença de considerações realizadas pelos projetistas com a indicação da NR 18 que o travessão superior deve ter altura de 1,20 m.

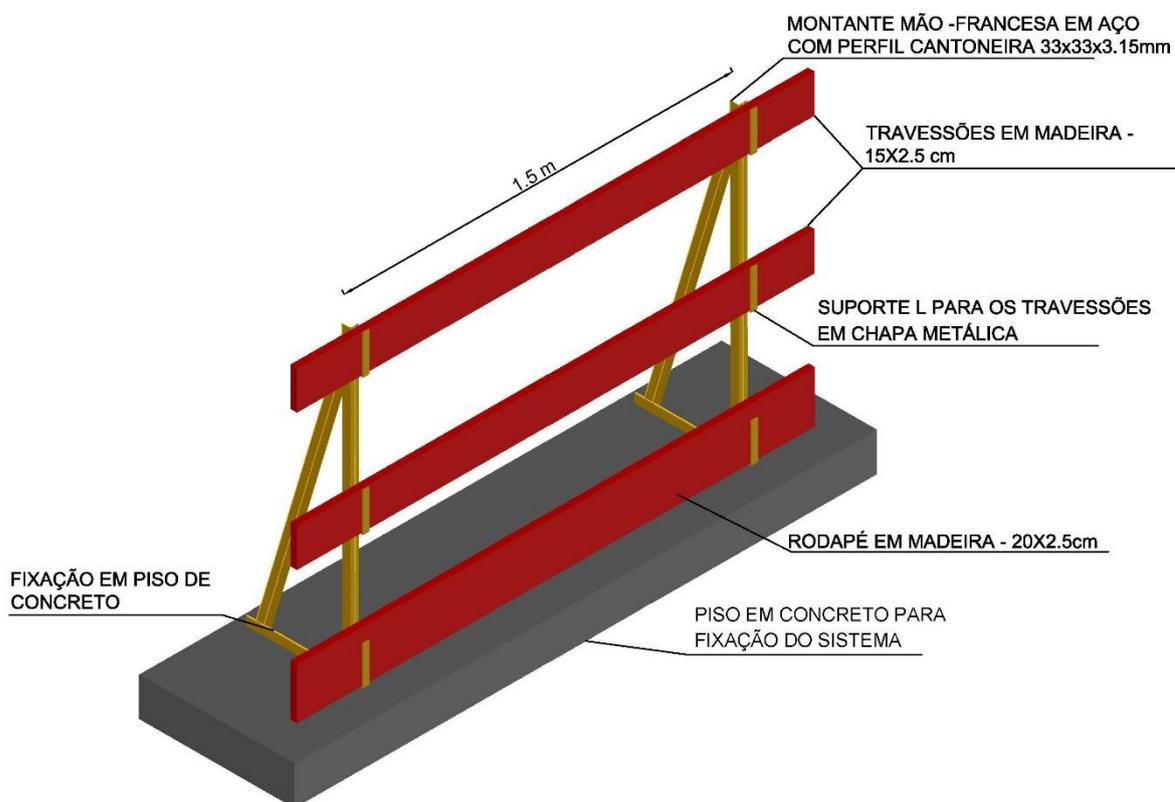
A Figura 45 apresenta uma vista externa da montagem final e a Figura 46 demonstra o esquema de montagem da estrutura em periferias.

Figura 45: Vista externa MOD_EUC e MOD_PINUS, em m



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 46: Esquema de montagem do MOD_EUC e MOD_PINUS em periferias



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Ensaios estáticos por normas com metodologia definida

Foram realizados ensaios estáticos, conforme normas internacionais, que apresentam metodologia de ensaio definidas, para fins de compreensão do comportamento das estruturas e das necessidades dos arranjos experimentais. A partir desses, é elaborada a proposta de método de ensaio, foco deste estudo.

As normas internacionais analisadas inicialmente foram: EN 13374:2013 e AS/NZS 4.994.1:2009 que apresentam métodos de ensaio definido. A reprodução dos ensaios se deu nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, foco deste trabalho, sem levar as estruturas à ruptura.

Para o caso dos rodapés para o MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO, foram utilizados em madeira, de *Eucalyptus Citriodora Hooke* e com madeira de *Pinus Elliottii.*, como usual em obras.

3.2.1 Ensaios Estáticos conforme EN 13374:2013 - União Europeia (ensaio 1 e ensaio 2)

A EN 13374 (DIN, 2013) define duas etapas de ensaios estático, uma manutenção, para estado limite de serviço (ELS) com análise de deslocamentos limites e outra de resistência, para o estado limite último (ELU) em que se aplica uma carga máxima na estrutura, conforme Equação 2 apresentada no item 2.4.1.1, com análise de falhas, levando a estrutura para a sua ruptura posteriormente.

Como a análise deste trabalho é definir um método de ensaio para as estruturas de guarda-corpos com deslocamentos limites, será realizado o ensaio estático de manutenção definido pela EN 13374:2013 e o ensaio de carga máxima, porém, as estruturas não foram levadas à ruptura.

3.2.1.1 Aparelhagem necessária

Para o ensaio estático, foram utilizados os equipamentos:

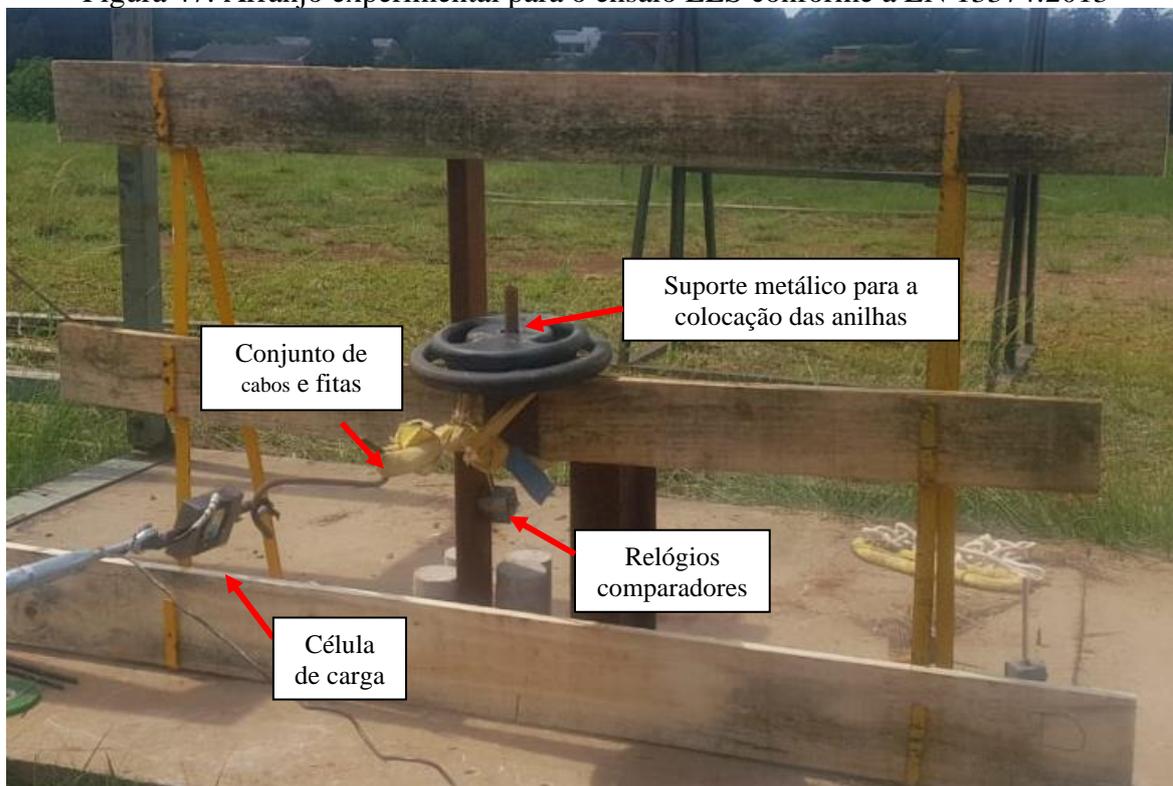
- a) Relógios comparadores;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;

- d) Catraca;
- e) Conjunto de cabos e fitas;
- f) Suporte metálico;
- g) Anilhas com configuração de 30 kg e 20 kg;
- h) Pórtico metálico;
- i) Cronômetro.

3.2.1.2 Procedimento de teste

Para o estado limite de serviço no ensaio estático de manutenção (ensaio 1), é definida a aplicação simultânea da carga horizontal e vertical de 300 N, a serem aplicadas, aproximadamente, no centro do vão, analisando os elementos de travessão superior (TS) e travessão intermediário (TI), Figura 47, isoladamente; e uma carga horizontal e vertical 200 N a serem aplicadas, aproximadamente, no centro do vão do rodapé (RO) da estrutura, neste caso, para o MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS foi ensaiado o rodapé com a madeira *Pinus Elliottii* e com a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook*.

Figura 47: Arranjo experimental para o ensaio ELS conforme a EN 13374:2013



Fonte: Dados da pesquisa.

Para a realização do ensaio, foi instalada uma célula de carga para a aplicação da carga horizontal na estrutura, a partir de um sistema com fitas e catracas ancoradas e um sistema de pino metálico com anilhas para a aplicação da carga vertical. Os relógios comparadores foram instalados para realizar as medições dos deslocamentos, horizontal e vertical, aproximadamente, no centro do vão, seguindo o procedimento:

O ensaio 1 no Estado Limite de Serviço (ELS) consistiu em:

- a) Aplicar a carga de teste durante um minuto, para conter as folgas do sistema;
TS = horizontal e vertical 300 N
TI = horizontal e vertical 300 N
RO = horizontal e vertical 200 N
- b) Remover os carregamentos;
- c) Registrar o deslocamento como δ_1 ;
- d) Aplicar a carga de teste;
TS = horizontal e vertical 300 N
TI = horizontal e vertical 300 N
RO = horizontal e vertical 200 N
- e) Registrar o deslocamento como δ_2 ;
- f) Remover a carga.

Foi realizada uma alternativa de aplicação de cargas simultâneas nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, adotando a metodologia de ensaio da norma EN 13374 (DIN, 2013), visto que a norma europeia apresenta as menores cargas das normas analisadas e considerando que a ação simultânea seria um critério mais exigente. A Figura 48 demonstra o arranjo experimental que se demonstrou muito complexo para a realização do ensaio, com a falta de equipamentos para medição dos deslocamentos e necessidade de muitas avaliações simultâneas de controle de aplicação de carga e análise dos relógios comparadores. Não se pode avaliar o ensaio de forma adequada, com isso, a tentativa não foi considerada nos resultados desse trabalho.

Figura 48: Arranjo experimental para o ensaio ELS, cargas simultâneas, conforme a EN 13374:2013



Fonte: Dados da pesquisa.

Para o ensaio 2, referente ao Estado Limite Último (ELU), a EN 13374 (DIN, 2013) orienta a calcular as cargas majoradas pelos coeficientes de segurança, no ponto mais desfavorável e após levar a estrutura à ruptura. Nesse caso, foi adotada a metodologia para determinação da carga no ELU apresentada no trabalho de González *et al.* (2011), Equação 3 e Equação 4, no item 2.7.

Como o objetivo do trabalho não é romper os modelos, as estruturas não foram levadas à ruptura. O ponto mais desfavorável considerado para os ensaios foi o centro do vão para o travessão superior, Figura 49.

Figura 49: Arranjo experimental para o ensaio ELU conforme a EN 13374:2013



Fonte: Dados da pesquisa.

Para esse ensaio, foi aplicada a carga horizontal na estrutura, com uma célula de carga juntamente com um sistema de fitas e catraca ancoradas. Os deslocamentos horizontais foram medidos com um relógio comparador. A indicação da EN 13374 (DIN, 2013) é apenas que a estrutura resista a esse esforço, porém, adicional a essa informação foram avaliados os deslocamentos.

O ensaio 2 no Estado Limite de Último (ELU) consistiu em:

- a) Carregar a estrutura com a carga máxima de teste, $F_{\max} = \gamma_M \times \gamma_F \times Q_K$:

Para aço:

$$TS = \text{horizontal e vertical} = 1,5 \times 1,1 \times 300 \text{ N} = 495 \text{ N};$$

Para a estrutura com montantes em aço e travessões em madeira, foi considerada a pior situação:

$$TS = \text{horizontal e vertical} = 1,5 \times 1,3 \times 300 \text{ N} = 585 \text{ N};$$

- b) Manter a carga por 1 minuto;
c) Registrar falhas no sistema.

Foram repetidos os ensaios 3 vezes para os 4 modelos ensaiados, considerando 2 rodapés para as estruturas em aço (*Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Citriodora Hook*), totalizando 42 ensaios para o ELS e 12 ensaios para o ELU.

Os resultados dos ensaios são apresentados no capítulo destinado a eles.

3.2.2 Ensaios Estáticos conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3)

A norma da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994.1:2009 apresenta metodologia de ensaio; orienta diferentes ensaios para a estrutura de guarda-corpos, variando entre montantes e travessões, e, neste caso, foram realizados os ensaios referentes a travessões e rodapés.

3.2.2.1 Aparelhagem necessária

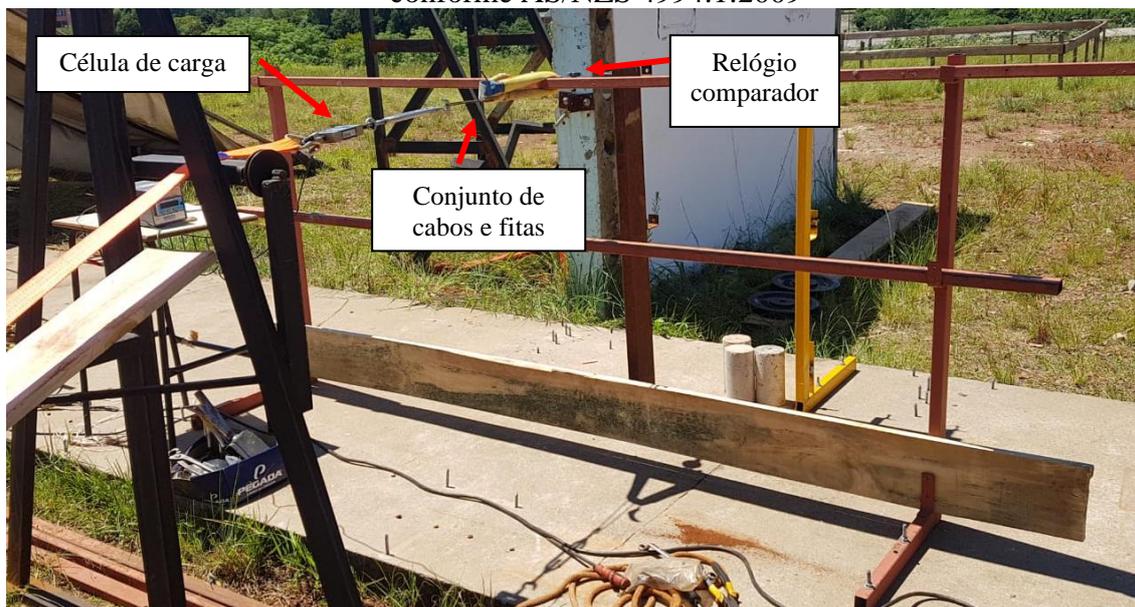
Para o ensaio estático foram utilizados os equipamentos:

- a) Relógio comparador;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;
- d) Catraca;
- e) Conjunto de cabos e fitas;
- f) Pórtico metálico;
- g) Suporte metálico;
- h) Anilhas com configuração de 10 kg e 60 kg;
- i) Cronômetro.

3.2.2.2 Procedimento de teste

O ensaio 3 consistiu em variar a ordem e a forma de aplicação da carga, horizontal para dentro, Figura 50, horizontal para fora, invertendo a posição do carregamento horizontal e vertical, Figura 51.

Figura 50: Arranjo experimental para o ensaio com carregamento horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009



Fonte: Dados da pesquisa.

Para os ensaios horizontais, foi realizada a instalação de uma célula de carga para a medição da carga aplicada na estrutura juntamente com um sistema de fitas e catraca ancoradas. Para os ensaios verticais, foi utilizado um suporte com pino para a colocação de anilhas com a carga desejada.

A medição dos deslocamentos, foi realizada com relógio comparador, na posição horizontal para o ensaio horizontal e na posição vertical para o ensaio vertical, aproximadamente, no centro do vão.

Os ensaios seguiram o seguinte procedimento:

- a) Aplicar uma pré-carga de 100N;
- b) Medir os deslocamentos;
- c) Remover a pré-carga;
- d) Aplicar a força de 600 N por um período de 300 a 315 segundos;
- e) Medir o deslocamento na estrutura;
- f) Retirar a carga (AS/NZS, 2009a).

Figura 51: Arranjo experimental para o ensaio com carregamento vertical na estrutura MOD_AÇO



Fonte: Dados da pesquisa.

Foram repetidos os procedimentos para os diferentes componentes da estrutura, travessão superior (TS), travessão intermediário (TI) e rodapés (RO), para as diferentes combinações de estruturas MOD_AÇO_PINOS, MOD_AÇO, MOD_EUC e MOD_PINUS instaladas conforme projeto detalhado no item 3.1. Para o MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO o rodapé ensaiado foi com a madeira de *Pinus Elliottii* e de *Eucalyptus Citriodora Hook*.

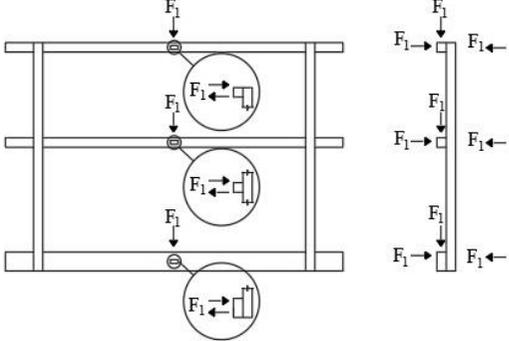
Foram repetidos os ensaios 3 vezes para os 4 modelos ensaiados, considerando 2 rodapés para as estruturas em aço (*Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Citriodora Hook*), totalizando 42 ensaios.

A Tabela 4 apresenta um resumo das metodologias de ensaio para as normas europeia e da Austrália e Nova Zelândia com as cargas e o ponto de aplicação e parâmetros considerados.

Tabela 4: Resumo das metodologias de ensaios estáticos com metodologias definidas nas normas EN 13374:2013 e AS/NZS 4.994.1:2009 (continua)

Ensaio	Descrição do Teste	Cargas	Esquema do ensaio	Parâmetros avaliados e critérios de aceitação
1	EN13374 (DIN, 2013)	$F_1 = 300 \text{ N}$ $F_2 = 200 \text{ N}$		<p>Medição dos deslocamentos horizontais máximos no centro do vão:</p> <ul style="list-style-type: none"> — $\delta_2 - \delta_1 \leq 55 \text{ mm}$; — $\delta_1, \delta_2 \leq 60 \text{ mm}$; <p>Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>
2	EN13374 (DIN, 2013)	<p>Aço: $F_{\max} = 495 \text{ N}$</p> <p>Madeira: $F_{\max} = 585 \text{ N}$</p>		<p>Medição do deslocamento horizontal no centro do vão do Travessão Superior;</p> <p>Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>

Tabela 4: Resumo das metodologias de ensaios estáticos com metodologias definidas nas normas EN 13374:2013 e AS/NZS 4.994.1:2009 (conclusão)

3	<p>AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a)</p>	<p>A carga é aplicada na estrutura variando a ordem e forma de aplicação entre: vertical, horizontal para dentro e horizontal para fora, a seguir os passos para o ensaio:</p> <ol style="list-style-type: none"> Aplicar uma pré-carga durante um minuto; Medir os deslocamentos; Remover a pré-carga; Aplicar a força F_1 por um período de 300 a 315 segundos. Medir o deslocamento na estrutura. Retirar a carga. 	<p>Pré-carga: $F_1 = 100 \text{ N}$</p> <p>Carga de Teste: $F_1 = 600 \text{ N}$</p>		<p>Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão: — $\delta < 101 \text{ mm}$; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>
---	---	--	--	---	--

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Análise de ensaios estáticos com as prescrições normativas

Com a realização dos ensaios pelas normativas com metodologia definida puderam ser realizadas as considerações dos ensaios estáticos para basear a metodologia padrão proposta nesse trabalho.

3.3.1 Análise quanto ao tempo de duração da carga

A análise quanto ao tempo de aplicação conforme as diferentes normas avaliadas têm como propósito avaliar o tempo de aplicação no método proposto nesse estudo. A seguir, são realizadas as observações verificadas durante a execução dos ensaios das normas EN 13374:2013 e AS/NZS 4994.1:2009.

O tempo de aplicação das cargas definido pela EN 13374:2013 (ensaio 1 e ensaio 2) se apresentou adequado, com a pré-carga aplicada durante 1 minuto, e a carga de teste com medição dos deslocamentos instantâneos.

Para a norma AS/NZS 4994 (ensaio 3), ao aplicar a carga de 600 N, o deslocamento instantâneo e o deslocamento medido após 300s a 315s, são próximos, não havendo uma variação significativa, o que caracteriza o ensaio estático em regime elástico.

Considera-se o tempo de duração de 1 minuto e até medições de deslocamentos instantâneos adequados para avaliar o comportamento estático das estruturas que será proposto neste trabalho.

3.3.2 Análise quanto ao valor da pré-carga e da carga

As normas analisadas variavam também nos valores de pré-carga e cargas aplicadas nas estruturas. Quanto ao ensaio 1 realizado de acordo com a EN 13374:2013, observou-se que a pré-carga e a carga adotadas no ensaio eram de mesmo valor, visto serem as menores cargas das normativas avaliadas. Nesse caso, a pré-carga atendeu às necessidades de conter as folgas na estrutura.

Já no ensaio 3, conforme AS/NZS 4994.1:2009, a pré-carga adotada foi de 100 N e a carga de ensaio de 600 N. Nesse caso, em que a carga de ensaio era superior a carga da norma apresentada anteriormente, a pré-carga de 100 N se mostrou mais adequada, visto que aplicar uma pré-carga de 600 N e carga de ensaio de 600 N seria um critério mais exigente.

A pré-carga tem a finalidade de ajustar as folgas no sistema e o valor de 100 N atendeu a essa necessidade nas estruturas e será o critério adotado para a proposta metodológica apresentada neste trabalho.

3.3.3 Análise quanto ao sentido e simultaneidade de aplicação da carga

Foram realizadas diferentes formas de aplicação de carga, no sentido horizontal para fora e para dentro e no sentido vertical e também de forma isolada ou simultânea.

Para o ensaio 1 conforme orientações da EN 13374:2013, foi realizada a aplicação de cargas simultâneas, horizontal e vertical nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, de forma isolada.

Também, foi realizada uma alternativa de aplicação de carga tanto horizontal como vertical simultânea nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé pelas cargas da norma europeia EN 13374. A realização desse ensaio se mostrou complexa, considerando-se a exigência de equipamentos para o arranjo experimental como para a aplicação dos carregamentos e avaliação dos deslocamentos nos relógios comparadores.

Para a AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3), as cargas foram aplicadas no sentido horizontal para fora e para dentro e no sentido vertical. Nesse ensaio visualizou-se que, para os modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, os deslocamentos foram maiores no sentido para dentro. Nesse caso, as estruturas estão instaladas corretamente para a contenção de quedas em periferias. Esse fator se deve à influência da geometria adotada para o modelo, visto que para a aplicação do carregamento para fora, o montante e o travessão, contém maior rigidez, ou seja, a maior inércia dos perfis no sentido horizontal.

Já no carregamento para dentro, os modelos apresentaram uma chapa em formato de L para apoiar o travessão. Essa chapa não apresenta a rigidez como um perfil tubular, como o montante, com isso, os resultados foram com deslocamentos maiores.

Para os modelos com a utilização da mão francesa, MOD_EUC e MOD_PINUS, ocorreu o contrário, os esforços maiores foram no sentido para fora. A mão francesa que sustenta o montante encontra-se para dentro da periferia, o que auxiliou nos deslocamentos maiores no sentido para fora.

O código do Québec S-2.1 R4 apresenta um critério que os elementos horizontais devem ser fixados internamente ao montante, esse critério será igualmente indicado nas propostas de alteração da NR 18, conforme as observações de deslocamentos maiores,

quando esses elementos estão posicionados na parte externa do montante. Avalia-se esse critério como fundamental na concepção das estruturas, devendo ser considerado pelos projetistas na fase de projeto.

3.3.4 Análise do comportamento dos materiais utilizados

Para os ensaios foram consideradas duas espécies de madeira, *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC) e *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS).

Observou-se, nos ensaios realizados, que a estrutura de mão francesa com madeira de *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS) apresenta um deslocamento maior se comparado com a estrutura de mão francesa com madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC) na maioria dos casos. Atribui-se esse fato à caracterização como conífera e dicotiledôneas com os valores de módulo de elasticidades de 3500 MPa e 9500 MPa, para uma classe C20 e D20, respectivamente, segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997) apresentada no item 3.1.

Pode-se visualizar também, que a utilização da madeira de *Pinus Elliottii* apresenta uma curvatura acentuada quando carregada, tanto nos travessões e rodapés do modelo MOD_PINUS como nos rodapés dos modelos com travessões metálicos e rodapé de madeira, MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS,

Com isso, a partir da caracterização do material e dos ensaios realizados, considera-se que a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook* se torna mais adequada para as solicitações impostas.

3.4 Procedimento de Ensaio Estático Padrão

A partir das considerações sobre os ensaios, é apresentada uma proposta de ensaio estático padrão o qual objetiva a verificação das estruturas. O procedimento de ensaio estático padrão proposto é que a estrutura a ser ensaiada deve ser montada em protótipo em escala real, seguindo as orientações das especificações do projeto a ser instalado em canteiro de obras.

Com a realização dos ensaios anteriores, avaliou-se que o valor de pré-carga adotado pela AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) de 100 N é adequado para conter as folgas no sistema. Considerando que a EN 13374 (DIN, 2013) adota a pré-carga no valor da carga de teste,

avaliou-se que para este caso, seria um valor de pré-carga elevado, visto que os carregamentos são maiores.

Para o tempo de aplicação da carga, com os ensaios realizados pela AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a), verificou-se que os deslocamentos ocorriam de forma estática na estrutura e não variavam em função do tempo de 300 segundos a 315 segundos, desse modo, o tempo de aplicação da carga adotado foi de um minuto, conforme EN 13374 (DIN, 2013).

O ensaio para avaliar o estado limite de serviço da estrutura deve ser realizado da seguinte forma:

- a) Aplicar de uma pré-carga de 100 N durante um minuto;
- b) Registrar os deslocamentos da estrutura (δ_1);
- c) Retirar o carregamento e zerar as medições dos deslocamentos;
- d) Aplicar a carga de ensaio durante um minuto;
- e) Registrar os deslocamentos na estrutura como (δ_2);
- f) Verificar falhas e/ou rupturas do sistema.

Essa proposta de metodologia foi aplicada para as normas que definiam as cargas, porém não especificavam um método de ensaio, caso da norma OSHA 1926.502 e Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4). Embora não exista um método de ensaio definido pelas normas, utilizaram-se as cargas definidas na normativas para a realização do ensaio estático e avaliação do desempenho das estruturas.

3.5 Aplicação do Procedimento de Ensaio Estático Padrão

A metodologia proposta de ensaio estático padrão foi aplicada para as normas que definiam as cargas, porém, não especificavam um método de ensaio, caso da norma OSHA 1926.502 e Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4). Embora não exista um método de ensaio definido pelas normas, utilizaram-se as cargas definidas nas normativas para a realização do ensaio estático e avaliação do desempenho das estruturas.

3.5.1 Ensaios Estáticos segundo a OSHA 1926.502 (ensaio 4 e ensaio 5)

A orientação de ensaio disponível na OSHA 1926.502- *Fall Protection* não apresenta metodologia definida como as normas Europeia e da Austrália e Nova Zelândia. Dispõem

que as estruturas devem suportar, sem ruptura, uma força de 890 N, aplicada em 5,1 cm do travessão superior, em qualquer direção, horizontal ou vertical (OSHA, 2016).

Quando ensaiados os sistemas, verticalmente, na aplicação da carga de 890 N, o travessão superior do guarda-corpo não pode deslocar para uma altura menor de 100 cm acima do nível de trabalho (OSHA, 2016).

Com essa observação considerou-se que o ensaio indicado pela OSHA 1926.502 seria de cargas, horizontal e vertical, de 890 N, atuando de forma independente no travessão superior, chamado neste trabalho de ensaio 4.

Com o objetivo de avaliar melhor as cargas indicadas pela OSHA, foi realizado o ensaio 5, com aplicação de carga horizontal simultânea nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé no valor de 890 N, 666 N e 222 N, respectivamente.

Foram realizados os dois ensaios estático com a metodologia padrão apresentada para avaliação da aplicação deste ensaio.

3.5.1.1 Aparelhagem necessária

- a) Relógios comparadores;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;
- d) Catraca;
- e) Conjunto de cabos e fitas;
- f) Suporte metálico;
- g) Anilhas com configuração de 89 kg;
- h) Pórtico metálico;
- i) Cronômetro.

3.5.1.2 Procedimento de ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4)

A instalação do sistema de ensaio segundo a OSHA 1926.502 foi similar ao arranjo experimental adotado para os ensaios conforme a EN 13374:2013 no Estado Limite Último (ensaio 2) e AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3), com aplicação da carga horizontal para fora, a partir da instalação de uma célula de carga juntamente com um sistema de fitas e catraca ancoradas e medição do deslocamento horizontal, Figura 49. E para o ensaio vertical com a

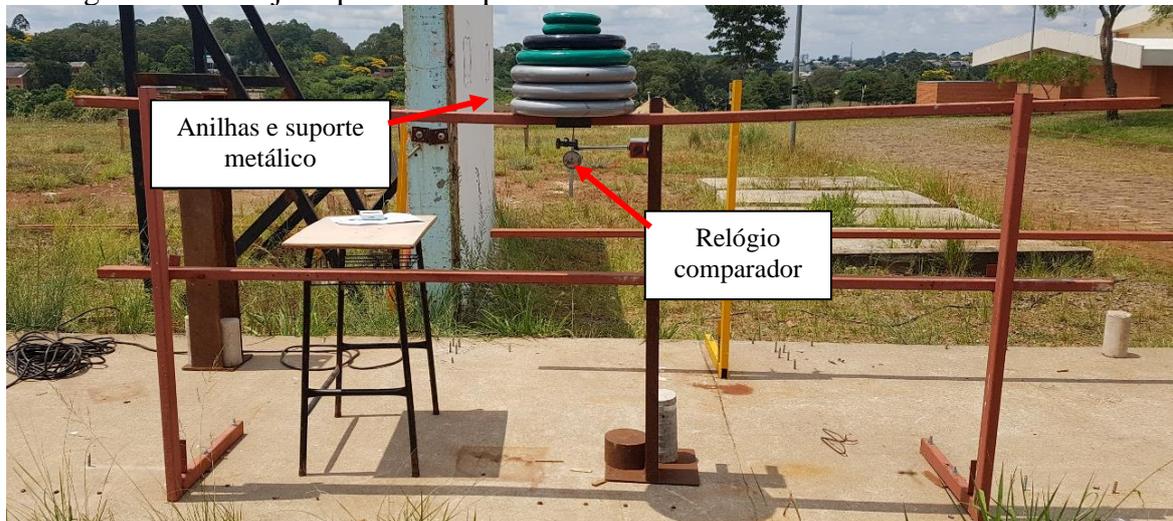
adoção de um suporte com pino para a colocação de anilhas com a carga desejada, Figura 52.

Como a OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) cita que, quando ensaiado verticalmente, o sistema não poderá deslocar para uma altura inferior a 1,0 m, considerou-se que os carregamentos, horizontal e vertical, são realizados isoladamente seguindo o procedimento:

- a) Aplicar durante um minuto uma carga, de 100 N no centro do vão;
- b) Registrar o deslocamento como δ ;
- c) Remover a pré-carga e zerar os relógios comparadores;
- d) Aplicar durante um minuto uma carga de 890 N no centro do vão;
- e) Verificar o deslocamento δ ;
- f) Verificar a altura da estrutura após o deslocamento, quando a aplicação da carga for vertical.
- g) Verificar se houve qualquer falha ou ruptura do sistema;

Foram realizados 3 ensaios para carregamento horizontal e 3 ensaios para carregamento vertical para cada modelo, totalizando 24 ensaios.

Figura 52: Arranjo experimental para o ensaio vertical conforme a OSHA 1926.502



Fonte: Dados da pesquisa.

3.5.1.3 Procedimento de ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5)

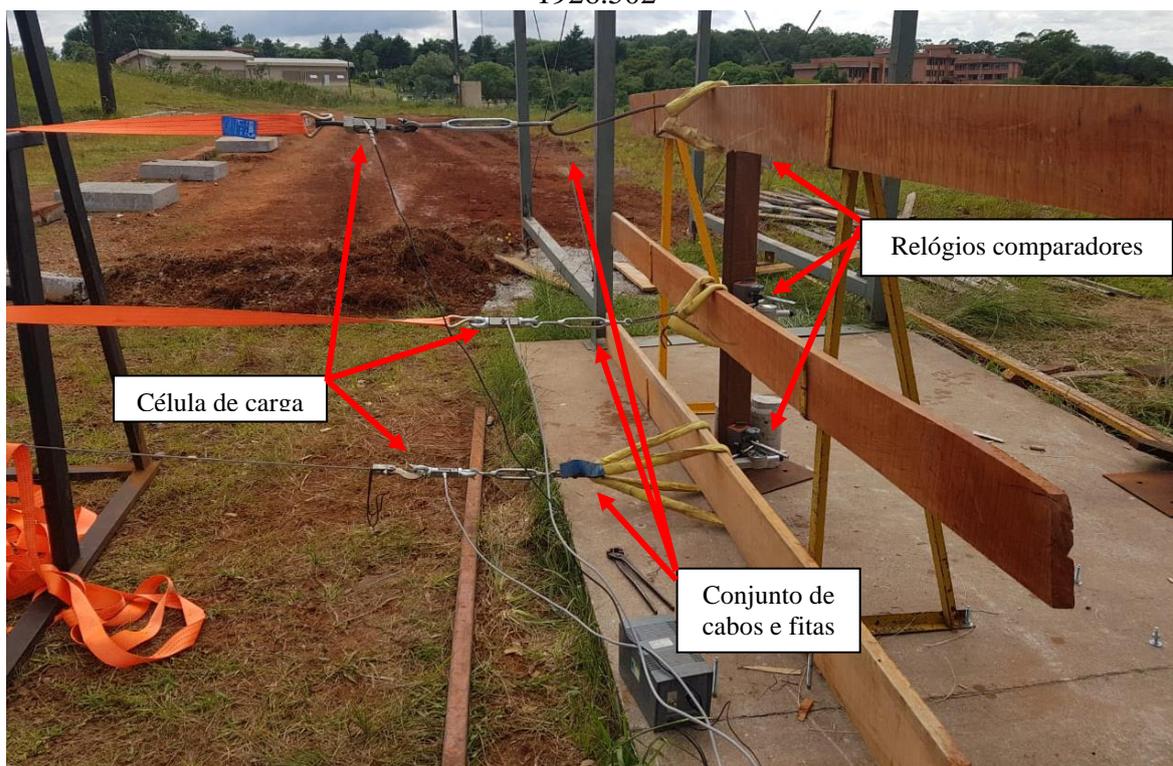
Para simular uma situação mais exigente de carregamento na estrutura, optou-se por realizar um ensaio considerando um carregamento horizontal com as cargas determinadas pela OSHA 1926.502 de forma simultânea nos elementos de travessão superior, intermediário e rodapé.

O ensaio consistiu em aplicar as cargas no elemento de travessão superior de 890 N, travessão intermediário 666 N e rodapé de 222 N, totalizando 1778 N. Foi instalado um sistema de cordas, fitas e catraca com 3 células de carga para o arranjo experimental desse ensaio, conforme Figura 53. Como foi realizada uma tentativa com aplicação de carga horizontal e vertical simultânea pela norma europeia que não obteve resultados claros, optou-se por carregar a estrutura apenas horizontalmente, visto ser uma situação mais crítica para a resistência das estruturas.

Os dispositivos para leitura dos deslocamentos foram os relógios comparadores instalados no centro do vão do travessão superior, travessão intermediário e rodapé.

A madeira utilizada para o elemento de rodapé no caso de carregamento simultâneo foi a de *Eucalyptus Citriodora Hook*, por se apresentar mais adequada, como justificado no item 3.3.4.

Figura 53: Arranjo experimental para o ensaio horizontal simultâneo conforme a OSHA 1926.502



Fonte: Dados da pesquisa.

O procedimento do ensaio 5 consistiu em:

- Aplicar durante um minuto uma carga horizontal de 100 N no centro do vão;
- Registrar o deslocamento como δ ;

- c) Remover a pré-carga e zerar os relógios comparadores;
- d) Aplicar durante um minuto uma carga horizontal de:
 - TS = horizontal e vertical 890 N
 - TI = horizontal e vertical 666 N
 - RO = horizontal e vertical 222 N
- e) Verificar o deslocamento δ ;
- f) Verificar se houve qualquer falha ou ruptura do sistema;

Foram realizados 3 ensaios para carregamento horizontal para cada modelo, totalizando 12 ensaios.

3.5.2 Ensaios Estáticos segundo as cargas do Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) (ensaio 6)

A orientação do código do *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1, r.4) é de que os sistemas de guarda-corpos sejam projetados para resistir a uma força horizontal concentrada de 900 N, aplicada em qualquer ponto do travessão superior e uma força vertical concentrada de 450 N aplicada em qualquer ponto do travessão superior (QUÉBEC, 2021).

Essa normativa não apresenta metodologia de ensaio, porém como realizado pelos autores Lan e Daigle (2009) e Lan e Daigle (2014) foi realizado o ensaio conforme Figura 22 – b, com o arranjo experimental para o trabalho apresentado na Figura 54.

Figura 54: Arranjo experimental para o ensaio conforme o *Québec Safety Code for the Construction Industry (S-2.1 r.4)*



Fonte: Dados da pesquisa.

3.5.2.1 Aparelhagem necessária

- a) Relógios comparadores;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;
- d) Catraca;
- e) Conjunto de cabos e fitas;
- f) Pórtico metálico;
- g) Suporte metálico;
- h) Anilhas com configuração de 45 kg;
- i) Cronômetro.

3.5.2.2 Procedimento de teste

A instalação do sistema para o ensaio segundo as cargas do *Québec Safety Code for the Construction Industry (S-2.1 r.4)* consistiu em instalar o sistema para aplicação de carregamento horizontal e vertical simultâneos no travessão superior.

Foi adotada uma célula de carga juntamente com um sistema de fitas e catraca ancoradas e medição do deslocamento horizontal e o pino com as anilhas para a carga vertical desejada com a medição do respectivo deslocamento.

Foi adotado um procedimento de teste padrão para este trabalho para as normas que não apresentavam metodologia de ensaio, conforme critérios adotados também no ensaio 4 e ensaio 5 da OSHA 1926.502 com considerações observadas nos ensaios da EN 13374:2013 (ensaio 1 e 2) e AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3), com isso, o ensaio 6 consistiu em:

- a) Aplicar uma pré-carga horizontal e vertical de 100 N, no centro do vão do travessão superior durante um minuto;
- b) Realizar a leitura dos deslocamentos, δ ;
- c) Remover a pré-carga e zerar os relógios comparadores;
- d) Aplicar a carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N, no centro do vão do travessão superior durante um minuto;
- e) Realizar a leitura dos deslocamentos, δ ;
- f) Avaliar possíveis falhas e/ou ruptura do sistema.

Foram realizados 3 ensaios para carregamento horizontal e vertical simultâneos para cada modelo, totalizando 12 ensaios.

A Tabela 5 apresenta o resumo das metodologias adotadas para as cargas das normas internacionais da OSHA e do Québec, com o ensaio realizado, descrição do teste, cargas aplicadas na estrutura, esquema com os pontos de aplicação das cargas e parâmetros avaliados e critérios de aceitação para os ensaios.

Tabela 5: Resumo das metodologias de ensaios estáticos conforme cargas das normas OSHA 1926.502 e S-2.1 r.4 (continua)

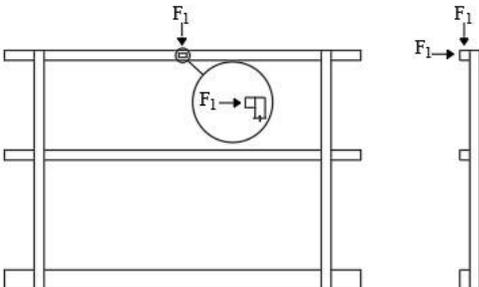
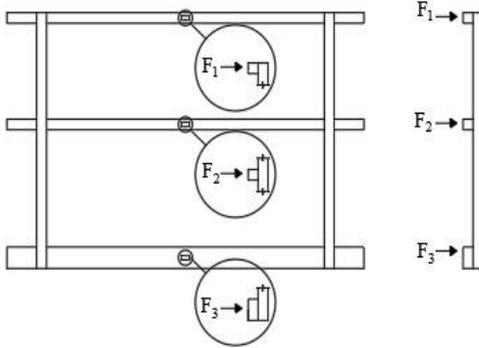
Ensaio	Descrição do Teste	Cargas	Esquema do ensaio	Parâmetros avaliados e critérios de aceitação
4	OSHA 1926.502 (OSHA, 2016)	Pré carga: $F_1 = 100 \text{ N}$ Carga de Teste: $F_1 = 890 \text{ N}$		Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão; Na aplicação da carga de teste vertical a estrutura não pode deslocar de forma que fique com uma altura inferior a 1,0 metro; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.
5	OSHA 1926.502 (OSHA, 2016)	Pré carga: $F_i = 100 \text{ N}$ ($i = 1, 2, 3$) Carga de Teste: $F_1 = 890 \text{ N}$ $F_2 = 666 \text{ N}$ $F_3 = 222 \text{ N}$		Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.
Obs.: A aplicação das cargas ocorrem de forma simultânea.				

Tabela 5: Resumo das metodologias de ensaios estáticos conforme cargas das normas OSHA 1926.502 e S-2.1 r.4 (conclusão)

6	<p>Québec S-2.1, r.4 (QUÉBEC, 2021)</p>	<p>a) Aplicar uma pré-carga durante um minuto; b) Realizar a leitura dos deslocamentos iniciais; c) Retirar o carregamento e zerar os deslocamentos nos relógios comparadores; d) Aplicar a carga de ensaio durante um minuto; e) Realizar a leitura dos deslocamentos finais;</p> <p>Obs.: A aplicação das cargas ocorrem de forma simultânea.</p>	<p>Pré carga: $F_i = 100 \text{ N}$ ($i = 1, 2$)</p> <p>Carga de Teste: $F_1 = 900 \text{ N}$ $F_2 = 450 \text{ N}$</p>		<p>Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>
---	--	---	---	--	--

Fonte: Elaborado pela autora.

3.6 Ensaios propostos para aplicação no Brasil

O objetivo deste trabalho é definir um método de ensaio compatível com as normatizações locais, para isso, foram considerados estudos e normas com as definições de metodologia de ensaios e as cargas, conforme as normas brasileiras NR 18, versão 2018, juntamente com a RTP 01, as cargas exigidas nos projetos das estruturas provisórias de guarda-corpos pelos órgãos responsáveis, NR 18, versão 2020, com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, de forma a impulsionar normas específicas brasileiras, avaliar o desempenho das estruturas de suporte para a segurança do trabalho em altura, proporcionar às empresas uma instrução sobre o atendimento a normas específicas e aos trabalhadores segurança para desempenhar suas atividades.

A seguir, são apresentadas as metodologias dos ensaios propostos para a aplicação no Brasil. Os ensaios propostos são baseados em metodologias de normas e estudos internacionais. As cargas estáticas aplicadas foram conforme exigências da NR 18, versão 2018, e RTP 01 e pela alteração da NR 18 com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022.

A metodologia de ensaio padrão proposta neste trabalho foi desenvolvida a partir das metodologias de ensaios definidas na EN 13374:2013 e AS/NZS 4994.1:2009 com observações realizadas *in loco*.

3.6.1 Ensaio estático segundo as cargas da NR 18, versão 2018

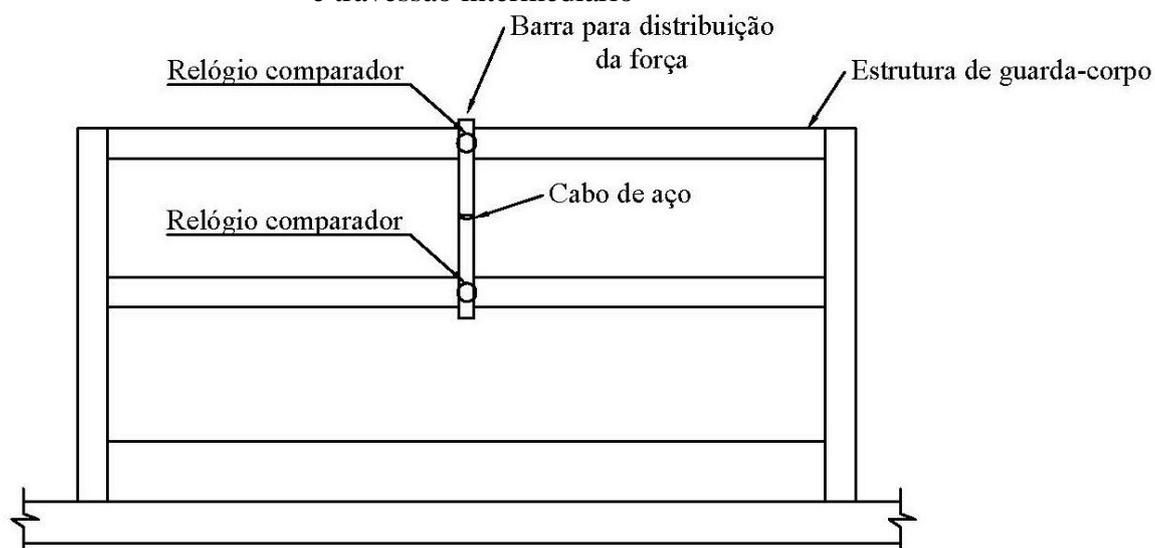
A primeira proposta apresentada trata-se da aplicação da carga exigida pela NR 18, versão 2018, e a RTP 01 (que complementa essa norma) expressa a exigência de uma carga na seguinte redação: “esforços concentrados de 150 kgf/metro linear (centro e cinquenta quilogramas-força por metro linear), no centro do vão” (FUNDACENTRO, 2003, p. 9) também avaliada nos trabalhos de Costella *et al.* (2014) e Baruffi (2017).

A redação apresentada gera dúvidas se cada elemento deverá receber a aplicação de 150 kgf/metro ou se o sistema deverá resistir a esse carregamento. Adotou-se a interpretação que a estrutura deve resistir a esse esforço e não que a carga deverá ser aplicada simultaneamente nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, visto que essa carga já é considerada uma carga elevada diante dos padrões adotados internacionalmente.

A partir dessas considerações, a carga de ensaio é definida a partir da Equação 1 e calculada para a distância entre os vãos considerados nos modelos das estruturas.

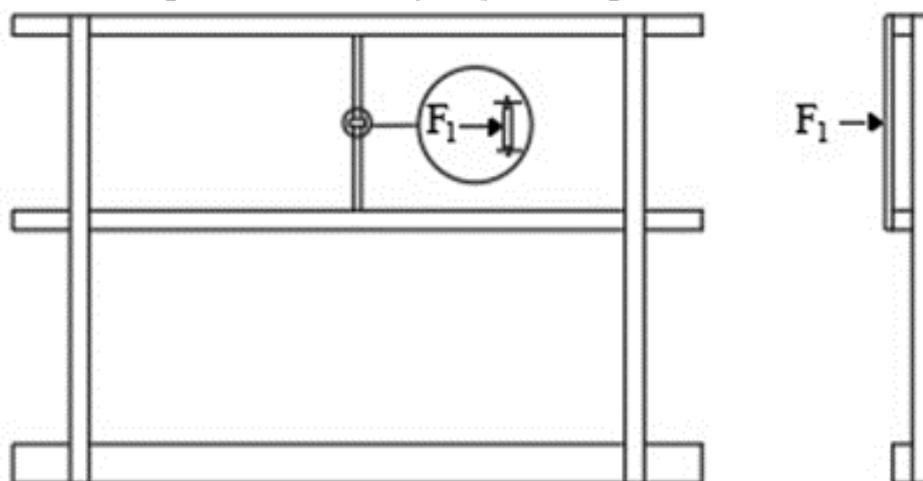
Para aplicação da carga de ensaio simultânea no travessão superior e no travessão intermediário, será instalada uma barra de aço para distribuição dos esforços e a partir de um cabo de aço instalado no centro desta barra será realizado o carregamento da estrutura por meio de um sistema de catraca e célula de carga, conforme demonstrado na Figura 55 e Figura 56, como realizado em Baruffi (2017).

Figura 55: Instrumentação e aplicação da carga de ensaio simultânea no travessão superior e travessão intermediário



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 56: Ponto de aplicação da carga na estrutura



Fonte: Elaborado pela autora.

3.6.1.1 Aparelhagem necessária

- a) Relógios comparadores;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;
- d) Catraca;
- e) Conjunto de cabos e fitas;
- f) Pórtico metálico;
- g) Cronômetro.

3.6.1.2 Procedimento de teste

O ensaio consistiu na instalação de uma barra de aço para distribuir os esforços para o travessão superior e travessão intermediário, para os modelos MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO, com vão entre montantes de 2,4 m e carga de 1500 N/m (150 kg/m), a carga calculada foi de 3600 N (360 kgf), conforme descrito na Equação 1. Para os modelos MOD_EUC e MOD_PINUS, a carga aplicada para o vão de 1,50 m foi 2250 N (225 kgf).

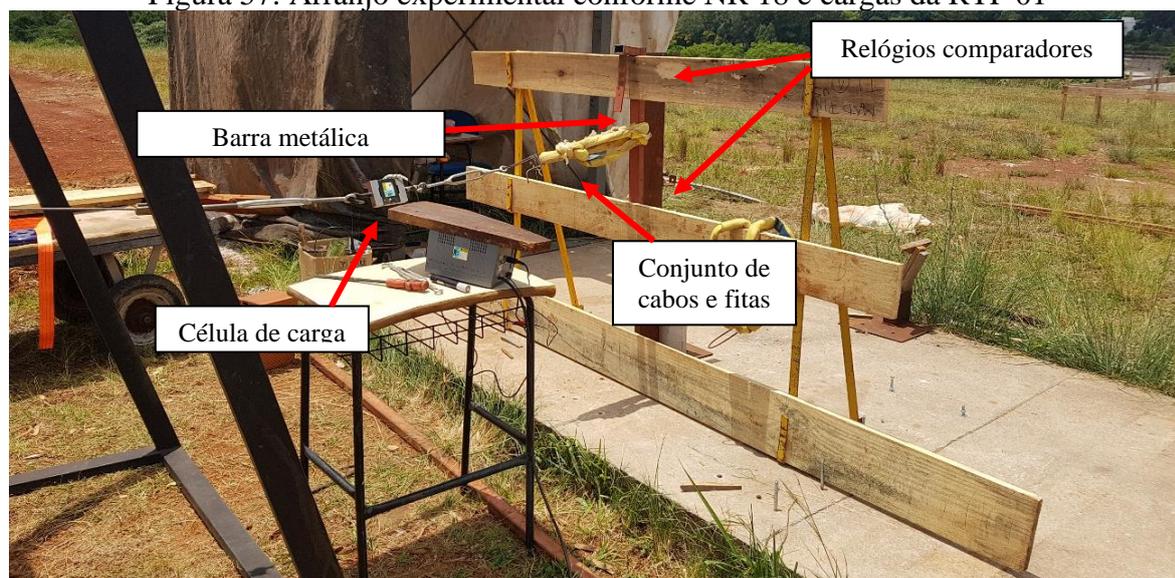
O sistema de fita, cordas e catraca foi instalado de forma a dividir igualmente a carga de ensaio no travessão superior e intermediário. Foi adotado esse padrão em função da RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003) citar que o rodapé é utilizado para conter quedas de materiais, ainda que ela cite que a resistência deve ser a mesma que dos travessões, por questões de execução dos ensaios, optou-se em aplicar apenas nos travessões que são os elementos que vão conter a queda de uma pessoa, caso isso venha a ocorrer.

Os deslocamentos foram avaliados com relógios comparadores, aproximadamente, no centro do vão do travessão superior e travessão intermediário, sendo determinado um arranjo experimental conforme apresentado na Figura 57.

O procedimento do ensaio consistiu em:

- d) Aplicar uma pré-carga de 100 N durante o tempo de um minuto;
- e) Realizar a leitura dos deslocamentos iniciais;
- f) Retirar a pré-carga e zerar os relógios comparadores;
- g) Aplicar a carga de ensaio durante um minuto;
- h) Realizar a leitura dos deslocamentos finais;
- i) Avaliar possíveis falhas e/ou ruptura do sistema.

Figura 57: Arranjo experimental conforme NR 18 e cargas da RTP 01



Fonte: Dados da pesquisa.

As avaliações realizadas durante o ensaio foram o deslocamento da estrutura sob a atuação da carga de ensaio e avaliadas quaisquer falhas e/ou desprendimento da estrutura durante o ensaio.

Os carregamentos foram repetidos três vezes em cada estrutura, totalizando 12 ensaios.

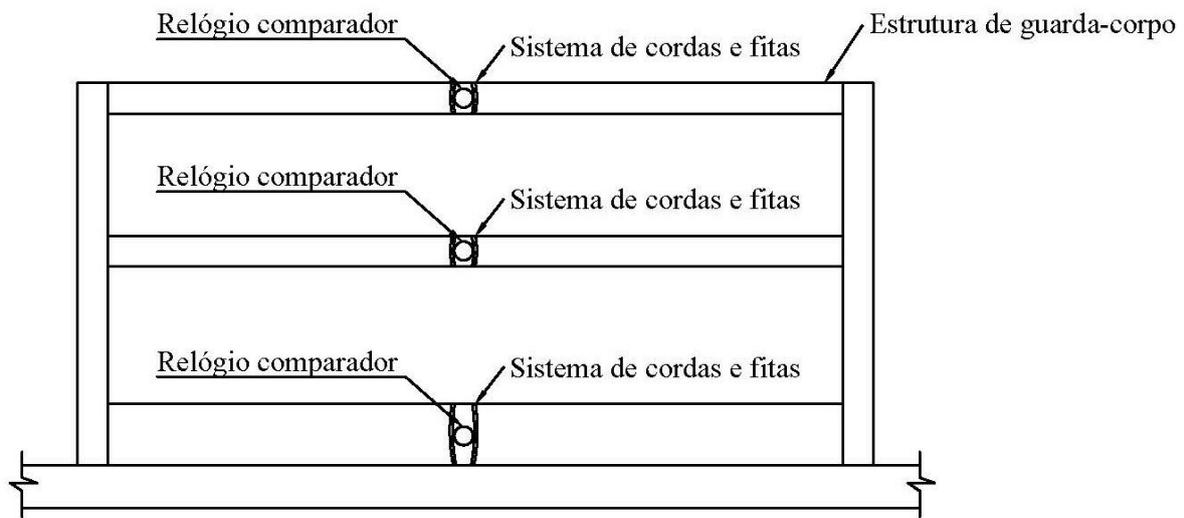
3.6.2 Ensaio estático segundo as cargas da NR 18, versão 2020

Para a segunda proposta, para este trabalho, tem-se como base a alteração da NR 18 (BRASIL, 2020) versão 2020, as cargas aplicadas nas estruturas alteraram para 900 N/m (90 kgf/m), 660 N/m (66 kgf/m) e 220 N/m (22 kgf/m), sendo assim, as cargas seriam aplicadas de forma simultaneamente nos elementos horizontais, com seus respectivos valores.

A partir dessas considerações, a carga de ensaio é definida a partir da Equação 1, já apresentada. Para esse ensaio, foi necessário aplicar a carga simultaneamente nos elementos conforme o seu valor, para isso é necessário a utilização de três sistemas de aplicação de carga, um para travessão superior, um para travessão intermediário e um para o rodapé.

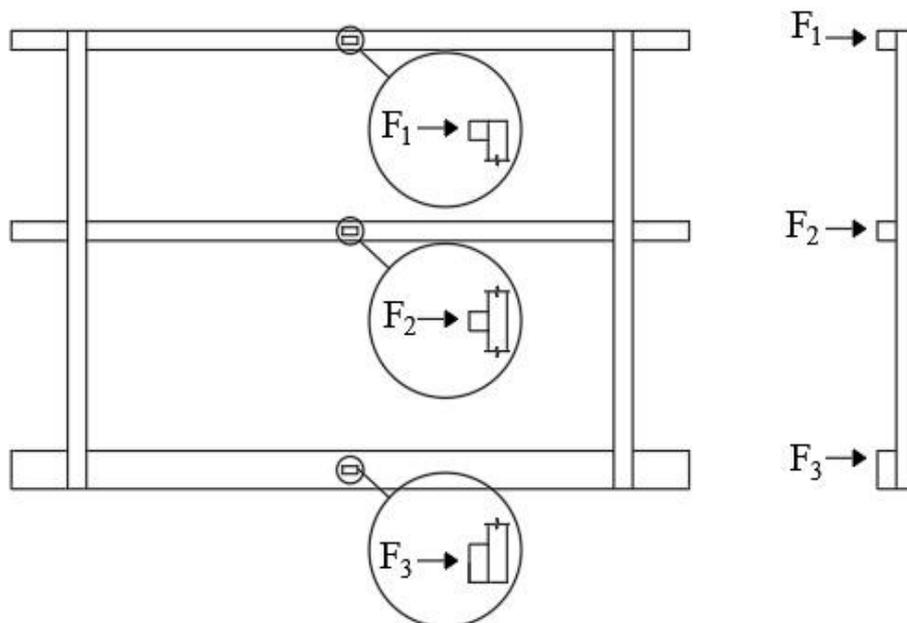
A Figura 58 e a Figura 59 demonstram o sistema de ensaio estático com a instrumentação para o ensaio e o ponto de aplicação das cargas consideradas.

Figura 58: Instrumentação e aplicação da carga de ensaio simultânea no travessão superior, travessão intermediário e rodapé



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59: Ponto de aplicação da carga na estrutura



Fonte: Elaborado pela autora.

3.6.2.1 Aparelhagem necessária

- a) Relógios comparadores;
- b) Base magnética;
- c) Célula de carga S;
- d) Catraca;

- e) Conjunto de cordas e fitas;
- f) Pórtico metálico;
- g) Cronômetro.

3.6.2.2 Procedimento de teste

O ensaio consistiu em aplicar as cargas determinadas pela NR 18 (BRASIL, 2020) simultaneamente nos elementos de travessão superior de 900 N/m (90 kgf/m), travessão intermediário 660 N/m (66 kgf/m) e rodapé de 220 N/m (22 kgf/m).

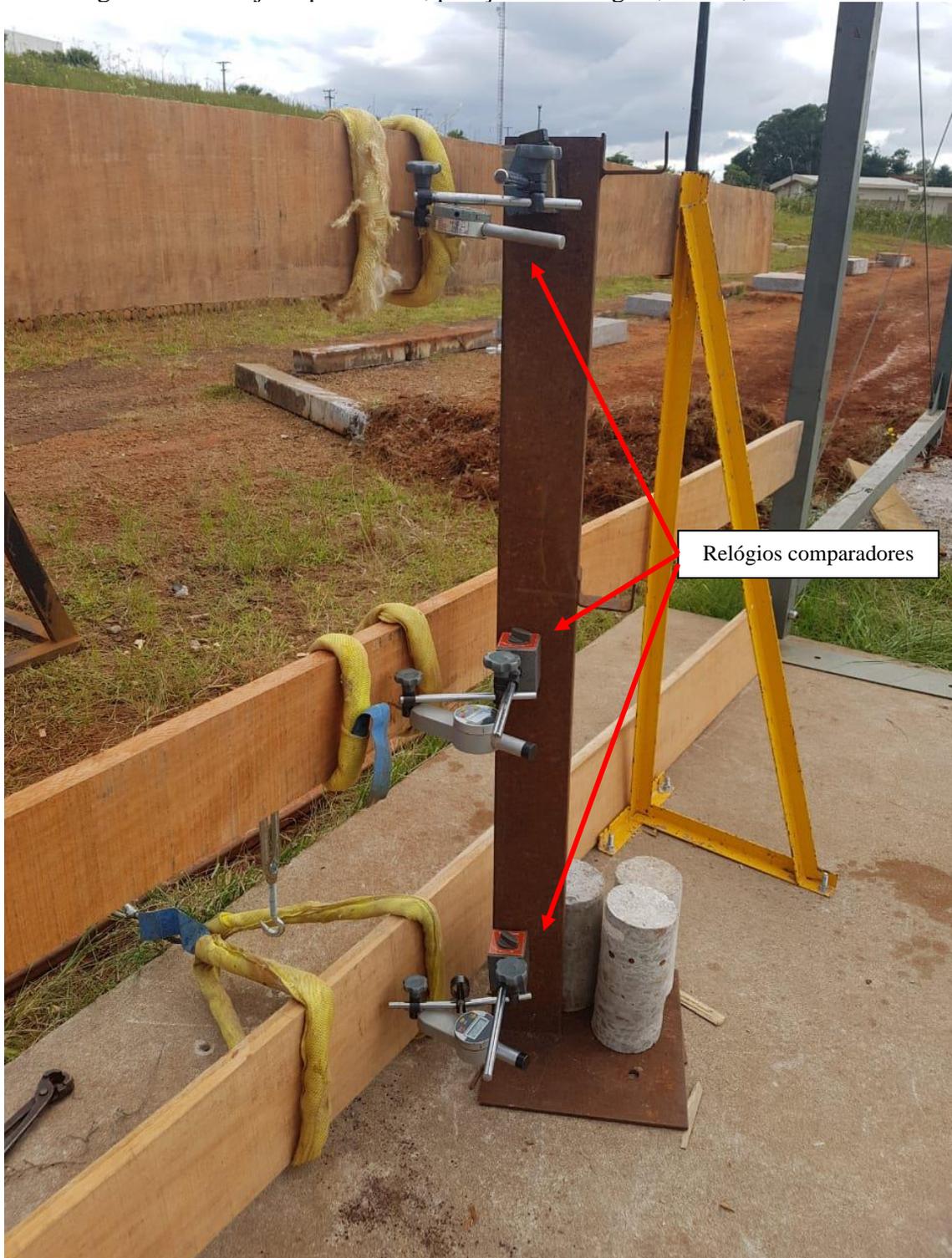
As cargas calculadas conforme a equação 1. Para o MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO foi considerada a distância entre montantes de 2,4 m. A carga para o travessão superior resultou em 2160 N, para o travessão intermediário 1584 N e para o rodapé 528 N. Totalizando uma carga aplicada na estrutura de 4272 N.

Para o MOD_EUC e o MOD_PINUS considerando o vão de 1,50 m, as cargas calculadas foram 1350 N para o travessão superior, 990 N para o travessão intermediário e 330 N para o elemento de rodapé, totalizando uma carga aplicada no guarda-corpo de 2670 N.

Foi instalado um sistema de cordas, fitas e catraca com 3 células de carga para o arranjo experimental deste ensaio. Os dispositivos para leitura dos deslocamentos foram os relógios comparadores instalados no centro do vão do travessão superior, travessão intermediário e rodapé, de acordo com a Figura 60.

Para o procedimento do ensaio estático, adotou-se a metodologia padrão definida a partir das normas que apresentavam metodologia de ensaio, EN 13374:2013 e AS/NZS 4994.1:2009.

Figura 60: Arranjo experimental, posição dos relógios, NR 18, versão 2020



Fonte: Dados da pesquisa.

O procedimento do ensaio consistiu em:

- a) Aplicar uma pré-carga de 100 N, no travessão superior, intermediário e rodapé, durante o tempo de um minuto;
- b) Realizar a leitura dos deslocamentos iniciais, δ_1 ;
- c) Retirar a pré-carga e zerar os relógios comparadores;
- d) Aplicar as cargas simultâneas, nos elementos de travessão superior, intermediário e rodapé, durante um minuto;

Para o MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO:

$$TS = 2160 \text{ N}$$

$$TI = 1584 \text{ N}$$

$$RO = 528 \text{ N}$$

Para o MOD_EUC e o MOD_PINUS:

$$TS = 1350 \text{ N}$$

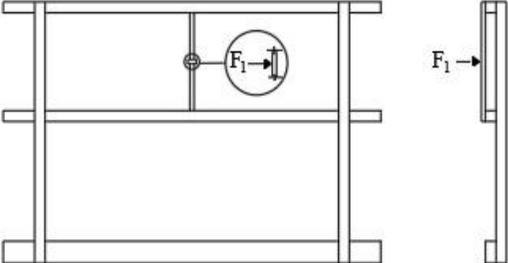
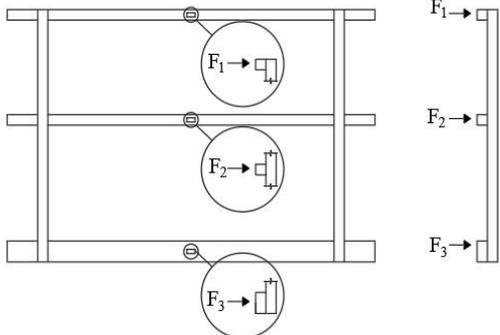
$$TI = 990 \text{ N}$$

$$RO = 330 \text{ N}$$

- e) Realizar a leitura dos deslocamentos finais, δ_2 ;
- f) Avaliar possíveis falhas e/ou ruptura do sistema.

A Tabela 6 apresenta um resumo para as metodologias de ensaio estático sugeridas para aplicação no Brasil.

Tabela 6: Resumo das metodologias de ensaios propostas neste trabalho

Ensaio	Descrição do Teste	Cargas	Esquema do ensaio	Parâmetros avaliados e critérios de aceitação
7	<p>NR18 e RTP01 (BRASIL, 2018b; FUNDACENTRO, 2003)</p>	<p>Aço: $F_1 = 3600 \text{ N}$</p> <p>Madeira: $F_1 = 2250 \text{ N}$</p>		<p>Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>
8	<p>NR18 (BRASIL, 2020)</p>	<p>Aço: $F_1 = 2160 \text{ N}$ $F_2 = 1584 \text{ N}$ $F_3 = 528 \text{ N}$</p> <p>Madeira: $F_1 = 1350 \text{ N}$ $F_2 = 990 \text{ N}$ $F_3 = 330 \text{ N}$</p>		<p>Medição dos deslocamentos máximos no centro do vão; Nenhuma ruptura ou falha estrutural.</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

3.7 Critérios de Aceitação

As normas avaliadas apresentam diferentes critérios de aceitação para as estruturas. A norma EN 13374 (DIN, 2013) apresenta critérios para verificação de resistência, define deslocamento limite de 55mm, não podendo deslocar mais de 60 mm nas fases do ensaio e ainda critérios para verificar a força de ruptura. A norma AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) apresentam também critérios para verificação de resistência e deslocamentos inferiores a 101 mm.

Quanto a especificações de deslocamento limites, a OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) dispõe que quando aplicado o carregamento vertical, essa não pode deslocar para uma altura de travessão superior inferior a 100 cm em relação ao piso e a NR 18 (BRASIL, 2020), versão 2020, dispõe acerca do deslocamento horizontal limite de 76 mm.

Para avaliação das estruturas, considerando que a carga a ser aplicada na EN 13374 (DIN, 2013) é 300 N e a AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) é 600N, o deslocamento limite da AS/NZS 4994.1:2009 apresenta-se mais restritivo, em torno de 0,16667 mm/N.

Considerando as cargas das diferentes normas, e adotando um deslocamento limite de 0,16667 mm para cada 1 N de carga aplicada na estrutura os deslocamentos limites, conforme os diferentes requisitos de carga, seriam:

- a) Para a OSHA 1926.502 (OSHA, 2016), com cargas horizontais de 890 N, os deslocamentos limites seriam, aproximadamente, 150 mm; e em cargas verticais de 890N, conforme a definição da norma indica, a altura do travessão superior após o deslocamento da carga deve ser superior a 100 cm. Ainda, considerando a carga horizontal para os elementos de travessão intermediário com cargas de 666 N e rodapé com carga de 222 N, os deslocamentos limites seriam aproximadamente 110 mm e 37 mm, respectivamente.
- b) Para o Québec (S-2.1, r.6) (QUÉBEC, 2021), a carga horizontal é de 900 N e para a vertical 450 N, com deslocamentos limites de aproximadamente 150 mm e 75 mm, respectivamente.
- c) Para a NR 18 (BRASIL, 2018b) e RTP 01 (FUNDACENTRO, 2003), as cargas aplicadas são 3600 N para a estrutura em aço, e, 2250 N para a estrutura em madeira. Os deslocamentos limites seriam, respectivamente, 600 mm e 375 mm, considerando que a carga é aplicada para os 2 elementos de travessão, isso significaria 300 mm e 187,5 mm.

- d) Segundo as novas cargas da NR 18 (BRASIL, 2020), para os modelos de aço 2160 N, 1584 N e 528 N, os deslocamentos limites seriam 360 mm, 264 mm e 88 mm, respectivamente. Para os modelos de madeira, as cargas aplicadas de 1350 N, 990 N e 330 N e os deslocamentos limites seriam 225mm, 165mm e 55 mm, respectivamente, porém, a norma indica deslocamentos limites de 76 mm.

A Tabela 7 apresenta o resumo dos deslocamentos limites considerados a partir do critério mais restritivo AS/NZS 4994.1:2009 das normas estudadas.

Tabela 7: Deslocamentos limites considerando 0,16667 mm/N

	Norma	Cargas (N)	Deslocamentos (mm)	
Normas Internacionais	OSHA 1926.502	890 (horizontal)	150	
		890 (vertical)	h > 100 cm	
		666	110	
		222	37	
	QUEBÉC S-2.1, r.6	900	150	
		450	75	
Propostas deste trabalho	NR 18 (2018)	Aço	3600	
		Madeira	2250	
	NR 18 (2020)		2160	360
		Aço	1584	264
			528	88
			1350	225
		Madeira	990	165
			330	55
		Deslocamento limite pela norma de 76 mm		

* Considerando que a carga é aplicada aos 2 elementos de travessão.

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se novamente que a norma brasileira apresenta critérios de carregamento mais exigentes para as estruturas, gerando pelo critério adotado, deslocamentos limites superiores aos propostos nas demais normativas. Nesse caso, para a versão da norma NR 18 com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, será adotado como deslocamento limite o valor de 76 mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como função apresentar os resultados e as discussões sobre os estudos realizados para os ensaios experimentais estáticos de acordo com as orientações de carregamentos das diferentes normas descritas.

4.1 Resultados dos ensaios estáticos por normas com metodologia definida

São apresentados, inicialmente, os resultados para as normas que apresentam metodologias de ensaios definidas, EN 13374: 2013 e AS/NZS 4994.1:2009.

4.1.1 Ensaios estáticos conforme a EN 13374 (ensaio 1 e ensaio 2)

O ensaio realizado para a norma europeia referiu-se ao ELS (ensaio 1), no qual os critérios de aceitação são deslocamentos limites, e ELU (ensaio 2), em que a estrutura deve apresentar resistência às cargas impostas.

A Tabela 8 apresenta médias e desvio padrão para os deslocamentos horizontais medidos para os ensaios segundo a EN 13374:2013 para os diferentes modelos analisados.

Tabela 8: Deslocamentos médios Ensaio 1 – EN 13374:2013 e Ensaio 2 – EN 13374:2013

	ELS (ensaio 1)				ELU (ensaio 2)			
	δ_{TS} (mm)		δ_{TI} (mm)		RO (mm)		δ_{TS} (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	9,613	0,315	6,67	0,131	16,390*	0,575*	15,437	0,098
					38,007**	1,355**		
MOD_AÇO_PINOS	8,097	0,307	1,607	0,074	23,817*	0,637*	14,617	0,182
					57,687**	2,185**		
MOD_EUC	8,617	0,173	7,847	0,395	5,580	0,104	14,933	0,868
MOD_PINUS	21,167	0,138	31,067	0,687	6,26	0,34	36,273	0,731

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

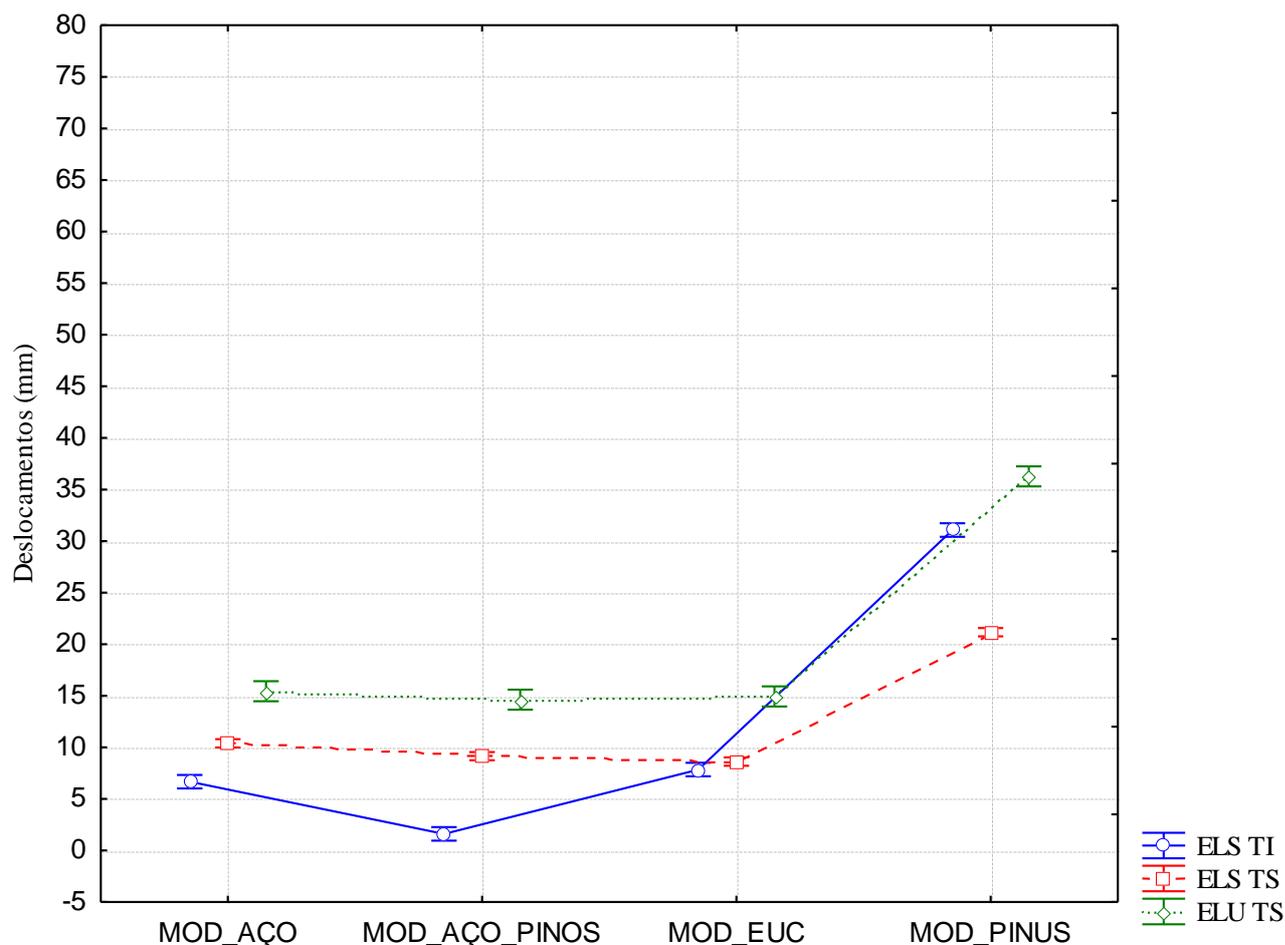
RO = Rodapé

* Rodapé de *Eucalyptus Citriodora* Hook ** Rodapé *Pinus Elliottii*

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 61 apresenta a variação nos deslocamentos para travessão superior (TS) com as cargas aplicadas para o ELS (ensaio 1) e as cargas aplicadas para o ELU (ensaio 2) para os diferentes modelos e os deslocamentos apresentados para o travessão intermediário (TI) no ELS (ensaio 1).

Figura 61: Deslocamentos para ensaios no ELS e ELU - EN 13374:2013 (ensaio 1 e ensaio 2)



ELS TI: Estado Limite de Serviço – travessão intermediário;

ELS TS: Estado Limite de Serviço – travessão superior;

ELU TS: Estado Limite Último – travessão superior.

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme critério de aceitação definido pela EN 13374 (DIN, 2013), os deslocamentos ($\delta_2 - \delta_1$) não podem exceder a 55 mm, sendo que, nas fases de ensaio, o valor não pode ultrapassar 60 mm.

Nos ensaios realizados, foi verificado que para o modelo MOD_AÇO_PINOS com madeira do tipo *Pinus Elliottii* para o elemento de rodapé, esse limite foi excedido, inclusive

na fase de ensaios, chegando a um deslocamento de 72,23 mm para o ensaio 1, superior a 60 mm, resultando em um deslocamento final médio ($\delta_2 - \delta_1$) de 57,687 mm

Em relação aos MOD_EUC e MOD_PINUS, os deslocamentos para o segundo modelo foram maiores, porém, atenderam aos deslocamentos limites definidos como critério de aceitação para o ensaio. Nesse caso, pode-se observar a influência da distância entre os montantes, adotadas para os modelos em aço (2,40 m) e modelos em madeira (1,50 m), já que o MOD_AÇO_PINOS com rodapé de *Pinus Elliottii* ultrapassou os critérios definidos.

Observou-se que a madeira *Pinus Elliottii* apresentou deslocamentos maiores do que a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook* nos ensaios. Inclusive, com a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook*, apresentando um comportamento similar aos modelos em aço, devido ao vão ser inferior.

Ainda na Figura 62, verifica-se o comportamento dos elementos de rodapé para os modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS com madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook* e *Pinus Elliottii* e também os modelos MOD_EUC e MOD_PINUS, representados pela sigla MOD_MAD e a legenda indicando as diferentes espécies de madeira.

Embora o comportamento do rodapé com as diferentes espécies de madeira, MOD_EUC e MOD_PINUS, tenham apresentados valores de deslocamento similares, o segundo teve uma variabilidade maior, reflexo da baixa carga aplicada de 200 N, nesse caso.

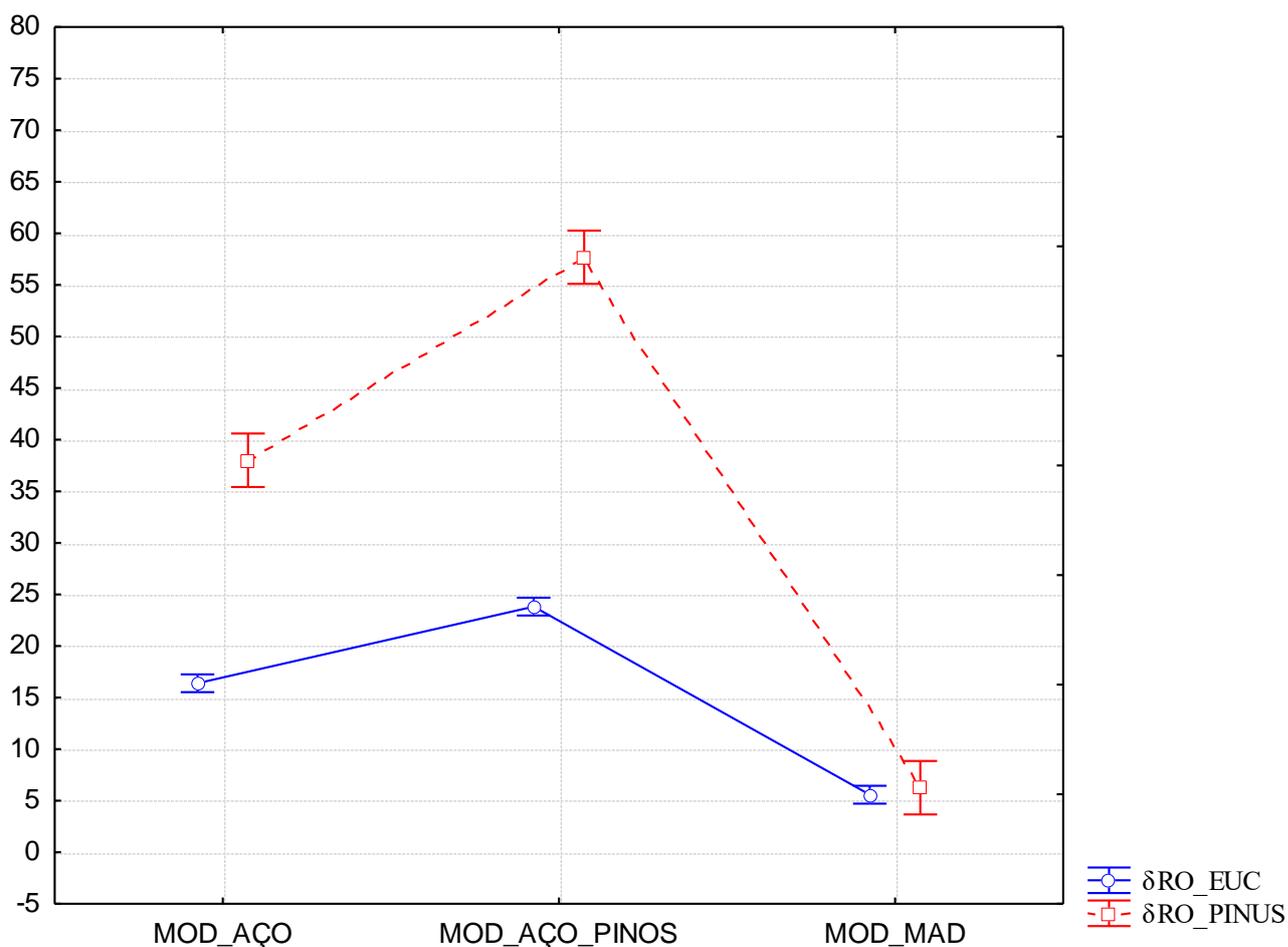
Quanto aos pinos de fixação dos elementos horizontais adotados no MOD_AÇO_PINOS, verificou-se que os deslocamentos com o pino de travamento foram menores, podendo mostrar uma influência nos resultados, para os elementos de travessão superior e intermediário no ensaio 1 para o ELS e travessão superior para o ensaio 2 no ELU.

Em relação à metodologia de ensaio no ELS (ensaio 1) indicada pela EN 13374:2013, observa-se a metodologia adequada para as cargas adotadas por essa normativa. Os tempos de aplicação das cargas são adequados, assim como a pré-carga adotada no ensaio, visto que as cargas são inferiores às demais normas.

O ensaio do ELU (ensaio 2) também é adequado, possibilitando a verificação da estrutura quanto a um carregamento superior, embora ainda seja um critério menos exigente que as demais normas avaliadas neste trabalho.

Os relatórios finais dos ensaios são apresentados no Apêndice A com todas as repetições realizadas para os ensaios e os modelos analisados, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19.

Figura 62: Deslocamentos no elemento de rodapé no ELS - EN 13374:2013 (ensaio 1)



RO_EUC: rodapé *Eucalyptus Citriodora Hook*;
 RO_PINUS: rodapé *Pinus Elliottii*.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Ensaios estáticos conforme a AS/NZS 4994.1 (ensaio 3)

Os resultados finais dos ensaios estáticos horizontal com carregamento para dentro da estrutura, para fora da estrutura e vertical conforme as prescrições da AS/NZS 4994.1:2009 são apresentados na Tabela 9.

Foi verificado durante os ensaios que a carga aplicada durante os 300 a 315 segundos tem comportamento estático e os resultados não variavam em função do tempo de aplicação da carga.

Comparando os ensaios, variando o carregamento para fora e para dentro, esses demonstraram a importância da maior inércia do montante no valor dos deslocamentos.

Critério este que deve ser avaliado por projetistas na concepção estrutural dos sistemas de guarda-corpo e rodapé.

Para os modelos MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO, os deslocamentos maiores se deram no sentido para dentro, contrário ao caso de queda na proteção de periferia, nesse sentido, o travessão era contido pela chapa metálica de suporte e os deslocamentos menores, no sentido de maior inércia do montante, sentido de impacto em caso de uma queda. Para os modelos de aço, não se verificou diferenças significativas nos modelos.

Tabela 9: Deslocamentos médios Ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009

		δ_{TS} (mm)		δ_{TI} (mm)		δ_{RO} (mm)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Horizontal para fora	MOD_AÇO	16,147	0,462	8,993	0,087	37,437*	0,872*
						76,837**	1,625**
	MOD_AÇO_PINOS	16,817	0,116	9,273	0,307	35,180*	0,049*
						72,497**	1,426**
	MOD_EUC	23,003	0,536	18,283	0,330	14,073	1,099
	MOD_PINUS	29,617	0,749	38,527	0,526	23,290	0,54
Horizontal para dentro	MOD_AÇO	17,647	0,159	9,197	0,049	36,030*	0,394 *
						76,280 **	0,911 **
	MOD_AÇO_PINOS	18,503	0,111	10,027	0,087	40,937*	1,435*
						77,133**	0,723**
	MOD_EUC	18,670	0,428	13,360	0,185	5,807	0,27
	MOD_PINUS	25,133	1,377	32,653	1,278	14,22	1,153
Vertical	MOD_AÇO	16,657	1,043	16,533	0,041	0,384*	0,087 *
						2,866**	0,752 **
	MOD_AÇO_PINOS	16,600	0,102	18,687	0,063	0,397 *	0,066 *
						0,977 **	0,090**
	MOD_EUC	1,040	0,175	0,740	0,057	0,133	0,034
	MOD_PINUS	1,343	0,029	1,647	0,186	2,57	0,328

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

* Rodapé de *Eucalyptus Citriodora* Hook ** Rodapé *Pinus Elliottii*

Fonte: Elaborado pela autora.

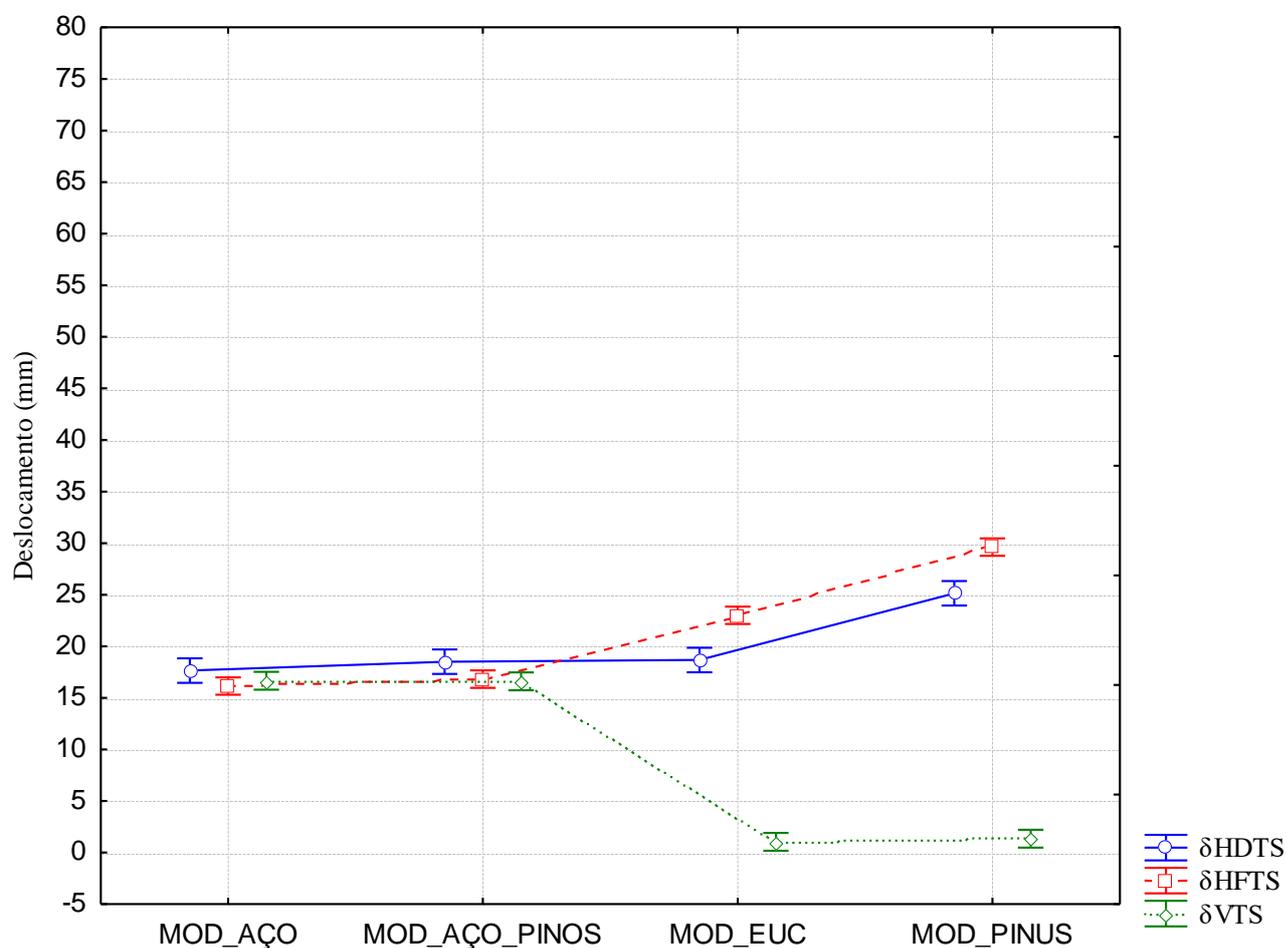
Já para os modelos MOD_EUC e MOD_PINUS em que a posição do montante é contrária, os deslocamentos maiores foram observados no ensaio para fora, e os menores

para dentro, com a madeira de *Pinus Elliottii* apresentando deslocamentos maiores que a madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook*.

Quanto ao ensaio vertical, é possível observar também a influência da maior inércia dos travessões de madeira em relação aos travessões de aço, sendo que os deslocamentos nos modelos de madeira foram, consideravelmente, menores que nos modelos de aço.

Pode-se observar claramente o que foi apresentado na Figura 63 para o travessão superior e na Figura 64 para o travessão intermediário.

Figura 63: Descolamentos para o travessão superior, conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009



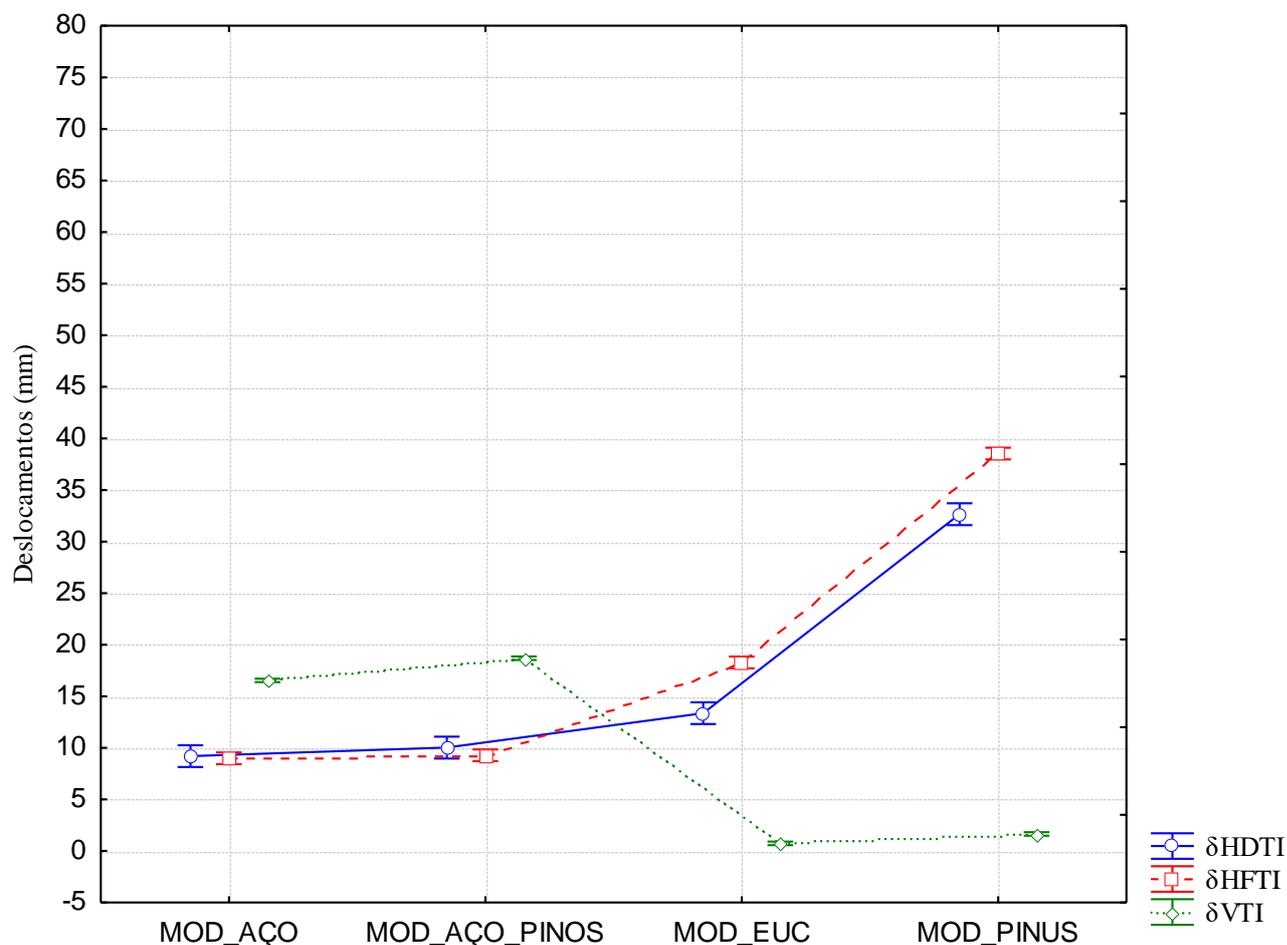
δ HDTS: deslocamento horizontal para dentro no travessão superior;

δ HFST: deslocamento horizontal para fora no travessão superior;

δ VTS: deslocamento vertical para o travessão superior.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 64: Descolamentos para o travessão intermediário conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009



δ HDTI: deslocamento horizontal para dentro no travessão intermediário;

δ HFTI: deslocamento horizontal para fora no travessão intermediário;

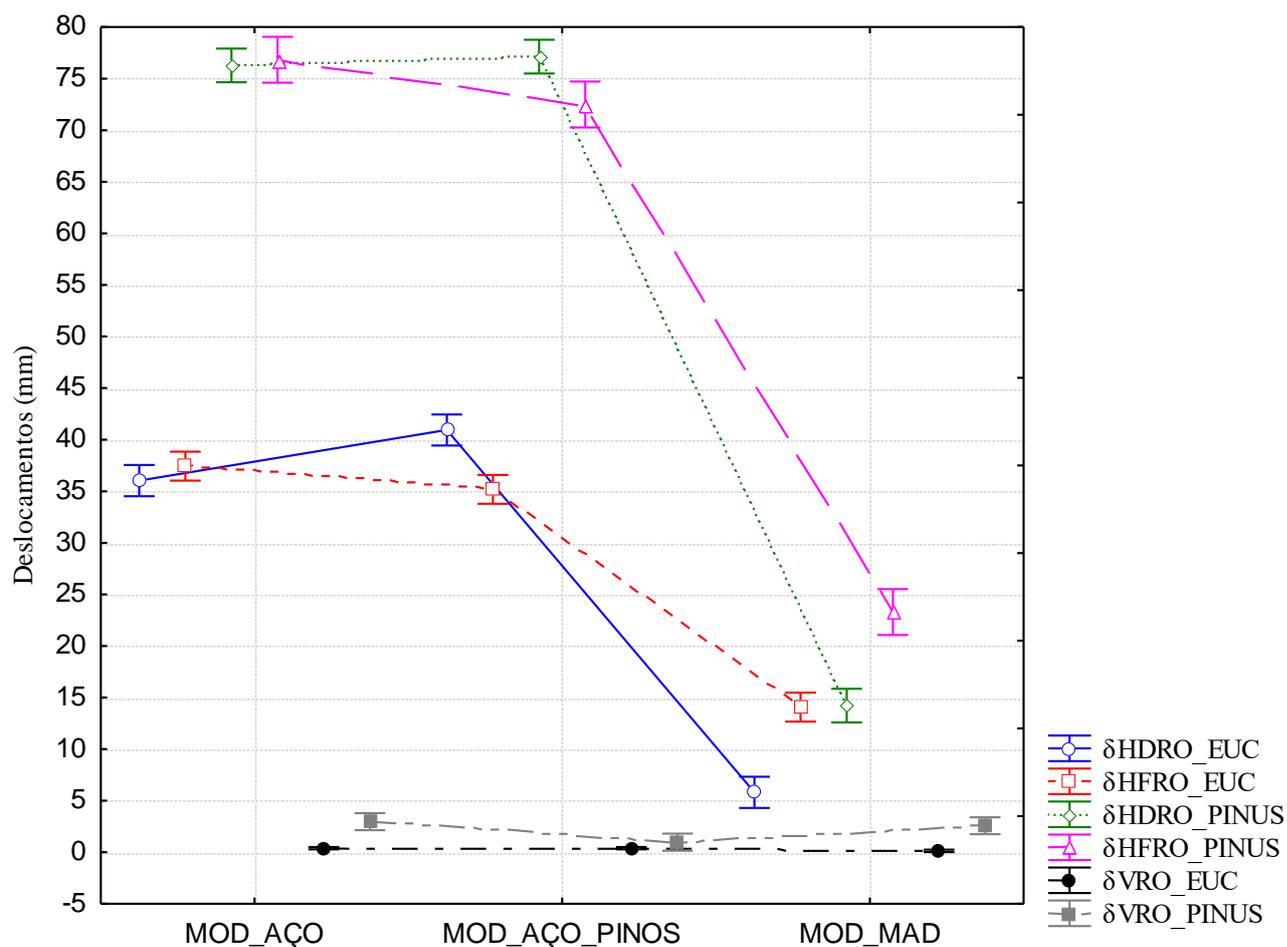
δ VTI: deslocamento vertical para o travessão intermediário.

Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto aos pinos de fixação nos ensaios pela norma da Austrália e Nova Zelândia, foi observada uma influência contrária dos ensaios pela norma Europeia, nesse caso a estrutura com pinos apresentou um deslocamento levemente maior que na estrutura sem pinos.

O elemento de rodapé alternou entre uma influência positiva e negativa dos pinos, ou seja, deslocamentos inferiores com deslocamentos superiores, Figura 65.

Figura 65: Descolamentos para o rodapé conforme ensaio 3 – AS/NZS 4994.1:2009



δ HDRO_EUC: deslocamento horizontal para dentro no rodapé com madeira *Eucalyptus Citriodora Hook*;

δ HFRO_EUC: deslocamento horizontal para fora no rodapé com madeira *Eucalyptus Citriodora Hook*;

δ HDRO_PINUS: deslocamento horizontal para dentro no rodapé com madeira *Pinus Elliottii*;

δ HFRO_PINUS: deslocamento horizontal para fora no rodapé com madeira *Pinus Elliottii*;

δ VRO_EUC: Deslocamento vertical para o rodapé com madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC);

δ VRO_PINUS: deslocamento vertical para o rodapé com madeira de *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS).

Fonte: Elaborado pela autora.

O critério de aceitação para os deslocamentos limites segundo a AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) é inferior a 101 mm, no caso, todos os elementos atenderam a esse critério.

Não foram verificadas falhas e ou ruptura nos sistemas durante os ensaios de acordo com a metodologia definida pela AS/NZS 4994.1:2009.

Os valores dos deslocamentos durante a aplicação da pré-carga e a carga podem ser observados no Apêndice B, Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29, Tabela 30 e Tabela 31.

4.2 Resultados para a aplicação da metodologia de ensaio estático padrão

São apresentados neste item, os resultados da aplicação do ensaio estático padrão para as normas que não apresentavam metodologia de ensaio definida OSHA 1926.502 e *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4).

4.2.1 Ensaios estáticos conforme as cargas da OSHA 1926.502 (ensaio 4)

O ensaio conforme as cargas da OSHA 1926.502 (ensaio 4) consistiu na aplicação de carga horizontal e vertical na estrutura. O critério de aceitação definido no item 3.7 para o carregamento horizontal é 150 mm, já para o vertical, segundo a OSHA 1926.502 (OSHA, 2016) é que a estrutura não deforme para uma altura inferior a 100 cm.

Embora o critério definido para a norma da OSHA 1926.502 seja de 150 mm, observa-se que a maior média de deslocamentos máximos foi de 41,863 mm, atendendo até ao critério da norma europeia EN 13374 de 55 mm (DIN, 2013).

A Tabela 10 apresenta as médias dos ensaios e o desvio padrão. Para os deslocamentos, tanto horizontal como vertical, os critérios foram atendidos.

Tabela 10: Deslocamentos médios Ensaio 4 – OSHA 1926.502

	Horizontal (890 N)		Vertical (890 N)	
	δ_{TS} (mm)		δ_{TS} (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	24,330	0,243	24,063	0,076
MOD_AÇO PINOS	28,903	1,041	22,530	0,064
MOD_EUC	29,210	0,151	1,847	0,176
MOD_PINUS	41,863	0,563	1,330	0,239

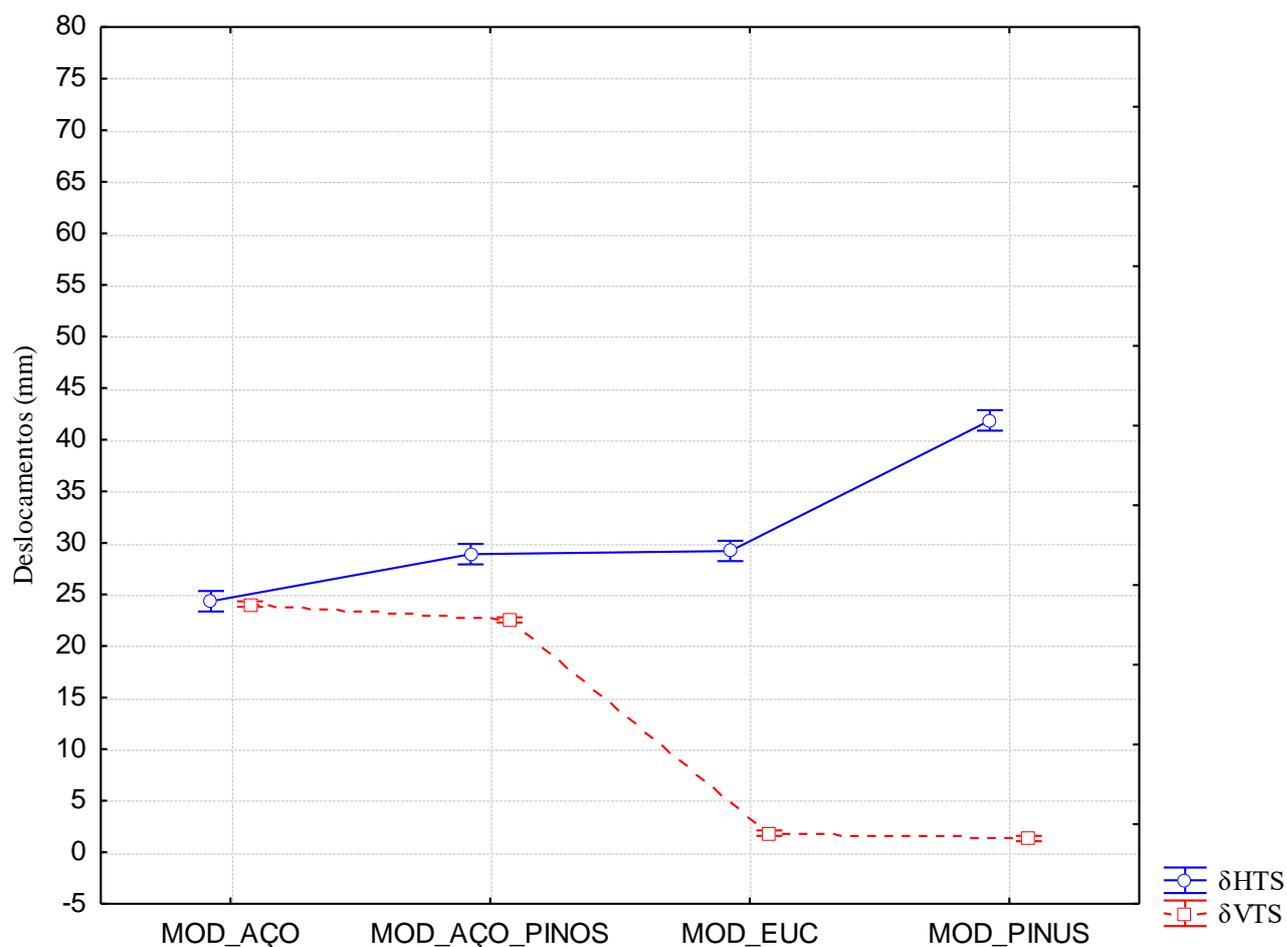
TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Novamente, a madeira *Pinus Elliottii* apresentou deslocamentos maiores que a madeira da espécie *Eucalyptus Citriodora Hook* e também os demais modelos analisados, quando as cargas aplicadas no sentido horizontal, Figura 66.

A influência da maior inércia do perfil é observada nos ensaios, principalmente para o ensaio vertical com os elementos de madeira que apresentam uma altura maior em relação a base com deslocamentos bem inferiores aos registrados nos modelos de aço.

Figura 66: Deslocamentos para o travessão superior conforme ensaio 4 - OSHA 1926.502



δ HTS: deslocamento horizontal no travessão superior;

δ VTS: deslocamento vertical para o travessão superior.

Fonte: Elaborado pela autora.

No ensaio horizontal pela norma da OSHA 1926.502, os pinos de fixação dos elementos de travessão superior, para os modelos MOD_AÇO_PINOS, apresentaram um deslocamento maior que na estrutura MOD_AÇO.

Os relatórios para o ensaio 4 são apresentados no Apêndice C deste trabalho, Tabela 32, Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35.

4.2.2 Ensaios estáticos para carregamento simultâneo definido pela OSHA 1926.502 (ensaio 5)

As cargas indicadas pela OSHA 1926.502, foram ensaiadas de forma simultânea no valor de 890 N, 666 N e 222N, para os elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, respectivamente.

Os critérios de aceitação definidos neste trabalho foram de deslocamentos limites de 150 mm, 110 mm e 37 mm, respectivamente, definidos no item 3.7.

A Tabela 11 apresenta as médias e desvio padrão para os ensaios realizados, sendo que os deslocamentos limites definidos foram atendidos.

A Figura 67 representa os deslocamentos medidos nos ensaios para os diferentes modelos.

Tabela 11: Deslocamentos médios Ensaio 5 – OSHA 1926.502

	δ_{TS} (mm)		δ_{TI} (mm)		δ_{RO} (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	29,797	1,692	13,900	0,424	14,507	0,946
MOD_AÇO_PINOS	29,710	0,796	15,530	0,735	12,593	0,779
MOD_EUC	34,717	0,840	16,433	0,375	3,92	0,519
MOD_PINUS	40,183	1,561	31,197	0,701	7,397	0,735

Fonte: Elaborado pela autora.

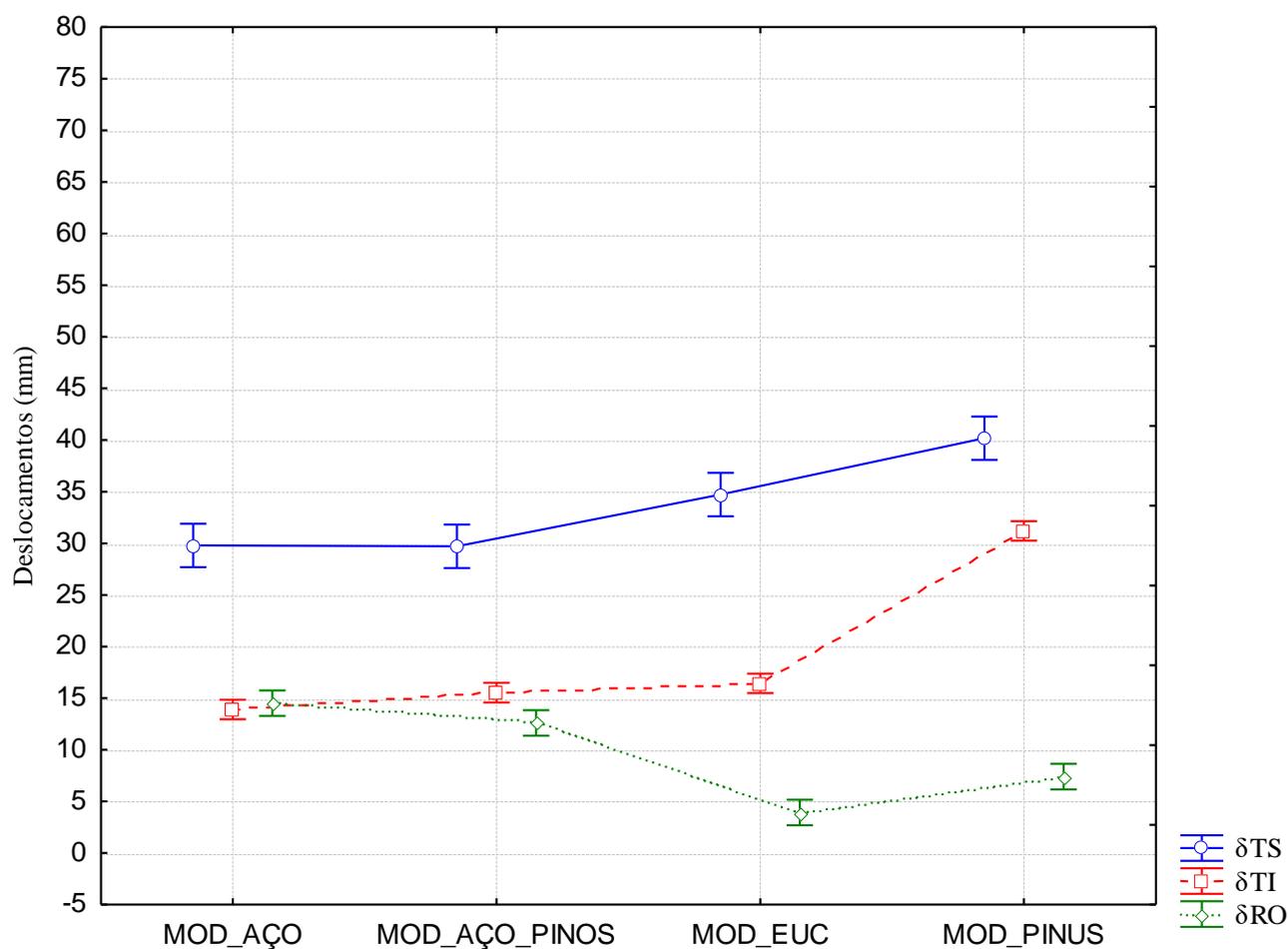
Novamente, mesmo o critério definido de 150 mm para a norma da OSHA 1926.502, para o travessão superior, observa-se que a maior média de deslocamentos máximos foi de 40,183 mm, atendendo ao critério da norma europeia EN 13374 de 55 mm (DIN,2013).

Os pinos de fixação apresentaram influência em deslocamentos levemente inferior no travessão superior e no rodapé, mesma tendência não foi observada no travessão intermediário.

Para o caso do MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, foi ensaiado o conjunto, com cargas atuantes simultâneas. Nesse caso, o rodapé adotado foi o de *Eucalyptus Citriodora Hook*, que apresentou um comportamento mais adequado em relação ao *Pinus Elliottii*.

Os relatórios para o ensaio 5 são apresentados no Apêndice C deste trabalho, Tabela 36, Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39.

Figura 67: Deslocamentos para os modelos conforme ensaio 5 – OSHA 1926.502



δTS: deslocamento no travessão superior;
 δTI: deslocamento no travessão intermediário;
 δRO: deslocamento no rodapé.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Ensaios estáticos conforme as cargas do *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) (ensaio 6)

Para o código de Québec (S-2.1, r.4) ensaio 6, os carregamentos horizontal e vertical aplicados foram 900 N e 450 N e os deslocamentos limites são de, aproximadamente, 150 mm e 75 mm, respectivamente, conforme definido no item 3.7.

Observa-se que os deslocamentos médios apresentados na Tabela 12 atenderam aos deslocamentos limites, exceto para um travessão do MOD_PINUS que ocorreu ruptura no nó (Figura 68). O material foi descartado e realizada a troca, possibilitando a continuidade dos ensaios.

Tabela 12: Deslocamentos médios Ensaio 6 – código do Québec (S-2.1, r.4)

	Horizontal (900 N)		Vertical (450 N)	
	δ_{TS} (mm)		δ_{TS} (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	23,050	1,132	13,190	0,209
MOD_AÇO_PINOS	26,063	0,630	12,110	0,115
MOD_EUC	22,757	0,734	3,430	0,335
MOD_PINUS*	42,237	0,568	1,813	0,084

TS = Travessão superior

* Quebra com aproximadamente 780 N (horizontal)

Fonte: Elaborado pela autora.

Como, para o ensaio com as cargas definidas pela OSHA 1926.502, o ensaio pelas cargas do Québec S-2.1, r.4, com o critério de deslocamento definido de 150 mm, para o travessão superior, resultou em uma média de deslocamentos máximos de 42,237 mm, atendendo até ao critério da norma europeia EN 13374 de 55 mm (DIN, 2013).

Figura 68: Nó na madeira *Pinus Elliottii*

Fonte: Dados da pesquisa

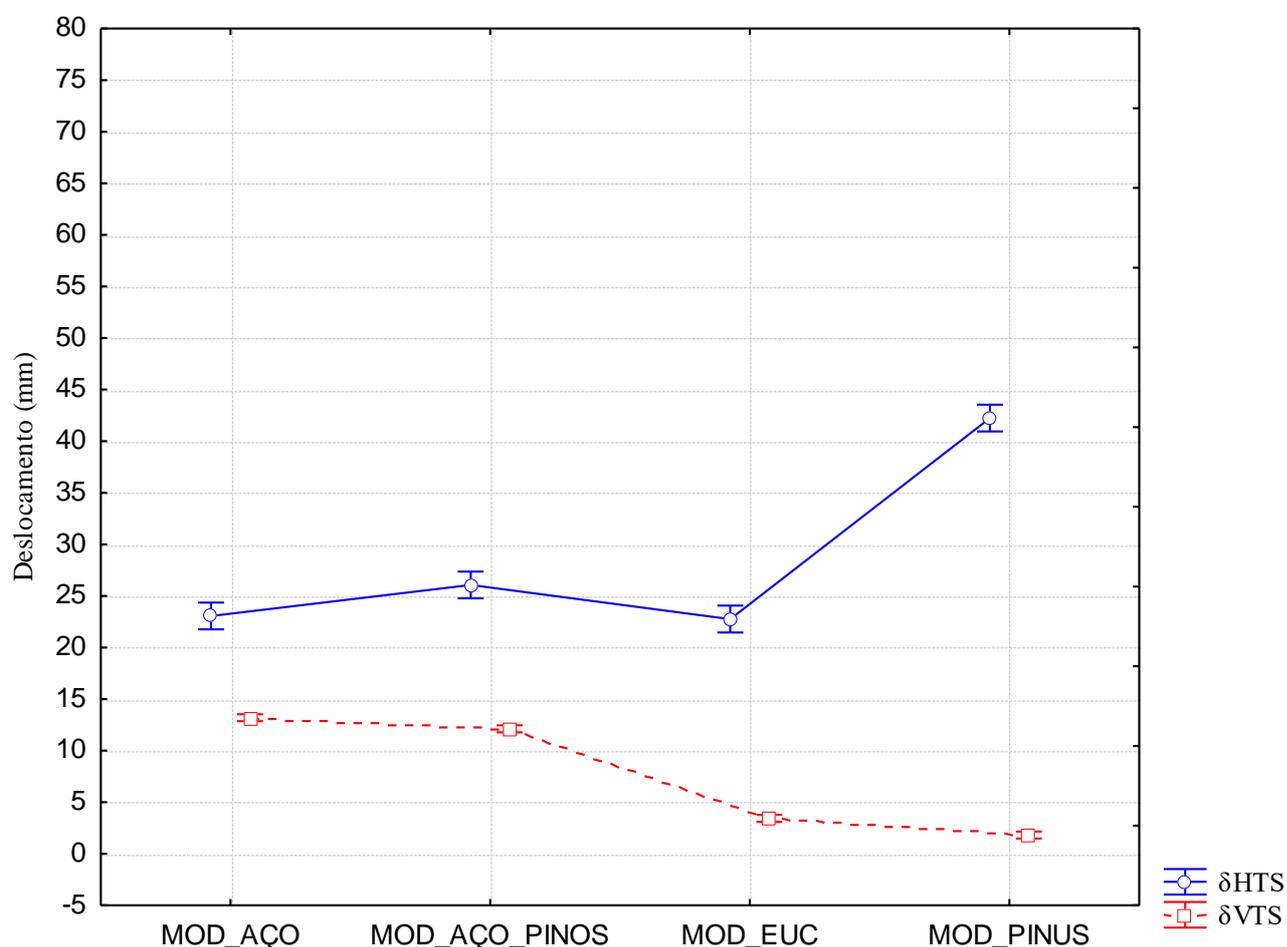
A Figura 69 apresenta os deslocamentos para os diferentes modelos, observa-se novamente a madeira *Pinus Elliottii* com deslocamentos superiores aos outros modelos e a

influência da seção de maior inércia nos ensaios verticais, principalmente para os modelos de madeira que possuem a maior seção do perfil na orientação vertical.

Para o travessão superior, as cargas aplicadas pelo ensaio 4 da OSHA 1926.502 e o ensaio 5 do código do Québec (S-2.1, r.4) foram 900 N e 890N, respectivamente, observa-se, nas Figura 66 e Figura 69, o comportamento similar.

Para o ensaio vertical, a segunda normativa teve a carga aplicada no valor de 50% da primeira, também podendo ser observado a variação nas figuras citadas, essa observação comprova que a aplicação das cargas se comporta de forma estática.

Figura 69: Deslocamentos para o travessão superior conforme ensaio 6 - código do Québec (S-2.1, r.4)



δ_{HTS} : deslocamento horizontal no travessão superior;

δ_{VTS} : deslocamento vertical para o travessão superior.

Fonte: Elaborado pela autora.

Lan e Daigle (2009), em ensaios realizados pelo código de Québec *Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1, r.6), já observaram a necessidade de madeira de boa

qualidade e a influência da seção de maior inércia para receber os carregamentos, assim como Bobick, McKenzie e Kau (2010), o que confirma os resultados observados neste trabalho.

Quanto aos pinos de fixação novamente o MOD_AÇO_PINOS apresentaram deslocamentos maiores que o MOD_AÇO.

Novamente, a madeira de *Pinus Elliottii* obteve um desempenho inferior a madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook*, por conter nós e imperfeições, assim como deslocamentos mais elevados que os demais modelos.

Os relatórios dos ensaios realizados para o código do Québec podem ser analisados no Apêndice D, Tabela 40, Tabela 41, Tabela 42 e Tabela 43.

4.3 Resultados para os Ensaios Propostos para a aplicação no Brasil

Os resultados para os ensaios propostos para a aplicação no Brasil definidos no Capítulo 3, os quais seguiram metodologia apresentada no item 3.6, são apresentados neste item.

4.3.1 Ensaios estáticos para carregamento definido pela NR 18 e RTP 01 (ensaio 7)

Foi realizado o ensaio com carregamento definido pela NR 18, versão 2018, e RTP 01, norma vigente na publicação deste trabalho, de 1500 N/m (150 kg/m), para os modelos analisados. Com isso, foram aplicadas as cargas de 3600 N para os modelos MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO e 2250 N para os modelos MOD_EUC e MOD_PINUS.

As estruturas MOD_AÇO_PINOS e MOD_PINUS quebraram com, aproximadamente, 2900 N a 3000 N para a primeira e 1560 N para a segunda, Figura 70.

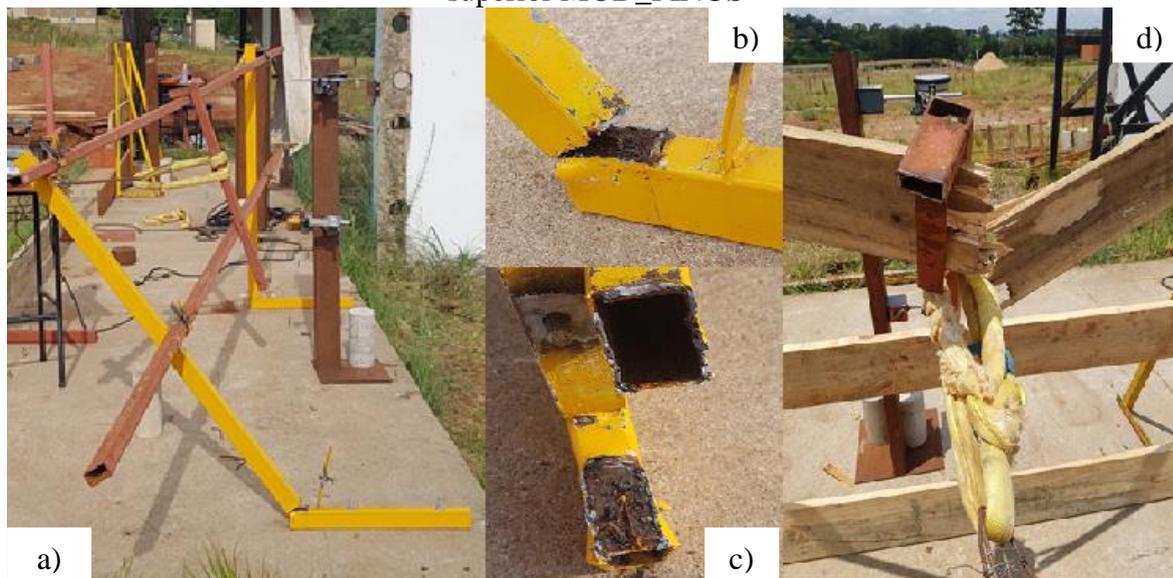
No caso da ruptura no montante metálico do MOD_AÇO_PINOS, avalia-se que ocorreu uma falha na solda entre o montante e o elemento de fixação na laje. No caso da estrutura de madeira, houve ruptura do travessão superior.

O deslocamento limite para a estrutura MOD_AÇO_PINOS e MOD_AÇO seria de 300 mm, conforme definido no item 3.7. Segundo esse valor, o MOD_AÇO atendeu ao critério de deslocamento limite, porém, verificou-se falha na estrutura após o ensaio, com

deslocamento lateral de um dos montantes, Figura 71. Considera-se o critério adotado como deslocamento limite elevado para as estruturas.

A Tabela 13 apresenta os resultados para os ensaios realizados segundo a NR 18, versão 2018, e RTP 01.

Figura 70: Ruptura MOD_AÇO_PINOS e MOD_PINUS. a) vista lateral da ruptura do MOD_AÇO_PINOS; b) e c) detalhe do elemento de fixação; d) ruptura do travessão superior MOD_PINUS



Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 13: Deslocamentos médios Ensaio 7 – NR 18 e RTP 01

	δ_{TS} (mm)		δ_{TI} (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	--	--	47,030	0,716
MOD_AÇO_PINOS	Ruptura com aproximadamente 2900 N a 3000 N			
MOD_EUC	51,887	0,442	31,240	0,266
MOD_PINUS	Ruptura com aproximadamente 1560 N			

TS = Travessão superior

TI = Travessão intermediário

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o MOD_AÇO, o último carregamento não foi possível realizar a medição pelo valor superior à capacidade do relógio comparador, maior que 80 mm. Com isso, o valor para a determinação da média ficou prejudicado.

O MOD_EUC atendeu ao deslocamento limite de 187,5 mm definido como critério de aceitação neste trabalho e não apresentou falhas e/ou ruptura no sistema. A média dos

valores dos deslocamentos de 51,887 mm para o travessão superior e 31,240 mm atenderiam aos critérios da norma europeia de deslocamentos limites de 55 mm (DIN, 2013).

Figura 71: Guarda-corpo MOD_AÇO: a) deslocamento na estrutura; b) Afrouxamento/falha no montante; c) Falha/fissura no montante



Fonte: Dados da pesquisa

Quanto aos pinos de fixação não foi possível avaliar a influência, visto que ocorreu a ruptura do MOD_AÇO_PINOS. Quanto à comparação das duas espécies de madeiras utilizadas, verificou-se que a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook* se mostra mais adequada para o uso nas estruturas, apresentando, resistência aos carregamentos, conforme Figura 72.

No Apêndice E, são apresentados os relatórios de ensaios para os modelos, Tabela 44, Tabela 45, Tabela 46 e Tabela 47.

Figura 72: Comparação modelos em madeira; a) e b) deslocamentos MOD_EUC; c) Ruptura MOD_PINUS



Fonte: Dados da pesquisa

4.3.2 Ensaios estáticos para carregamento definido pela NR18 (ensaio 8)

Para o ensaio, conforme a NR 18, versão 2020 (ensaio 8), com vigência a partir de 03 de janeiro de 2022, foram aplicadas as cargas de 2160 N (900 N/m), 1584 N (660 N/m) e 528 N (220 N/m) para os modelos MOD_AÇO_PINOS e MOD_PINOS, totalizando um valor de 4272 N. Os deslocamentos limites, considerados no item 3.7, de 360 mm, 264 mm e 88 mm para os elementos de travessão superior, intermediário e rodapé, respectivamente.

Para os modelos em madeira MOD_EUC e MOD_PINUS, as cargas aplicadas foram de 1350 N (900N/m), 990 N (660 N/m) e 330 N (220 N/m), totalizando 2670 N. Os

deslocamentos limites, considerados no item 3.7, de 225mm, 165mm e 55 mm, para os elementos de travessão superior, intermediário e rodapé, respectivamente.

Porém, a norma da NR 18 aprovada orienta que os deslocamentos limites do travessão superior sejam inferiores a 76 mm (BRASIL, 2020), critério mais exigente, considerado neste trabalho.

Como foi realizado o ensaio com carregamento simultâneo nos elementos, neste caso, para os modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS o rodapé utilizado foi de madeira *Eucalyptus Citriodora Hook*, que apresentou um melhor desempenho nos ensaios como já apresentado. A Tabela 14 apresenta os resultados médios e o desvio padrão para os modelos que não apresentaram ruptura.

Tabela 14: Deslocamentos médios Ensaio 8 – NR 18

	δ_{TS} (mm)		δ_{TI} (mm)		RO (mm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MOD_AÇO	76,730	3,540	43,143	1,839	40,143	0,337
MOD_AÇO_PINOS	Ruptura					
MOD_EUC	32,313	0,891	23,250	5,465	16,207	1,667
MOD_PINUS	Deslocamentos excessivos > 130 mm					

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

O modelo MOD_PINUS resistiu ao ensaio conforme NR 18 (BRASIL, 2020), apresentando deslocamentos excessivos que ultrapassaram a capacidade de medição dos relógios comparadores instalados. Com isso, foram avaliados os deslocamentos de forma aproximada com um paquímetro digital, verificando que os deslocamentos eram superiores a 130 mm, foi realizado uma medição na estrutura e interrompido o ensaio por não ter condições de avaliar os deslocamentos de forma precisa.

Considerando os deslocamentos limites em relação ao carregamento, esse modelo atenderia ao critério definido no item 3.7, porém, observa-se que os deslocamentos são elevados, Figura 73 a). Assim, não atenderia ao critério definido pela própria NR 18 de 76 mm.

O MOD_EUC apresentou deslocamentos considerados satisfatórios, inferiores ao MOD_AÇO, inclusive, atendendo requisitos da norma EN 13374:2013, porém, ao final do ensaio avaliou-se que ocorreram fissuras na madeira do travessão intermediário, nesse caso,

se ocorrer o carregamento da estrutura em obra, orienta-se a troca do material, Figura 73 b) e c). A Figura 73 também apresenta um comparativo entre as duas espécies de madeiras utilizadas, *Eucalyptus Citriodora Hook* e *Pinus Elliottii*, em que os deslocamentos da segunda são superiores aos da primeira.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para o modelo MOD_AÇO, foram atendidos os requisitos de deslocamento limite definidos no item 3.7, porém, o critério da norma de 76 mm foi ultrapassado para a média dos deslocamentos para o travessão superior, o modelo não apresentou falhas durante o carregamento.

O modelo MOD_AÇO_PINOS apresentou falha por esmagamento do perfil no elemento de ligação do montante com a laje e na solda de ligação, Figura 74. Não foi possível avaliar o valor da carga de ruptura para esse ensaio, pois ocorreu de forma brusca e como os carregamentos eram realizados em três relógios simultâneos com carregamentos

diferentes entre os três, dificultou a avaliação da carga de ruptura. Na Figura 74, c) observa-se também que o rodapé em madeira apresentou uma falha.

Figura 74: Ruptura no modelo MOD_AÇO_PINOS. a) Ruptura. b) falha por esmagamento do perfil. c) Fissura na solda da ligação e na madeira do rodapé



Fonte: Dados da pesquisa.

Novamente, em relação aos pinos de fixação, não foi possível avaliar a influência, visto que ocorreu a ruptura do MOD_AÇO_PINOS.

Observa-se novamente que a norma brasileira se encontra fora dos padrões de requisitos internacionais para as estruturas de guarda-corpos provisórios, mesmo em sua versão mais recente.

No Apêndice F, são apresentados os relatórios dos ensaios com os deslocamentos avaliados, Tabela 48, Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51.

5 DISCUSSÕES

No presente trabalho, foram analisadas normas nacionais e internacionais sobre guarda-corpos provisórios, utilizados para a segurança do trabalho na construção civil, a partir da pesquisa, verificou-se que as normas divergem entre si, sendo que o item com maior variação se refere ao modo de aplicação e ao valor da carga atuante na estrutura.

As metodologias de ensaios também apresentam divergências entre as normas analisadas, determinando como foco da pesquisa o desenvolvimento de um método de ensaio estático aplicável no Brasil.

Para atingir os objetivos deste trabalho foram realizados ensaios experimentais de acordo com as normas internacionais existentes e a partir desses ensaios com metodologia definida foi sugerido um ensaio padrão adotado para os diferentes carregamentos definidos nas normas de acordo com as solicitações impostas. A seguir, é apresentada uma discussão sobre observações e resultados alcançados para os ensaios realizados.

5.1 Análise das metodologias de ensaio conforme as normas

Foram realizados os ensaios das estruturas analisadas neste trabalho com diferentes normativas. A norma EN 13374:2013, ensaio 1 e ensaio 2; e a norma AS/NZS 4994.1:2009, ensaio 3, apresentam metodologias de ensaios definidas. A partir desses ensaios, foi determinado um método de ensaio padrão e aplicado para os carregamentos para as demais normas, OSHA 1926.502, ensaio 4 e ensaio 5; Québec S-2.1, r.4, ensaio 6; e para as propostas de ensaio com as versões disponíveis da NR 18, versão 2018 vigente, ensaio 7; e versão 2020 com vigência a partir de janeiro de 2022, ensaio 8.

Quanto ao ensaio 1 realizado de acordo com a EN 13374:2013, observou-se que a pré-carga e a carga adotadas no ensaio eram de mesmo valor, como já apresentado. Nesse caso, a pré-carga atendeu às necessidades de conter as folgas na estrutura. Esse critério não seria possível de ser utilizado nas demais normativas, visto que os valores seriam superiores.

O tempo de aplicação das cargas definido pela EN 13374:2013 se apresentou adequado, com a pré-carga aplicada durante 1 minuto, e a carga de teste com medição dos deslocamentos instantâneos.

O ensaio 2 foi realizado segundo critério do ELU da EN 13374:2013 em que ocorre a majoração das cargas de acordo com coeficientes de segurança.

Os ensaios, segundo os critérios definidos pela norma europeia, foram simples de se realizar, visto que os elementos eram analisados separadamente. Quando foi realizada uma tentativa de ensaio com carregamentos horizontais e verticais de forma simultânea nos três elementos horizontais, avaliou-se a impossibilidade de realização, visto que seriam necessários equipamentos adicionais para aplicação de carregamento e realização de medições de deslocamentos de forma simultânea. Por esse motivo não foram considerados no trabalho.

Para este trabalho, foi realizado apenas o ensaio de travessões, que era o foco de avaliação e considera-se o ponto mais desfavorável da estrutura para a realização dos ensaios com a avaliação de carregamentos horizontais no centro do vão.

Durante os ensaios, segundo a AS/NZS 4994.1:2009, ensaio 3, foram realizadas algumas avaliações que valem ser ressaltadas, ao aplicar a carga de 600 N, o deslocamento instantâneo e o deslocamento medido após 300s a 315s, são próximos, não havendo uma variação significativa, o que caracteriza o ensaio estático em regime elástico.

Os ensaios realizados pela norma AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) apresentaram deslocamentos inferiores a 101 mm, de forma que as estruturas atenderam aos requisitos de resistência da respectiva norma (AS/NZS, 2009a).

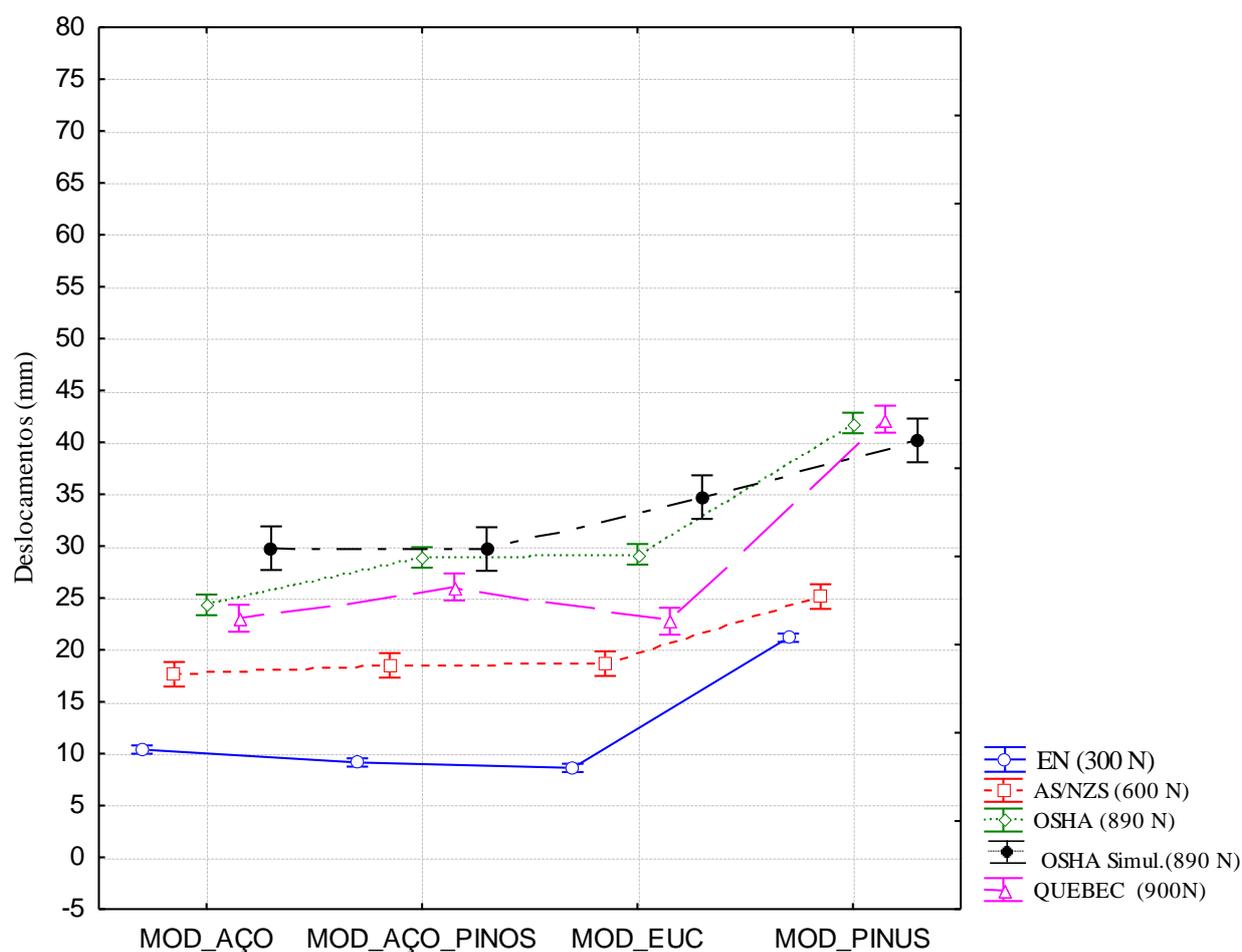
Os ensaios conforme OSHA 1926.502, ensaio 4 e ensaio 5, apresentaram deslocamentos inferiores aos definidos como critério de avaliação das estruturas, sendo que segundo está normativa, as estruturas atenderam aos requisitos quanto às cargas, resultando em deslocamentos inferiores ao critério de aceitação da norma europeia de 55 mm (DIN, 2013).

Para os ensaios, conforme o código do Québec (S-2.1, r.4), ensaio 6. O modelo MOD_PINUS apresentou ruptura em um travessão que continha um nó, com, aproximadamente, 780 N. Isso demonstra, mais uma vez, que a madeira *Pinus Elliottii* necessita de cuidados para ser utilizada em canteiro de obras. Ao se realizar a troca do material, a estrutura atendeu aos requisitos adotados de forma satisfatória, atendendo, assim como os ensaios com carregamentos da norma OSHA 1626.502, aos deslocamentos limites indicados pela norma EN 13374 (DIN, 2013) de 55 mm.

A Figura 75 apresenta um comparativo entre as diferentes normativas. Os deslocamentos apresentados são para o elemento de travessão superior, ensaio 1, com carga

de 300 N da norma europeia EN 13374:2013, ensaio 3 com carregamento de 600 N na direção horizontal para fora da norma da Austrália e Nova Zelândia, AS/NZS 4994.1:2009, OSHA 1926.502 ensaio 4 com carregamento horizontal de 890 N isolado e ensaio 5 com carregamentos simultâneos nos elementos horizontais e Québec (S-2.1, r.4) ensaio 6 com carga de 900N. As cargas atuais e com vigência a partir de 2022 para a NR 18 não puderam ser acrescentadas no gráfico por ausência de dados visto e porque houve ruptura dos elementos e deslocamentos excessivos.

Figura 75: Comparação entre as diferentes normas



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar o comportamento similar das estruturas conforme os carregamentos são aumentados, comprovando que os ensaios permaneceram na fase elástica. Também que a EN 13374:2013 é a norma que menos exige das estruturas, AS/NZS 4994.1:2009 como uma norma intermediária e as normas OSHA 1926.502 assim como da

norma do Québec (S-2.1, r.4) apresentam uma aproximação e se tornam mais exigentes que as demais.

Observa-se que os ensaios realizados da norma da OSHA 1926.502 com carregamentos simultâneos, ensaio 5, obtiveram deslocamentos maiores que as outras normas, principalmente o ensaio 4 pela OSHA com avaliação isolada do travessão superior (890 N) e para a norma do Québec S-2.1, r.4 com carga horizontal de 900 N e vertical de 450 N, sendo estas cargas horizontais simulares. Nesse caso, para o ensaio 5, as cargas de travessão intermediário (660 N) e rodapé (220 N) também foram aplicadas na estrutura de forma simultânea, contribuindo para deslocamentos superiores.

Ainda se observa que, pelas normas internacionais ensaiadas, as estruturas atenderam aos requisitos de resistência exigidos, já pela carga exigida pela NR 18, tanto versão 2018 como versão 2020, as estruturas apresentaram falhas e ruptura. Com isso, a carga exigida pela NR 18 e RTP 01, versão vigente de 2018, e a atualização da NR 18, versão 2020, com vigência a partir de 2022, tornam-se normas com exigência superior às normas internacionais.

Observa-se, resumidamente, que quanto ao atendimento das estruturas com os ensaios realizados com as diferentes normas, foram atendidos aos deslocamentos limites, com exceção do ensaio:

- a) Norma EN 13374 (DIN, 2013), ensaio 1, para o MOD_AÇO_PINOS elemento de rodapé com madeira *Pinus Elliottii*, que ultrapassou os deslocamentos na fase de ensaio de 60 mm e o deslocamento final limite de 55 mm;
- b) Norma do Québec (S-2.1, r.4), ensaio 6, para o MOD_PINUS com ruptura do travessão superior;
- c) Norma NR 18 versões 2018 e vigente, ensaio 7, MOD_AÇO_PINOS e MOD_PINUS apresentaram ruptura e MOD_AÇO que superou a capacidade de medição dos relógios, apresentando deslocamentos acima de 80 mm e deslocamento lateral e fissuras na ligação do montante;
- d) Norma NR 18, versão 2020 com vigência a partir de 2022, o MOD_AÇO_PINOS apresentou ruptura, o modelo MOD_AÇO e MOD_PINUS superaram os deslocamentos limites de 76 mm definidos pela norma, no MOD_EUC ocorreram fissuras na madeira do travessão intermediário.

González *et al.* (2011) já haviam realizados ensaios pela norma europeia com estruturas não atendendo aos requisitos de deslocamentos limites e González *et al.* (2015) avaliaram que o perfil 150 mm x 22 mm apresentou deslocamentos entre 93,69 mm e 101,69 mm para a carga de 0,3 kN acima dos deslocamentos apresentados neste trabalho. O perfil utilizado nesta pesquisa para o elemento de rodapé era de 200 mm x 25,4 mm. Com isso, os deslocamentos foram inferiores devido à maior seção. Tanto as estruturas de González *et al.* (2015) como as estruturas que apresentaram deslocamentos superiores aos deslocamentos limites tinham um espaçamento entre montantes de 2400 mm.

Lan e Daigle (2009) já haviam afirmado que nem sempre as estruturas de madeira iriam resistir aos esforços horizontais aplicados de 700 N, 800 N e 900 N. O que novamente foi verificado neste trabalho pela presença do nó que prejudicou o ensaio 6 para o MOD_PINUS.

Costella *et al.* (2014), que realizou ensaios de guarda-corpos para a norma brasileira, avaliou que quando submetidos a uma carga de 1500 N, todos os guarda-corpos apresentaram deslocamentos excessivos, considerando os deslocamentos limites, o valor indicado de $L/250$, sendo L o vão considerado no ensaio.

Também para ensaio das normas brasileiras, Baruffi (2017) realizou ensaios estáticos considerando como critérios de aceitação as orientações da NBR 14718 (ABNT, 2008) para guarda-corpos definitivos com deslocamentos máximos de 20 mm para carga de uso. Nesse caso, as conclusões foram que os deslocamentos limites foram superados e os modelos não atendem à prescrição da NBR 14718, porém, as estruturas ensaiadas em Baruffi (2017) foram modelos mais robustos que os desta pesquisa, não podendo realizar uma consideração direta dos deslocamentos limites observados em Baruffi (2017) com este trabalho.

Ao considerar o critério de aceitação adotado pela norma EN 13374 (DIN, 2013), com o limite de deslocamento para o ensaio estático de 55 mm, para o ensaio de Baruffi (2017), apenas a situação de carregamento de 1500 N/m para o MOD_MAD não seria aceitável.

Baruffi (2017) ainda considera que a NBR 14718 (ABNT, 2008) não é adequada para a avaliação de estruturas provisórias. Por esse motivo nem foi considerada nesta pesquisa. Foram verificadas folgas na estrutura que geraram deslocamentos excessivos. Avaliando que o carregamento de 1500 N/m, exigido pela versão atual da NR 18 e pela RTP 01, encontra-se fora dos padrões internacionais, já que nas demais normas pesquisadas, o maior carregamento não ultrapassa os 900 N.

Ainda, no ano de 2015, foi disponibilizada pelo Comitê Permanente Nacional sobre condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção, com texto de 8 de julho de 2015, no qual foram sugeridas algumas alterações da norma NR 18 para consulta nacional (CPN, 2015).

Quanto aos requisitos de resistência, foi sugerido que o travessão superior deveria resistir a 900 N (90 kgf), o travessão intermediário deve resistir a uma carga de 660 N (66 kgf) e o rodapé deve resistir a uma carga de 220 N (22 kgf). As cargas devem ser aplicadas nos pontos mais desfavoráveis das estruturas (CPN, 2015).

Na época, observou-se uma tendência da norma brasileira em adotar cargas similares a OSHA 1926.502. Na ocasião, as alterações sugeridas não foram aprovadas, vindo a ser aprovadas em 2020 com o incremento dessa carga por metro da estrutura, ensaio 8, deste trabalho que entrará em vigor a partir de 3 de janeiro de 2022.

Nesse caso, realizou-se o ensaio 5 pelas cargas definidas pela OSHA 1926.502 e similares às sugestões do Comitê Permanente Nacional em 2015. As cargas foram aplicadas horizontalmente, de forma simultâneas, nos elementos de travessão superior, intermediário e rodapé, totalizando 1780 N, considerando este um critério mais exigente que os demais ensaios realizados, conforme apresentado na Figura 75.

Mesmo com carregamento inferior ao indicado pela NR 18, versão 2018, e RTP 01 e NR 18, versão 2020, se retirada a carga sugerida por metro da estrutura, com a aplicação simultânea dos carregamentos, trata-se de um critério mais exigente que as normas internacionais. Observa-se que para o ensaio 5 com as cargas da OSHA 1926.502 similares a versão disponibilizada para a consulta nacional em 2015 as estruturas atenderam aos deslocamentos limites, assim como nas demais normas avaliadas.

Avalia-se essas cargas como adequadas para avaliação das estruturas. As estruturas, nas demais normas atenderam às solicitações impostas, vindo a falhar nos dois ensaios realizados de acordo com as normas brasileiras NR 18, versão 2018, juntamente com a RTP 01 e a versão da NR 18 de 2020 com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, ensaio 7 e ensaio 8.

5.2 Análise dos modelos ensaiados

Os modelos ensaiados neste trabalho foram referentes a duas estruturas com montantes e travessões de aço, com distância entre montantes de 2,40 m, utilizando pinos de

fixação para os elementos de travessão superior, intermediário e rodapé, chamado, neste trabalho, de MOD_AÇO_PINOS e sem os respectivos pinos chamado, neste trabalho, de MOD_AÇO. Para essas estruturas, os elementos de rodapé utilizados foram de madeira *Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Citriodora Hook*.

Ainda, foram ensaiadas estruturas com montantes em aço do tipo mão francesa, adotando travessão superior, travessão intermediário e rodapé em madeira, também em *Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Citriodora Hook*, chamados, respectivamente, neste trabalho de MOD_PINUS e MOD_EUC com espaçamento entre montantes de 1,50 m. Os detalhes construtivos dos modelos são apresentados no item 3.1.

Para a estrutura de aço, em alguns casos, visualizou-se que a estrutura, MOD_AÇO_PINOS, com os pinos de fixação dos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé apresentou deslocamentos menores quanto aos ensaios realizados pela norma europeia EN 13374:2013 no ELS. Contudo, quanto às outras normas, AS/NZS 4994.1:2009, OSHA 1926.502 e Québec (S-2.1, r.4), e a própria norma europeia EN 13374:2013 no ELU, em que os carregamentos aplicados foram maiores, os deslocamentos foram, igualmente, maiores para as estruturas com o pino de fixação.

O que pode ser observado é que o elemento de montante tem uma espessura menor no MOD_AÇO_PINOS de 50x30x2,1 mm do que o MOD_AÇO de 50x30x2,4 mm, a influência da rigidez do perfil com espessura maior pode ter contribuído para os deslocamentos inferiores em determinados ensaios. O pino de travamento é uma boa opção que limita o deslocamento lateral dos travessões, mas não apresentou influência direta nos valores dos deslocamentos horizontais.

Para as estruturas com madeira, observou-se, nos ensaios realizados, que a estrutura de mão francesa com madeira de *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS) apresenta um deslocamento maior se comparado com a estrutura de mão francesa com madeira de *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC) na maioria dos casos. Atribui-se esse fato à caracterização como conífera e dicotiledôneas com os valores de módulo de elasticidades de 3500 MPa e 9500 MPa, para uma classe C20 e D20, respectivamente, segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997).

Pode-se visualizar também, nos diferentes ensaios, que a utilização da madeira de *Pinus Elliottii* apresenta uma curvatura acentuada quando carregada, tanto nos travessões e rodapés do modelo MOD_PINUS como nos rodapés dos modelos com travessões metálicos e rodapé de madeira, MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, essa curvatura é ilustrada na Figura 73.

Orienta-se que quando for utilizada a madeira como material em estruturas de guarda-corpos provisórios que essas sejam madeiras novas e de boa qualidade, sem a presença de nós e falhas que possam comprometer a segurança, consideradas como madeiras estruturais, como também orientado nos trabalhos realizados por Lan e Daigle (2009) e Bobick, McKenzie e Kau (2010).

Em relação aos vãos adotados nos modelos analisados, à comparação das estruturas de montantes e travessões de aço com vão de 2,40 m e estruturas de montantes de aço e travessões de madeira com vão de 1,50 m, observou-se que, mesmo com o vão menor, as estruturas com montantes de aço e travessões de madeira apresentaram deslocamentos maiores, principalmente com a madeira *Pinus Elliottii* (MOD_PINUS). Já a madeira *Eucalyptus Citriodora Hook* (MOD_EUC) apresentou um comportamento similar com as estruturas em aço (MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS).

Para evitar que grandes vãos sejam adotados nos sistemas de proteção de periferias, indica-se também que a norma apresente uma máxima distância entre montantes a ser considerada em projetos, variando conforme a adoção do material utilizado.

Assim, sugere-se que as estruturas tenham definidas limitações de comprimento de vãos, o que se acredita ser um bom critério a ser considerado nas normativas. Orienta-se que quando forem utilizados travessões de aço, sejam adotadas distâncias máximas entre os montantes de 2.40 m, conforme critério adotado internacionalmente (OSHA 1926.502), em outros trabalhos apresentados na revisão sistêmica como de González *et al.* (2011) e González (2015), e, também, como adotado nos projetos no município de Passo Fundo – RS, que foram, conseqüentemente, utilizados nos ensaios para este trabalho.

E quando os travessões forem utilizados com o material de madeira, que esse critério seja de 1,5 m, como já orienta a RTP 01 e, também, como é adotado no município de Passo Fundo - RS e utilizado como padrão nos ensaios deste trabalho. Lan e Daigle (2009) adotaram espaçamentos máximo de 1,8 m, porém, os elementos tinham uma seção de 5 cm x 10 cm, uma seção com maior inércia no sentido do carregamento.

Outro critério que auxilia nos deslocamentos inferiores e que deve ser observado juntamente com a distância entre os vãos é a influência da maior inércia do perfil. Essa observação foi avaliada no trabalho com a realização dos ensaios verticais, principalmente para os elementos de travessões de madeira em relação aos travessões de aço, sendo que os deslocamentos nos modelos de madeira foram, consideravelmente, menores que nos modelos de aço.

Considera-se que na concepção das estruturas deve-se avaliar a maior inércia dos elementos estruturais para receber as ações horizontais, que apresentam maior solicitação nas estruturas de guarda-corpos, esse critério também foi indicado pelos autores Lan e Daigle (2009) e Galy e Lan (2020).

Mais um critério a ser apontado quanto à concepção das estruturas é a observação realizada nos ensaios com carregamento para fora e para dentro, definido pela AS/NZS 4994.1:2009, já apontado neste trabalho. Para os modelos MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS, os deslocamentos foram maiores no sentido para dentro. Nesse caso, as estruturas estão instaladas corretamente para a contenção de quedas em periferias.

Já no carregamento para dentro, os modelos apresentaram uma chapa em formato de L para apoiar o travessão. Essa chapa não apresenta a rigidez como um perfil tubular, como o montante, com isso, os resultados foram com deslocamentos maiores.

Para os modelos com a utilização da mão francesa, MOD_EUC e MOD_PINUS, ocorreu o contrário, os esforços maiores foram no sentido para fora. A mão francesa que sustenta o montante encontra-se para dentro da periferia, o que auxiliou nos deslocamentos maiores no sentido para fora.

Esse critério deve ser considerado na fase de concepção das estruturas, pois para o caso do MOD_EUC e MOD_PINUS os maiores deslocamentos ocorreram no sentido de queda da periferia, mesmo não sendo uma diferença alta. As estruturas atenderam aos critérios de aceitação de deslocamentos limites.

Essa observação do posicionamento do travessão em relação ao montante, e da rigidez dos elementos é um ponto fundamental a ser considerado em projetos de estruturas de guarda-corpos provisórios de modo a conter o maior esforço no sentido da possível queda em periferias. O código do Québec S-2.1, r.4 (QUÉBEC, 2021) já apresenta a orientação de que os travessões sejam instalados na parte interna dos montantes.

Avaliando a ruptura e/ou falhas das estruturas ensaiadas, quantos aos ensaios realizados pela NR 18, versão de 2018, vigente, e a nova NR 18, versão 2020, com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022, houve ruptura nos dois ensaios para o MOD_AÇO_PINOS.

O MOD_AÇO apresentou um afrouxamento/falha no montante com um deslocamento lateral e fissura na ligação entre o elemento que realiza a ancoragem na laje com elemento vertical do montante para a versão de 2018 da NR 18 (ensaio 7). Para a versão de 2020 (ensaio 8), o modelo atendeu aos deslocamentos definidos para o ensaio, porém,

não atendeu ao critério da norma de deslocamento limite de 76 mm para o elemento de travessão superior.

Após a análise da ruptura do MOD_AÇO_PINOS, observa-se que, assim como Bobick, McKenzie e Kau (2010) e Galy (2021) indicaram um cuidado com a fixação da estrutura na laje, é imprescindível que seja observado um reforço na solda de ligação entre o elemento de ligação de ancoragem e o elemento vertical do montante ou, como sugestão deste trabalho, até um método de fixação das estruturas previsto no momento de concretagem da laje, deixando uma espera para a fixação dos montantes.

Na avaliação dos modelos MOD_EUC e MOD_PINUS para os ensaios da NR 18, versão de 2018 vigente (ensaio 7), e a versão 2020 com vigência a partir de 3 de janeiro de 2022 (ensaio 8), o MOD_EUC resistiu ao ensaio 7 de forma satisfatória atendendo aos critérios e apresentou fissuração da madeira no ensaio 8, ou seja, falha. Já o MOD_PINUS rompeu ao ensaio 7 e apresentou deslocamentos excessivos no ensaio 8.

Sendo novamente indicado o cuidado com a utilização de madeira adotada com características estruturais, a necessidade de limitação de vão para as estruturas, o posicionamento do travessão na parte interna do montante e a orientação do perfil de forma que a seção com maior inércia receba os carregamentos horizontais.

A partir das análises realizadas, pode-se considerar que tanto estruturas com aço, como as estruturas em madeira, podem ser consideradas nos projetos. Sendo necessário avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, a concepção do projeto estrutural definindo os esforços e dimensionamento correto das estruturas.

5.3 Análise do método de ensaio proposto

Neste trabalho, são realizadas as considerações para o método de ensaio padrão sugerido. Foram realizadas observações nos ensaios realizados a partir das normas EN 13374: 2013 e AS/NZS 4994.1 e sugerido um método de ensaio aplicado conforme as cargas definidas nas normas OSHA 1926.502, Québec S-2.1, r.4, NR 18 versão 2018 e RTP 01 e ainda, NR 18 versão 2020.

Avalia-se que a pré-carga de 100 N, conforme AS/NZS 4994 (AS/NZS, 2009a) é suficiente para conter folgas nos elementos. A pré-carga tem como objetivo conter possíveis folgas ou movimentações da estrutura quanto a uma etapa inicial do ensaio. Em Baruffi (2017), embora tenha sido aplicada uma carga inicial com a finalidade de conter folgas foi

verificado que foram as folgas no sistema que contribuíram para deslocamentos maiores, atribuindo como necessário um cuidado maior com as ligações e interfaces dos modelos.

No caso dos ensaios realizados, não se verificou que as folgas tiveram influência nos deslocamentos medidos nas estruturas, com isso, considerou-se adequada a pré-carga de 100 N.

Quanto ao tempo de aplicação da carga, as estruturas que apresentaram ruptura ocorreram antes da aplicação total da carga e os deslocamentos permaneciam iguais, mesmo que mantida a carga por um tempo superior, como na situação dos ensaios realizados pela norma AS/NZS 4994.1:2009, ensaio 3, em que se observou a manutenção da carga durante 300s a 315s não ocorrendo grandes variações nos deslocamentos, visto que o deslocamento na aplicação da carga é mantido nesse período. Portanto, para o carregamento estático, é válida a leitura de deslocamentos instantâneos, conforme EN 13374 (DIN, 2013).

Para este trabalho, foi realizado apenas o ensaio de travessões, que era o foco de avaliação e considera-se o ponto mais desfavorável da estrutura para a realização dos ensaios. A aplicação simultânea dos carregamentos horizontais nos elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé, pode ser considerado um critério mais exigente das estruturas, devido à geração de um momento fletor na base da estrutura, gerando maiores solicitações.

Foi realizada uma tentativa para incluir o carregamento vertical juntamente com os horizontais. Esse ensaio se tornou complexo devido à necessidade de equipamentos adicionais e avaliação simultânea das cargas aplicadas e deslocamentos das estruturas.

Com isso, avalia-se que o método padrão de ensaio estático definido neste trabalho é válido de acordo com os diversos ensaios realizados. É imprescindível uma orientação normativa das metodologias de ensaios e critérios de aceitação para a validação das estruturas, visto que diante dos ensaios realizados, as estruturas atenderam aos requisitos de aceitação, porém, com a aplicação das cargas nacionais, essas não resistiram.

6 ESPECIFICAÇÃO DE ENSAIO PROPOSTA PARA ADEQUAÇÃO DA NR 18

Como resultado final deste trabalho, após apresentar a metodologia adotada e os resultados com a pesquisa, o presente item apresenta uma sugestão de ensaio estático para avaliar o desempenho de estruturas de guarda-corpos provisórios para a construção civil, avaliando os elementos de travessão superior, travessão intermediário e rodapé de forma a adequar a NR 18, versão que entrará em vigor a partir de 03 de janeiro de 2022, conforme proposta apresentada no item 3.6.2.

Considerou-se que a NR 18, versão 2020, é uma norma com mais orientações que a versão 2018, indicando o ponto de aplicação da carga na estrutura e com parâmetros de deslocamentos limites. Como será a norma vigente a partir de 2022, torna-se mais adequada que a sugestão final deste trabalho seja com os carregamentos indicados por essa norma.

6.1 Sugestão de alteração no texto da NR 18 versão 2020

A proteção, quando constituída de anteparos rígidos em sistema de guarda-corpo e rodapé, deve atender aos seguintes requisitos:

- a) travessão superior a 1,2 m (um metro e vinte centímetros) de altura e resistência à carga horizontal de 900 N/m (novecentos newtons por metro), sendo que a deflexão máxima não deve ser superior a 0,076 m (setenta e seis milímetros);
- b) travessão intermediário a 0,7 m (setenta centímetros) de altura e resistência à carga horizontal de 660 N/m (seiscentos e sessenta newtons por metro);
- c) rodapé com altura mínima de 0,15 m (quinze centímetros) rente à superfície e resistência à carga horizontal de 220 N/m (duzentos e vinte newtons por metro);
- d) ter vãos entre travessas preenchidos com tela ou outro dispositivo que garanta o fechamento seguro da abertura;
- e) Que os travessões sejam instalados na parte interna dos montantes.

6.2 Procedimento de ensaio

A estrutura a ser ensaiada deve ser montada em protótipo em escala real, seguindo as orientações das especificações do projeto a ser instalado em canteiro de obras.

O ensaio para avaliar a resistência da estrutura deve ser realizado da seguinte forma:

- a) Aplicar de uma pré-carga de 100 N durante um minuto;
- b) Registrar os deslocamentos da estrutura (δ_1);
- c) Retirar o carregamento e zerar as medições dos deslocamentos;
- d) Aplicar a carga de ensaio simultânea durante um minuto;
 - a. Travessão superior: 900 N/m;
 - b. Travessão intermediário: 660 N/m;
 - c. Rodapé: 220 N/m;
- e) Registrar os deslocamentos na estrutura como (δ_2);
- f) Avaliar possíveis falhas e/ou ruptura do sistema.

6.3 Critérios de aceitação

O deslocamento com a atuação da carga de ensaio para o travessão superior não deve atingir o valor de 76 mm.

O sistema não pode apresentar falhas ou ruptura após os ensaios.

6.4 Relatório

O relatório de ensaio deve conter as seguintes informações:

- a) Especificação da quantidade de amostras e caracterização do material;
- b) Descrição e detalhamento da estrutura de guarda-corpos provisórios;
- c) Descrição e detalhamento dos equipamentos e procedimento de ensaio;
- d) Análise estática dos resultados e parecer final de aceitação ou não;
- e) Registro fotográfico da realização dos ensaios.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo propor um método de ensaio para as estruturas de guarda-corpos aplicável no Brasil. Para isso, foram realizados ensaios experimentais a partir de métodos existentes em normas internacionais e proposto um método de ensaio com o objetivo de avaliar as estruturas para uso provisório em obras.

O estudo experimental avaliou estruturas em aço e mistas com aço e madeira usuais em obras do município de Passo Fundo – RS. Em relação às estruturas utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- a) tanto a madeira como o aço podem ser utilizados se bem dimensionados;
- b) para o uso de estruturas de aço, recomenda-se um cuidado especial com os elementos de ligação e solda, onde os modelos ensaiados apresentaram falhas e/ou ruptura;
- c) ainda, quando utilizadas estruturas em aço, uma distância entre montantes de 2,4 m torna-se adequada, quando as estruturas forem dimensionadas corretamente;
- d) para os modelos com o uso da madeira, orienta-se um cuidado especial com a presença de nós e a classificação da madeira como estrutural para a utilização em estruturas de guarda-corpos provisórios;
- e) para o uso da madeira, a distância entre montantes utilizada nos projetos de 1,5 m, tornou-se mais adequada, como exigido na RTP 01; quando utilizada como rodapé, com vãos maiores, orienta-se um elemento com maior rigidez;
- f) para as diferentes espécies de madeira utilizadas (*Eucalyptus Citriodora Hook* e *Pinus Elliottii*), a primeira, MOD_EUC, apresentou um comportamento mais adequado com deslocamentos próximos aos modelos de aço (MOD_AÇO e MOD_AÇO_PINOS);
- g) verificou-se a influência da orientação do perfil com a seção de maior inércia para a aplicação dos carregamentos, sendo um critério de projeto a ser analisado pelos projetistas;
- h) outro critério que se considera válido quanto a especificações dos projetos é que os travessões sejam instalados na parte interna dos montantes, pois isso, faz com que a rigidez do montante auxilie o travessão a conter uma possível queda;
- i) ainda, verifica-se que os modelos de guarda-corpos ensaiados são seguros conforme a orientação das normas internacionais, porém conforme critérios nacionais não atenderiam os requisitos, vindo a falhar.

Em relação à metodologia de ensaio, as normas EN 13374:2013 e AS/NZS 4994.1:2009 diferem entre a forma de aplicação da carga, valor da carga, tempo de aplicação e critérios de aceitação.

Os estudos realizados neste trabalho, baseiam-se basicamente nessas duas normatizações. A metodologia adotada e proposta nesse trabalho fundamenta-se nessas normas analisadas, de modo que se pode concluir que:

- a) o método de ensaio proposto demonstrou-se válido;
- b) a pré-carga de 100 N é adequada para a finalidade de conter folgas do sistema;
- c) os carregamentos comportam-se de forma estática, com o tempo de aplicação podendo ser de um minuto;
- d) torna-se fundamental a verificação dessas estruturas por meio de ensaios experimentais e da definição de metodologias de ensaios em normativas de referência para atestar a segurança dos trabalhadores da construção civil;
- e) verifica-se que a norma brasileira NR 18, versão atual e com vigência a partir de 2022, aprovadas pelos órgãos competentes, encontram-se como uma norma mais exigentes diante dos padrões internacionais. Esses ensaios foram os que apresentaram falhas e/ou ruptura nos sistemas;
- f) recomenda-se que essa norma seja avaliada de forma a considerar os padrões antropométricos da população brasileira e a ocorrência de queda em estruturas.

7.1 Sugestão para trabalhos futuros

Pensando em trabalhos futuros, considera-se importante dar continuidade à proposta de metodologia de ensaios aqui desenvolvida, a fim de: desenvolver métodos de ensaios dinâmicos; considerar novas configurações de guarda-corpos; usar a biomecânica para avaliar mais detalhadamente do impacto do corpo humano na estrutura provisória para trabalho em altura.

REFERÊNCIAS

ARIA, M., CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, **Journal of Informetrics**, 11(4), p. 959-975, Elsevier, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: 1997.

_____. **NBR 14718**: Guarda-corpos para edificação. Rio de Janeiro: 2008.

AS/NZS, STANDARDS AUSTRALIA / NEW ZELAND STANDARDS. **AS/NZS 4994.1-2009**: Temporary Edge Protection. Part 1: General Requirements. Sydney, 2009a.

AS/NZS, STANDARDS AUSTRALIA / NEW ZELAND STANDARDS. **AS/NZS 4994.2-2009**: Temporary Edge Protection. Part 2: Roof edge protection – Installation and dismantling. Sydney, 2009b.

AS/NZS, STANDARDS AUSTRALIA / NEW ZELAND STANDARDS. **AS/NZS 4994.3-2010**: Temporary Edge Protection. Part 3: Installation and dismantling for edges other than roof edges. Sydney, 2010.

AS/NZS, STANDARDS AUSTRALIA / NEW ZELAND STANDARDS. **AS/NZS 4994.4**: Proteção temporária de periferia – Parte 4: Telas de proteção de perímetro, 2016.

BARUFFI, D., **Análise numérica e experimental de estruturas de guarda-corpos para a segurança do trabalho na construção civil**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2017.

BÍBLIA. Português. **Bíblia sagrada**. Tradução de Padre Antônio Pereira de Figueredo. A Igreja de Jesus Cristo dos Santos dos Últimos Dias Salt Lake City, Utah, EUA, 1914. Disponível em: <https://media.ldscdn.org/pdf/lds-scriptures/holy-bible/holy-bible-83800-por.pdf> acesso: 05 set. 2021.

BRASIL. **Lei 8.213, de 24 de julho de 1991**. Dispõe sobre os Planos de Benefícios da Previdência Social e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. 1991, p. 11. Disponível em: http://www.ipasm.mg.gov.br/arquivos/legislacoes/legislacao/leis/lei_8213.pdf > acesso: 07 ago. 2017.

BRASIL. Observatório da Segurança e Saúde no Trabalho. Disponível em: <https://smartlabbr.org/> Acesso em: 27 jul. 2021

BRASIL. **Ministério da Previdência Social**. AEPS - Anuário Estatístico do Ministério da Previdência Social 2017. Brasília, DF. Dezembro de 2018a, v. 24.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 18 – NR 18. Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção**. 2018b.

Disponível em: < <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-18.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 06 – NR 06. Equipamento de Proteção Individual - EPI.** 2018c. Disponível em: < <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-06.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 01 – NR 01. Disposições Gerais.** 2019a. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-01.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 35 – NR 35. Trabalho em Altura.** 2019b. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-35.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

BOBICK, T. G.; MCKENZIE, E. A.; KAU, T., Evaluation of guardrail systems for preventing falls through roof and floor holes. **Journal of safety research**, v. 41, n. 3, p. 203-211, 2010.

BRIDI, M. E. *et al.* Identificação de práticas de gestão da segurança e saúde no trabalho em obras de construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p.43-58, jul./set. 2013.

COSTELLA, M. F.; JUNGES, F. C.; PILZ, S. E. Avaliação do cumprimento da NR-18 em função do porte de obra residencial e proposta de lista de verificação da NR-18. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 87-102, jul./set. 2014.

COSTELLA, M.F *et al.* Ensaio Estático e Dinâmico de Proteções Coletivas Contra Quedas de Altura em Canteiros de Obras. In: XV Encontro Nacional De Tecnologia do Meio Ambiente Construído, 2014, Maceió. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_93.pdf> Acesso em: 26 abri. 2018.

COMITÊ PERMANENTE NACIONAL SOBRE CONDIÇÕES E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Brasil) (Org.). **Proposta de alteração do Item 18.13.** 2015.

COMITÊ PERMANENTE NACIONAL SOBRE CONDIÇÕES E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Brasil) (Org.). **Norma Regulamentadora n.º 18 Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção.** 2015. Disponível em: <http://www.cpn-nr18.com.br/uploads/propostas/andamentos/nr_18_consolidado_em_04082014_rev_em_26_2_2014_reunio_21_5_15.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2015.

DIEESE - Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (2020). **A Construção Civil e os Trabalhadores: panorama dos anos recentes.** São Paulo, SP. Julho, 2020. Disponível em:

<<https://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2020/estPesq95trabconstrucaocivil.pdf>>
Acesso em: 27 jul. 2021

DIN. STANDARDS COMMITTEE BUILDING AND CIVIL ENGINEERING. EN 13374. **Temporary edge protection systems**. Product specification. Test methods; European Standard EN 13374. 2013: Committee for Standardization. May, 2013.

ESCAMILLA, A. C.; GARCÍA, M. de las N. G.; PÉREZ, N. L.. Static load behavior and energy absorption of safety guardrails for construction works. **Revista de la Construcción. Journal of Construction**, v. 15, n. 2, p. 46-54, 2016.

FATTAL, S. G.; CATTANEO, L. E. **Investigation of guardrails for the protection of employees from occupational hazards**. 1976.

FUNDACENTRO. **Recomendação técnica de procedimentos 01: Medidas de proteção contra quedas de altura**. São Paulo, 2003. Disponível em:
<<http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/recomendacao-tecnica-de-procedimento/publicacao/detalhe/2012/9/rtp-01-medidas-de-protecao-contra-quedas-de-altura>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

GALY, B. In Situ Strength Testing of Temporary Steel Guardrails Installed on Existing Flat-Roof Parapets. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 26, n. 1, p. 04020047, 2021.

GALY, B.; LAN, A. Strength of temporary wooden guardrails installed on open joists and prefabricated walls. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 25, n. 2, 2020.

GONÇALVES L. B.; CRUZ V. M. C da. **Segurança e medicina do trabalho**. São Paulo: Yone Silva Pontes, 2010.

GONZÁLEZ M. N. *et al.* Comportamiento bajo cargas estáticas de sistemas provisionales de protección de borde realizados con elementos de acero/Behavior under static loads of temporary Edge protections ystems built with Steel elements. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 310, p. 283-296, 2011.

GONZÁLEZ, M. N. *et al.* Comportamiento de Sistemas Provisionales de Protección de Borde de polietileno de alta densidad frente a cargas estáticas y de impacto. **Informes de la Construcción**, v. 65, n. 529, p. 99-106, 2013.

GONZÁLEZ, M. N.; COBO, A.; CASTAÑO, A.; PRIETO, M.I. A comparison of the resistance of Temporary Edge Protection Systems to static and dynamic loads. **Informes de la Construcción**, v. 67, n. 538, p. 10.3989/ic. 13.161, 2015.

HSIAO, H.; SIMEONOV, P. Preventing falls from roofs: a critical review. **Ergonomics**, v. 44, n. 5, p. 537-561, 2001.

JOHNSON, H. M.; SINGH, A.; YOUNG, R. HF. Fall protection analysis for workers on residential roofs. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 5, p. 418-428, 1998.

JOKKAW, N.; SUTEECHARUWAT, P.; WEERAWETWAT, P. Measurement of Construction Workers' Feeling by Virtual Environment (VE) Technology for Guardrail Design in High-Rise Building Construction Projects. **Engineering Journal**, v. 21, n. 5, p. 161-177, 2017.

LAN, A.; DAIGLE, R. Development and validation of a method for evaluating temporary wooden guardrails built and installed on construction sites. **Safety science**, v. 47, n. 2, p. 215-226, 2009.

LAN, A., DAIGLE, R. Validation of on-site job-built guardrails with shoring jack as supports. **Informes de la Construcción**, v. 66, n. 534, 2014.

OSHA. Occupational safety and health administration. **Fall protection in construction**. Disponível em: <<https://www.osha.gov/SLTC/etools/construction/falls/guardrail.html>>. Acesso em: 23 set. 2015.

OSHA. Occupational safety and health administration. United States Department of Labour. **1926. 502: fall protection systems criteria and practices**. 2016. Disponível em: <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.502>> Acesso em: 27 jul. 2021.

PEÑALOZA, G. A.; FORMOSO, C. T.; SAURIN, T. A.; Evaluation of performance requirements for Temporary Edge Protection Systems (TEPS). **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 267-289, 2015.

POMARES, J. C., IRLES, R., SEGOVIA, E. G., BOIXADER, D. Barandillas de protección personal con sollicitación dinámica. **Informes de la Construcción**, v. 65, n. 530, p. 241-251, 2013.

QUÉBEC. CENTRE DE SERVICES PARTAGÉS, 2021. **Québec Safety Code for the Construction Industry S-2.1, r. 4**. LesPublicationsdu Québec, Gouvernementdu Québec, Québec, 2020. Disponível em: <<http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%204>> Acesso em: 27 jul. 2021.

SEBRAE, 2015. **CENÁRIOS PROSPECTIVOS**. O setor de construção no Brasil, de 2016 a 2018. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/06c6fd6c070c9fc2128072f868de06cb/\\$File/7531.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/06c6fd6c070c9fc2128072f868de06cb/$File/7531.pdf)> Acesso em: 7 fev. 2019.

RAJENDRAN, S.; GAMBATESE, J. Risk and financial impacts of prevention through design solutions. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 18, n. 1, p. 67-72, 2013.

SIDDULA, M. *et al.* Classifying construction site photos for roof detection: A machine-learning method towards automated measurement of safety performance on roof sites. **Construction Innovation**, 2016.

SIDDULA, M. *et al.* Unsupervised feature learning for objects of interest detection in cluttered construction roof site images. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 428-435, 2016.

SULOWSKI, A. C. Collective Fall Protection for Construction Workers. **Informes de la Construcción**, v. 66, n. 533, 2014.

ZLATAR T. *et al.* Falls from height: analysis of 114 cases. **Production**, **29**, 2019.
Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180091>.

APÊNDICE A

No apêndice A são apresentados os relatórios de ensaios realizados conforme orientações da norma europeia EN 13374:2013.

Tabela 15: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_AÇO_PINOS

Estado Limite de Serviço (ELS)					
		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) $(\delta_2-\delta_1)$ mm	Verificação $\delta < 55$ mm
TS	Ensaio 1	0,91	8,62	7,71	Atende
	Ensaio 2	1,01	9,47	8,46	Atende
	Ensaio 3	1,22	9,34	8,12	Atende
	Média	1,047	9,143	8,097	Atende
	Desvio padrão	0,129	0,374	0,307	--
TI		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) $(\delta_2-\delta_1)$ mm	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	1,35	3,06	1,71	Atende
	Ensaio 2	1,53	3,1	1,57	Atende
	Ensaio 3	1,34	2,88	1,54	Atende
	Média	1,407	3,013	1,607	Atende
Desvio padrão	0,087	0,096	0,074	--	
RO Eucalipto		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) $(\delta_2-\delta_1)$ (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	1,15	25,55	24,4	Atende
	Ensaio 2	2,04	24,97	22,93	Atende
	Ensaio 3	1,74	25,86	24,12	Atende
	Média	1,643	25,460	23,817	Atende
Desvio padrão	0,370	0,369	0,637	--	
RO Pinus		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) $(\delta_2-\delta_1)$ (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	8,62	65,88	57,26	Não atende
	Ensaio 2	8,64	63,89	55,25	Não atende
	Ensaio 3	11,68	72,23	60,55	Não atende
	Média	9,647	67,333	57,687	Não atende
Desvio padrão	1,438	3,556	2,185	--	

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_AÇO

Estado Limite de Serviço (ELS)					
		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) $(\delta_2 - \delta_1)$ mm	Verificação $\delta < 55$ mm
TS	Ensaio 1	0,93	10,52	9,59	Atende
	Ensaio 2	0,83	10,07	9,24	Atende
	Ensaio 3	0,58	10,59	10,01	Atende
	Média	0,780	10,393	9,613	Atende
	Desvio padrão	0,147	0,230	0,315	--
<hr/>					
		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) $(\delta_2 - \delta_1)$ mm	Verificação $\delta < 55$ mm
TI	Ensaio 1	2	8,52	6,52	Atende
	Ensaio 2	1,9	8,74	6,84	Atende
	Ensaio 3	2,13	8,78	6,65	Atende
	Média	2,010	8,680	6,670	Atende
	Desvio padrão	0,094	0,114	0,131	--
<hr/>					
		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) $(\delta_2 - \delta_1)$ (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
RO Eucalipto	Ensaio 1	1,22	18,2	16,98	Atende
	Ensaio 2	2,86	18,47	15,61	Atende
	Ensaio 3	2,8	19,38	16,58	Atende
	Média	2,293	18,683	16,390	Atende
	Desvio padrão	0,759	0,505	0,575	--
<hr/>					
		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) $(\delta_2 - \delta_1)$ (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
RO Pinus	Ensaio 1	6,98	43,34	36,36	Atende
	Ensaio 2	5,58	45,26	39,68	Atende
	Ensaio 3	4,99	42,97	37,98	Atende
	Média	5,850	43,857	38,007	Atende
	Desvio padrão	0,835	1,004	1,356	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 17: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_EUC

Estado Limite de Serviço (ELS)					
	Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) ($\delta_2 - \delta_1$) mm	Verificação $\delta < 55$ mm	
TS	Ensaio 1	0,37	9,23	8,86	Atende
	Ensaio 2	0,21	8,73	8,52	Atende
	Ensaio 3	0,57	9,04	8,47	Atende
	Média	0,383	9,000	8,617	Atende
	Desvio padrão	0,147	0,206	0,173	--
TI		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) ($\delta_2 - \delta_1$) mm	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	0,32	8,59	8,27	Atende
	Ensaio 2	0,21	8,16	7,95	Atende
	Ensaio 3	0,33	7,65	7,32	Atende
	Média	0,287	8,133	7,847	Atende
Desvio padrão	0,054	0,384	0,395	--	
RO		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) ($\delta_2 - \delta_1$) (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	0,05	5,49	5,44	Atende
	Ensaio 2	0,02	5,63	5,61	Atende
	Ensaio 3	0,08	5,77	5,69	Atende
	Média	0,050	5,630	5,580	Atende
Desvio padrão	0,024	0,114	0,104	--	

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 18: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 1a) – MOD_PINUS

Estado Limite de Serviço (ELS)					
		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) ($\delta_2 - \delta_1$) mm	Verificação $\delta < 55$ mm
TS	Ensaio 1	2,03	23,08	21,05	Atende
	Ensaio 2	2,12	23,48	21,36	Atende
	Ensaio 3	2,00	23,09	21,09	Atende
	Média	2,050	23,217	21,167	Atende
	Desvio padrão	0,051	0,186	0,138	--
TI		Horizontal (300N) δ_1 (mm)	Horizontal (300N) δ_2 (mm)	Horizontal (300N) ($\delta_2 - \delta_1$) mm	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	1,16	32,63	31,47	Atende
	Ensaio 2	0,35	31,98	31,63	Atende
	Ensaio 3	1,40	31,50	30,1	Atende
	Média	0,970	32,037	31,067	Atende
	Desvio padrão	0,449	0,463	0,687	--
RO		Horizontal (200N) δ_1 (mm)	Horizontal (200N) δ_2 (mm)	Horizontal (200N) ($\delta_2 - \delta_1$) (mm)	Verificação $\delta < 55$ mm
	Ensaio 1	0,39	6,88	6,49	Atende
	Ensaio 2	0,17	5,95	5,78	Atende
	Ensaio 3	0,24	6,75	6,51	Atende
	Média	0,267	6,527	6,26	Atende
	Desvio padrão	0,092	0,411	0,340	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 19: Ensaio conforme EN 13374:2013 (ensaio 2) - ELU

Estado Limite Último (ELU)								
	MOD_AÇO_PINOS		MOD_AÇO		MOD_EUC		MOD_PINUS	
	Horizontal (495N)	δ_{TS} (mm)	Horizontal (495N)	δ_{TS} (mm)	Horizontal (495N)	δ_{TS} (mm)	Horizontal (495N)	δ_{TS} (mm)
Ensaio 1	suportou	14,75	suportou	15,28	suportou	14,34	suportou	37,06
Ensaio 2	suportou	14,36	suportou	15,89	suportou	16,16	suportou	36,46
Ensaio 3	suportou	14,74	suportou	15,14	suportou	14,3	suportou	35,30
Média	--	14,617	--	15,437	--	14,933	--	36,273
Desvio padrão	--	0,182	--	0,326	--	0,868	--	0,731

TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os relatórios de ensaios para a norma da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4994.1:2009. Os ensaios apresentados estão na sequência: horizontal para fora, horizontal para dentro e vertical.

Tabela 20: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_AÇO_PINOS

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101$ mm)
TS	Ensaio 1	3,14	16,97	Atende
	Ensaio 2	2,81	16,69	Atende
	Ensaio 3	2,96	16,79	Atende
	Média	2,970	16,817	Atende
	Desvio padrão	0,135	0,116	--
TI	Ensaio 1	1,61	9,69	Atende
	Ensaio 2	1,67	9,17	Atende
	Ensaio 3	1,67	8,96	Atende
	Média	1,650	9,273	Atende
	Desvio padrão	0,028	0,307	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	6,21	35,12	Atende
	Ensaio 2	6,22	35,18	Atende
	Ensaio 3	6,43	35,24	Atende
	Média	6,287	35,180	Atende
	Desvio padrão	0,101	0,049	--
RO Pinus	Ensaio 1	10,85	70,84	Atende
	Ensaio 2	12,33	72,33	Atende
	Ensaio 3	12,62	74,32	Atende
	Média	11,933	72,497	Atende
	Desvio padrão	0,775	1,426	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 21: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_AÇO

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101$ mm)
TS	Ensaio 1	2,4	16,7	Atende
	Ensaio 2	2,74	15,57	Atende
	Ensaio 3	2,82	16,17	Atende
	Média	2,653	16,147	Atende
	Desvio padrão	0,182	0,462	--
TI	Ensaio 1	1,44	9,11	Atende
	Ensaio 2	1,60	8,97	Atende
	Ensaio 3	1,64	8,9	Atende
	Média	1,560	8,993	Atende
	Desvio padrão	0,086	0,087	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	6,83	38,67	Atende
	Ensaio 2	6,75	36,84	Atende
	Ensaio 3	6,38	36,80	Atende
	Média	6,653	37,437	Atende
	Desvio padrão	0,196	0,872	--
RO Pinus	Ensaio 1	12,52	78,85	Atende
	Ensaio 2	13,50	76,79	Atende
	Ensaio 3	14,22	74,87	Atende
	Média	13,413	76,837	Atende
	Desvio padrão	0,697	1,625	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	3,48	22,58	Atende
	Ensaio 2	4,09	23,76	Atende
	Ensaio 3	3,62	22,67	Atende
	Média	3,730	23,003	Atende
	Desvio padrão	0,261	0,536	--
TI	Ensaio 1	3,65	18,74	Atende
	Ensaio 2	3,81	18,14	Atende
	Ensaio 3	3,18	17,97	Atende
	Média	3,547	18,283	Atende
	Desvio padrão	0,267	0,330	--
RO	Ensaio 1	5,17	13,61	Atende
	Ensaio 2	3,4	15,59	Atende
	Ensaio 3	4,03	13,02	Atende
	Média	4,200	14,073	Atende
	Desvio padrão	0,733	1,099	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23: Ensaio horizontal para fora conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_PINUS

Deslocamentos - δ (mm)				
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	6,05	30,65	Atende
	Ensaio 2	5,1	28,9	Atende
	Ensaio 3	4,61	29,3	Atende
	Média	5,253	29,617	Atende
	Desvio padrão	0,598	0,749	--
TI	Ensaio 1	7,26	38,17	Atende
	Ensaio 2	7,89	39,27	Atende
	Ensaio 3	7,37	38,14	Atende
	Média	7,507	38,527	Atende
	Desvio padrão	0,275	0,526	--
RO	Ensaio 1	3,93	24,05	Atende
	Ensaio 2	3,60	22,84	Atende
	Ensaio 3	3,35	22,98	Atende
	Média	3,627	23,290	Atende
	Desvio padrão	0,238	0,540	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_AÇO_PINOS

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	2,03	18,38	Atende
	Ensaio 2	3,26	18,65	Atende
	Ensaio 3	3,00	18,48	Atende
	Média	2,763	18,503	Atende
	Desvio padrão	0,529	0,111	--
TI	Ensaio 1	1,69	10,15	Atende
	Ensaio 2	1,51	9,96	Atende
	Ensaio 3	1,77	9,97	Atende
	Média	1,657	10,027	Atende
	Desvio padrão	0,109	0,087	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	6,23	42,95	Atende
	Ensaio 2	7,36	39,71	Atende
	Ensaio 3	7,22	40,15	Atende
	Média	6,937	40,937	Atende
	Desvio padrão	0,503	1,435	--
RO Pinus	Ensaio 1	10,65	78,12	Atende
	Ensaio 2	13,61	76,87	Atende
	Ensaio 3	12,48	76,41	Atende
	Média	12,247	77,133	Atende
	Desvio padrão	1,220	0,723	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 25: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_AÇO

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101$ mm)
TS	Ensaio 1	3,03	17,84	Atende
	Ensaio 2	3,01	17,45	Atende
	Ensaio 3	2,99	17,65	Atende
	Média	3,010	17,647	Atende
	Desvio padrão	0,016	0,159	--
TI	Ensaio 1	1,56	9,19	Atende
	Ensaio 2	1,64	9,14	Atende
	Ensaio 3	1,74	9,26	Atende
	Média	1,647	9,197	Atende
	Desvio padrão	0,074	0,049	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	6,21	36,09	Atende
	Ensaio 2	6,71	36,48	Atende
	Ensaio 3	6,42	35,52	Atende
	Média	6,447	36,030	Atende
	Desvio padrão	0,205	0,394	--
RO Pinus	Ensaio 1	12,98	75,88	Atende
	Ensaio 2	13,49	75,42	Atende
	Ensaio 3	12,82	77,54	Atende
	Média	13,097	76,280	Atende
	Desvio padrão	0,286	0,911	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	4,13	19,27	Atende
	Ensaio 2	2,8	18,44	Atende
	Ensaio 3	2,93	18,30	Atende
	Média	3,287	18,670	Atende
	Desvio padrão	0,599	0,428	--
TI	Ensaio 1	2,35	13,62	Atende
	Ensaio 2	2,33	13,25	Atende
	Ensaio 3	2,21	13,21	Atende
	Média	2,297	13,360	Atende
	Desvio padrão	0,062	0,185	--
RO	Ensaio 1	0,82	6,15	Atende
	Ensaio 2	0,81	5,49	Atende
	Ensaio 3	0,82	5,78	Atende
	Média	0,817	5,807	Atende
	Desvio padrão	0,005	0,270	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27: Ensaio horizontal para dentro conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_PINUS

Deslocamentos - δ (mm)				
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	4,54	27,08	Atende
	Ensaio 2	4,04	24,11	Atende
	Ensaio 3	3,96	24,21	Atende
	Média	4,180	25,133	Atende
	Desvio padrão	0,257	1,377	--
TI	Ensaio 1	6,05	34,46	Atende
	Ensaio 2	5,08	31,72	Não atende
	Ensaio 3	4,86	31,78	Atende
	Média	5,330	32,653	Atende
	Desvio padrão	0,517	1,278	--
RO	Ensaio 1	1,77	15,8	Atende
	Ensaio 2	2,48	13,78	Atende
	Ensaio 3	2,05	13,08	Atende
	Média	2,100	14,220	Atende
	Desvio padrão	0,292	1,153	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 28: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) –
MOD_AÇO_PINOS

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	2,87	16,74	Atende
	Ensaio 2	2,73	16,56	Atende
	Ensaio 3	2,65	16,50	Atende
	Média	2,750	16,600	Atende
	Desvio padrão	0,091	0,102	--
TI	Ensaio 1	3,10	18,71	Atende
	Ensaio 2	3,01	18,75	Atende
	Ensaio 3	2,98	18,60	Atende
	Média	3,030	18,687	Atende
	Desvio padrão	0,051	0,063	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	0,14	0,34	Atende
	Ensaio 2	0,10	0,36	Atende
	Ensaio 3	0,09	0,49	Atende
	Média	0,110	0,397	Atende
	Desvio padrão	0,022	0,066	--
RO Pinus	Ensaio 1	0,19	0,85	Atende
	Ensaio 2	0,18	1,03	Atende
	Ensaio 3	0,29	1,05	Atende
	Média	0,220	0,977	Atende
	Desvio padrão	0,050	0,090	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 29: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_AÇO

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	3,07	15,19	Atende
	Ensaio 2	3,01	17,26	Atende
	Ensaio 3	2,99	17,52	Atende
	Média	3,023	16,657	Atende
	Desvio padrão	0,034	1,043	--
TI	Ensaio 1	2,98	16,48	Atende
	Ensaio 2	2,94	16,58	Atende
	Ensaio 3	3,02	16,54	Atende
	Média	2,980	16,533	Atende
	Desvio padrão	0,033	0,041	--
RO Eucalipto	Ensaio 1	0,23	0,37	Atende
	Ensaio 2	0,10	0,51	Atende
	Ensaio 3	0,09	0,3	Atende
	Média	0,140	0,393	Atende
	Desvio padrão	0,064	0,087	--
RO Pinus	Ensaio 1	0,54	2,07	Atende
	Ensaio 2	0,52	2,91	Atende
	Ensaio 3	0,42	3,91	Atende
	Média			Atende
	Desvio padrão			--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 30: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_EUC

		Deslocamentos - δ (mm)		
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	0,18	1,21	Atende
	Ensaio 2	0,07	1,11	Atende
	Ensaio 3	0,05	0,8	Atende
	Média	0,100	1,040	Atende
	Desvio padrão	0,057	0,175	--
TI	Ensaio 1	0,12	0,81	Atende
	Ensaio 2	0,1	0,74	Atende
	Ensaio 3	0,13	0,67	Atende
	Média	0,117	0,740	Atende
	Desvio padrão	0,012	0,057	--
RO	Ensaio 1	0,04	0,18	Atende
	Ensaio 2	0,05	0,12	Atende
	Ensaio 3	0,02	0,1	Atende
	Média	0,037	0,133	Atende
	Desvio padrão	0,012	0,034	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 31: Ensaio vertical conforme AS/NZS 4994.1:2009 (ensaio 3) – MOD_PINUS

Deslocamentos - δ (mm)				
		Pré-carga (100N)	Carga (600N)	Verificação ($\delta < 101\text{mm}$)
TS	Ensaio 1	0,24	1,38	Atende
	Ensaio 2	0,15	1,31	Atende
	Ensaio 3	0,17	1,34	Atende
	Média	0,187	1,343	Atende
	Desvio padrão	0,039	0,029	--
TI	Ensaio 1	0,35	1,91	Atende
	Ensaio 2	0,24	1,52	Atende
	Ensaio 3	0,22	1,51	Atende
	Média	0,270	1,647	Atende
	Desvio padrão	0,057	0,186	--
RO	Ensaio 1	0,19	2,53	Atende
	Ensaio 2	0,29	2,19	Atende
	Ensaio 3	0,27	2,99	Atende
	Média	0,250	2,570	Atende
	Desvio padrão	0,043	0,328	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE C

O apêndice C é destinado a apresentar os relatórios dos ensaios realizados segundo a norma dos Estados Unidos da América OSHA 1926.502, chamado de ensaio 4 e ensaio 5, neste trabalho.

Inicia-se a apresentação dos relatórios para o ensaio 4, considerando a aplicação de carga horizontal e vertical no travessão superior de forma isolada.

Tabela 32: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ AÇO_PINOS

Deslocamentos - δ_{TS} (mm)					
	Carga		Verificação		
	Horizontal (890N)	Vertical (890N)	$\delta_{TS} < 150$ mm	h > 100 cm	
Ensaio 1	29,77	22,49	Atende	117,751	Atende
Ensaio 2	29,5	22,48	Atende	117,752	Atende
Ensaio 3	27,44	22,62	Atende	117,738	Atende
Média	28,903	22,530	Atende	117,747	Atende
Desvio padrão	1,041	0,064	--	--	--

TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 33: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ AÇO

Deslocamentos - δ_{TS} (mm)					
	Carga		Verificação		
	Horizontal (890N)	Vertical (890N)	$\delta_{TS} < 150$ mm	h > 100 cm	
Ensaio 1	24,65	23,96	Atende	122,604	Atende
Ensaio 2	24,06	24,09	Atende	122,591	Atende
Ensaio 3	24,28	24,14	Atende	122,586	Atende
Média	24,330	24,063	Atende	122,594	Atende
Desvio padrão	0,243	0,076	--	--	--

TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 34: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ EUC

Deslocamentos - δ_{TS} (mm)					
	Carga		Verificação		
	Horizontal (890N)	Vertical (890N)	$\delta_{TS} < 150$ mm	h > 100 cm	
Ensaio 1	29,35	1,60	Atende	120,84	Atende
Ensaio 2	29,28	1,94	Atende	120,806	Atende
Ensaio 3	29,00	2,00	Atende	120,8	Atende
Média	29,210	1,847	Atende	120,815	Atende
Desvio padrão	0,151	0,176	--	--	--

TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 35: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 4) – MOD_ PINUS

Deslocamentos - δ_{TS} (mm)					
	Carga		Verificação		
	Horizontal (890N)	Vertical (890N)	$\delta_{TS} < 150$ mm	h > 100 cm	
Ensaio 1	41,27	1,66	Atende	122,834	Atende
Ensaio 2	41,7	1,10	Atende	122,89	Atende
Ensaio 3	42,62	1,23	Atende	122,877	Atende
Média	41,863	1,330	Atende	122,867	Atende
Desvio padrão	0,563	0,239	--	--	--

TS = Travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Na sequência são apresentados os relatórios para o ensaio 5, considerando a aplicação de carga horizontal no travessão superior, travessão intermediário e rodapé de forma simultânea.

Tabela 36: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_AÇO_PINOS

	Pré-carga 100 N			890 N	666 N	222 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} <$ 150 mm	$\delta_{TI} <$ 110 mm	$\delta_{RO} <$ 37 mm
Ensaio 1	2,24	2,01	4,83	30,47	16,17	13,26	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	3,37	2,09	4,75	28,61	14,5	11,5	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	3,27	2,35	4,87	30,05	15,92	13,02	Atende	Atende	Atende
Média	2,960	2,150	4,817	29,710	15,530	12,593	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,511	0,145	0,050	0,796	0,735	0,779	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 37: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_AÇO

	Pré-carga 100 N			890 N	666 N	222 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} <$ 150 mm	$\delta_{TI} <$ 110 mm	$\delta_{RO} <$ 37 mm
Ensaio 1	2,97	2,04	6,01	32,09	14,48	13,63	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	4,01	2,38	7,7	29,24	13,48	15,82	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	2,33	2	6,22	28,06	13,74	14,07	Atende	Atende	Atende
Média	3,103	2,140	6,643	29,797	13,900	14,507	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,692	0,170	0,752	1,692	0,424	0,946	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 38: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_EUC

	Pré-carga 100 N			890 N	666 N	222 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} < 150$ mm	$\delta_{TI} < 110$ mm	$\delta_{RO} < 37$ mm
Ensaio 1	4,86	1,32	1,65	35,66	16,83	3,23	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	3,57	1,29	1,02	33,62	15,93	4,05	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	4,41	2,26	1,91	34,87	16,54	4,48	Atende	Atende	Atende
Média	4,280	1,623	1,527	34,717	16,433	3,920	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,535	0,450	0,374	0,840	0,375	0,519	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 39: Ensaio conforme OSHA 1926.502 (ensaio 5) – MOD_PINUS

	Pré-carga 100 N			890 N	666 N	222 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} < 150$ mm	$\delta_{TI} < 110$ mm	$\delta_{RO} < 37$ mm
Ensaio 1	4,23	3,28	2,09	40	32,01	8,15	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	5,63	3,41	1,56	38,37	30,30	7,64	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	6,28	4,54	1,81	42,18	31,28	6,4	Atende	Atende	Atende
Média	5,380	3,743	1,820	40,183	31,197	7,397	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,855	0,566	0,216	1,561	0,701	0,735	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE D

Os relatórios para os ensaios realizados conforme o *Québec Safety Code for the Construction Industry* (S-2.1 r.4) encontram-se na sequência deste item.

Tabela 40: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ AÇO_PINOS

Deslocamentos - δ (mm)						
	Pré-carga		Carga		Verificação	
	Horizontal (100N)	Vertical (100N)	Horizontal (900N)	Vertical (450N)	$\delta_{TSH} < 150$ mm	$\delta_{TSV} < 75$ mm
Ensaio 1	3,5	2,72	26,93	12,26	Atende	Atende
Ensaio 2	3,05	2,78	25,81	11,98	Atende	Atende
Ensaio 3	3,22	2,72	25,45	12,09	Atende	Atende
Média	3,257	2,740	26,063	12,110	Atende	Atende
Desvio padrão	0,186	0,028	0,630	0,115	--	--

δ_{TSH} = deslocamento horizontal para o travessão superior

δ_{TSV} = deslocamento vertical para o travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 41: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ AÇO

Deslocamentos - δ (mm)						
	Pré-carga		Carga		Verificação	
	Horizontal (100N)	Vertical (100N)	Horizontal (900N)	Vertical (450N)	$\delta_{TSH} < 150$ mm	$\delta_{TSV} < 75$ mm
Ensaio 1	1,88	2,80	24,14	13,43	Atende	Atende
Ensaio 2	2,95	2,82	21,49	13,22	Atende	Atende
Ensaio 3	2,06	2,81	23,52	12,92	Atende	Atende
Média	2,297	2,810	23,050	13,190	Atende	Atende
Desvio padrão	0,468	0,008	1,132	0,209	--	--

δ_{TSH} = deslocamento horizontal para o travessão superior

δ_{TSV} = deslocamento vertical para o travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 42: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ EUC

Deslocamentos - δ (mm)						
	Pré-carga		Carga		Verificação	
	Horizontal (100N)	Vertical (100N)	Horizontal (900N)	Vertical (450N)	$\delta_{TSH} < 150$ mm	$\delta_{TSV} < 75$ mm
Ensaio 1	1,75	0,29	21,72	3,03	Atende	Atende
Ensaio 2	3,01	0,32	23,22	3,41	Atende	Atende
Ensaio 3	2,51	0,44	23,33	3,85	Atende	Atende
Média	2,423	0,350	22,757	3,430	Atende	Atende
Desvio padrão	0,518	0,065	0,734	0,335	--	--

δ_{TSH} = deslocamento horizontal para o travessão superior

δ_{TSV} = deslocamento vertical para o travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 43: Ensaio conforme Québec (S-2.1 r.4) (ensaio 6) – MOD_ PINUS

Deslocamentos - δ (mm)						
	Pré-carga		Carga		Verificação	
	Horizontal (100N)	Vertical (100N)	Horizontal (900N)	Vertical (450N)	$\delta_{TSH} < 150$ mm	$\delta_{TSV} < 75$ mm
Ensaio madeira nó	4,25	0,22	Ruptura com ≈ 780 N		Não atende	Não atende
Ensaio 1	4,25	0,23	42,91	1,7	Atende	Atende
Ensaio 2	3,85	0,27	41,52	1,84	Atende	Atende
Ensaio 3	4,49	0,29	42,28	1,9	Atende	Atende
Média	4,20	0,26	42,24	1,81	Atende	Atende
Desvio padrão	0,26	0,025	0,57	0,084	--	--

δ_{TSH} = deslocamento horizontal para o travessão superior

δ_{TSV} = deslocamento vertical para o travessão superior

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE E

Os relatórios de ensaios estáticos definidos para carregamento definido pela RTP 01 e NR 18 versão 2018.

Tabela 44: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_AÇO_PINOS

	Pré-carga (100 N)		Carga (3600 N)		Verificação	
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	$\delta_{TS}<300$ mm	$\delta_{TI}<300$ mm
Ensaio 1	2,64	1,10	Ruptura com aproximadamente 2900 - 3000 N		Não atende	Não atende
Média	2,640	1,100	--	--	--	--
Desvio padrão	--	--	--	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 45: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_AÇO

	Pré-carga (100 N)		Carga (3600 N)		Verificação	
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	$\delta_{TS}<300$ mm	$\delta_{TI}<300$ mm
Ensaio 1	1,35	0,54	76,65	46,76	Atende	Atende
Ensaio 2	1,89	0,58	74,95	46,32	Atende	Atende
Ensaio 3	1,03	0,43	> 80	48,01	Atende	Atende
Média	1,423	0,517	--	47,030	Atende	Atende
Desvio padrão	0,355	0,063	--	0,716	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 46: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_EUC

	Pré-carga (100 N)		Carga (2250 N)		Verificação	
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	$\delta_{TS}<187.5$ mm	$\delta_{TI}<187.5$ mm
Ensaio 1	2,36	1,16	51,37	31,58	Atende	Atende
Ensaio 2	2,72	1,43	52,45	30,93	Atende	Atende
Ensaio 3	2,13	1,20	51,84	31,21	Atende	Atende
Média	2,403	1,263	51,887	31,240	Atende	Atende
Desvio padrão	0,243	0,119	0,442	0,266	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 47: Ensaio conforme cargas da NR 18 e RTP 01 (ensaio 7) – MOD_PINUS

	Pré-carga (100 N)		Carga (2250 N)		Verificação	
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	$\delta_{TS}<187.5$ mm	$\delta_{TI}<187.5$ mm
Ensaio 1	3,37	2,77	Ruptura com aproximadamente 1560 N		Não atende	Não atende
Média	3,370	2,770	--	--	Não atende	Não atende
Desvio padrão	--	--	--	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE F

No apêndice F são apresentados os relatórios para os ensaios estáticos com os carregamentos definidos pela NR 18 versão 2020 com vigência a partir de 02 de agosto de 2021, chamado de ensaio 8 neste trabalho.

Tabela 48: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) –
MOD_AÇO_PINOS

	Pré-carga 100 N			2160 N	1584 N	528 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} < 360$ mm	$\delta_{TI} < 264$ mm	$\delta_{RO} < 88$ mm
Ensaio 1	3,12	1,42	8,55	Ruptura			Não atende		
Média	3,120	1,420	8,550	Ruptura			Não atende		
Desvio padrão	--	--	--	--	--	--	--		

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 49: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_AÇO

	Pré-carga 100 N			2160 N	1584 N	528 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} < 360$ mm	$\delta_{TI} < 264$ mm	$\delta_{RO} < 88$ mm
Ensaio 1	4,67	2,94	10,03	72,53	41,50	40,47	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	3,45	2,86	11,68	76,47	42,22	40,28	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	4,94	2,72	10,92	81,19	45,71	39,68	Atende	Atende	Atende
Média	4,353	2,840	10,877	76,730	43,143	40,143	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,648	0,091	0,674	3,540	1,839	0,337	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 50: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_EUC

	Pré-carga 100 N			1350 N	990 N	330 N	Verificação		
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	$\delta_{TS} <$ 225 mm	$\delta_{TI} <$ 165 mm	$\delta_{RO} <$ 55 mm
Ensaio 1	2,8	2,66	4,99	33,57	30,92	13,85	Atende	Atende	Atende
Ensaio 2	2,830	1,850	3,380	31,60	18,59	17,36	Atende	Atende	Atende
Ensaio 3	3,01	0,04	2,52	31,77	20,24	17,41	Atende	Atende	Atende
Média	2,880	1,517	3,630	32,313	23,250	16,207	Atende	Atende	Atende
Desvio padrão	0,093	1,095	1,024	0,891	5,465	1,667	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 51: Ensaio conforme cargas da NR 18, versão 2020 (ensaio 8) – MOD_PINUS

	Pré-carga 100 N			1350 N	990 N	330 N
	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)	δ_{TS} (mm)	δ_{TI} (mm)	δ_{RO} (mm)
Ensaio 1	10,86	0,84	0,71	>130	>130	--
Média	10,860	0,840	0,710	>130	>130	--
Desvio padrão	--	--	--	--	--	--

TS = Travessão superior

TI = Travessão inferior

RO = Rodapé

Fonte: Elaborado pela autora.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br