

## Análise do comportamento estrutural de ligações de base de porta-paletes de aço

**Marina Naomi Furukawa**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.



MARINA NAOMI FURUKAWA

**Análise do comportamento estrutural de ligações de base de  
porta-paletes de aço**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do Título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas).

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Tit. Maximiliano Malite

SÃO CARLOS

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F983a Furukawa, Marina Naomi  
Análise do comportamento estrutural de ligações  
de base de porta-paletes de aço / Marina Naomi  
Furukawa; orientador Maximiliano Malite. São Carlos,  
2024.

Dissertação (Mestrado) - Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de  
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2024.

1. Ligação de base. 2. Análise experimental. 3.  
Porta-paleta. 4. Comportamento semirrígido. 5. Rrigidez  
rotacional. 6. Perfil formado a frio. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Engenheira **MARINA NAOMI FURUKAWA**.

Título da dissertação: "Análise do comportamento estrutural de ligações de base de portapaletes de aço".

Data da defesa: 17/04/2024.

<u>Comissão Julgadora</u>	<u>Resultado</u>
<b>Prof. Titular Maximiliano Malite</b> (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	<u>APROVADA</u>
<b>Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista</b> (Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)	<u>APROVADA</u>
<b>Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho</b> (Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP)	<u>APROVADA</u>

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof Associado **Ricardo Carracedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**



## **AGRADECIMENTOS**

Dedico meus sinceros agradecimentos:

A Deus, pela sabedoria, amparo e amor concedidos ao longo de toda minha trajetória.

À minha família, meus pais Claudio e Solange e meus irmãos Caio e Thomaz, pelo companheirismo, incentivo, apoio e amor incondicionais.

Ao professor Maximiliano Malite, pela atenção, paciência e orientação excepcional no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao corpo técnico do Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial aos técnicos Amaury, Luiz Vareda e Fabiano.

Ao corpo técnico da Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial aos técnicos Flávio e Lombardi.

A todos os amigos do Departamento de Engenharia de Estruturas e aos amigos de longa data, pela amizade e apoio durante a pesquisa.

À NSF Tecnologia em Instalações Comerciais, pela doação dos materiais e apoio durante a pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e também do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – nº do Processo 131187/2022-8.



“Um pesquisador, eu? Oh, não use a palavra! –  
Sou somente *pesado* – de muitos quilos!  
Eu caio, caio sem parar  
E enfim chego ao fundo!”

Friedrich Nietzsche (1882)



## RESUMO

FURUKAWA, M. N. **Análise do comportamento estrutural de ligações de base de porta-paletes de aço.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Os porta-paletes seletivos se apresentam como uma das estruturas mais tradicionais de armazenamento, devido às vantagens econômicas e operacionais desse sistema, composto, em geral, por perfis de aço formados a frio. As ligações de base de colunas porta-paleta são tipicamente semirrígidas e, apesar da sua relevância na análise estrutural global do porta-paleta, observa-se a escassez de diretrizes em normas e em trabalhos da literatura acerca da complexa resposta estrutural dessas ligações. No âmbito normativo, de forma geral, há a recomendação de programas experimentais para obtenção de parâmetros de projeto dos arranjos estruturais de base dos porta-paletes. No entanto, as especificações normativas de ensaio são pouco acessíveis e apresentam inconsistências em suas diretrizes. Portanto, a presente pesquisa tem por objetivo projetar um modelo alternativo de ensaio para ligações de base de colunas porta-paletes e, com isso, realizar uma investigação experimental do comportamento mecânico dessas ligações. As análises experimentais validaram o modelo alternativo de ensaio proposto e evidenciaram o comportamento semirrígido dos dois modelos de ligação de base avaliados. Observou-se o papel fundamental da força de compressão de ensaio no comportamento da curva momento-rotação da ligação, nos modos de colapso característicos do arranjo estrutural de base, e nos parâmetros de rigidez rotacional e momento fletor resistente das amostras. Os parâmetros de projeto da ligação de base provenientes das especificações da norma australiana AS 4084:2012 se mostraram condizentes com os resultados experimentais. Todavia, o presente trabalho observou inconsistências e resultados contra-segurança nas diretrizes da norma europeia EN 15512:2009 e da norma americana ANSI/RMI MH16.1:2021. A análise comparativa dos dois modelos de ligação avaliados atesta que o comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes é delineado por parâmetros geométricos e construtivos, e.g. ancoragem da placa de base e *bracket*, e por fenômenos estruturais tipicamente não lineares, e.g. plastificação do aço, instabilidades na coluna porta-paleta, não linearidade de contato entre as peças e a presença de torção no arranjo estrutural de base.

Palavras-chave: ligação de base; análise experimental; porta-paleta; comportamento semirrígido; rigidez rotacional; perfil formado a frio; aço.



## ABSTRACT

FURUKAWA, M. N. **Analysis of the mechanical behavior of steel storage rack baseplate upright connections.** 2024. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2024.

One of the most traditional solutions to the storage market is steel storage racks, which are usually composed of cold-formed steel profiles and offer economic and operational advantages. Besides the non-negligible effects on the overall frame stability, currently available rack design specifications and studies do not provide enough guidelines for considering the influence of semi-rigid steel storage rack baseplate upright connection. The main specifications of storage rack design recommend testing to determine the baseplate stiffness and strength. However, several aspects of the set-up for standards test need clarification since they may lead to inaccurate results in some cases. Hence, the first part of this study aims to present an alternative test method to evaluate baseplate upright connections of steel storage racks. Finally, an experimental investigation is carried out to establish the flexural behavior of the baseplate connections. The experimental analysis, while also validating the proposed alternative test set-up, reveal the semi-rigidity of both test specimens evaluated in this study. The effect of the axial compression force on the behavior of the baseplate connections is examined experimentally by the moment-rotation curve, the failure mode pattern of the test specimens, and the baseplate stiffness and strength results. The experimental results are shown to be consistent with the Australian rack design specifications AS 4084:2012. On the other hand, the European Standard EN 15512:2009 and the American Standard ANSI/RMI MH16.1:2021 mislead to overestimated results. The experimental observations regarding the two test specimens reveal that the mechanical behavior of steel storage rack baseplate upright connection is determined by parameters such as the anchor bolt configuration and the bracket, and by non-linear structural effects exhibited as plastic deformations, column instability, contact non-linearity between the structural elements, and the presence of torsional effects in the baseplate assembly.

Keywords: baseplate connection; experimental analysis; storage rack; semi-rigid; stiffness; cold-formed steel.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 – Principais elementos de um porta-paleta seletivo.....	22
Figura 2-1 – Detalhes dos modos de falha dos componentes da estrutura porta-paleta que sofreram colapso, (a) flambagem lateral na coluna, (b) instabilidades na coluna conectada à base, (c) instabilidades na ligação de base.....	31
Figura 2-2 – Direções principais dos porta-paletes (a) direção do corredor (b) direção perpendicular ao corredor.....	32
Figura 2-3 – Efeitos de segunda ordem global e local .....	36
Figura 2-4 – Exemplos das variedades de perfurações nas colunas rack .....	37
Figura 2-5 – Seções transversais típicas de porta-paletes utilizadas em diversos estudos: das mais simples (a) às mais modernas (b).....	38
Figura 2-6 – Gráfico de tensões críticas por comprimento de meia onda indicando os modos de instabilidade .....	39
Figura 2-7 – Imperfeições geométricas a nível de seção transversal da coluna .....	40
Figura 2-8 – Detalhes das ligações de porta-paletes (a) longarina-coluna (b) coluna-contraventamento (c) coluna-base.....	40
Figura 2-9 – Detalhes das ligações BCC .....	42
Figura 2-10 – Ensaios experimentais propostos para estudo das ligações BCC (a) longarina em balanço ANSI/RMI MH16.1:2021 (b) efeito pôrtico AS 4084 (2012) .....	42
Figura 3-1 – Diferentes modelos de ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos....	48
Figura 3-2 – Modelo de deformação do concreto que ancora a ligação de base de porta-paletes seletivos, segundo formulação de Salmon <i>et al.</i> (1955).....	51
Figura 3-3- Configurações de placa de base estudadas por Sarawit e Pekoz (2002).....	52
Figura 3-4 – Deformações características das ligações de base de racks (a) deformação do piso de concreto, (b) flexão do <i>bracket</i> , (c) rotação de deformações locais da coluna, (d) rotação da placa de base por formação de rótulas plásticas .....	55
Figura 3-5 – Sistema estaticamente equivalente ao experimento da ligação de base .....	56
Figura 3-6 – Comparação das propostas de rigidez $K_u$ e $K_{ub}$ .....	56
Figura 3-7 – Comparação entre curvas experimentais de Gilbert e Rasmussen (2011) e propostas de rigidez da ligação de base da EN 15512:2009 e de Godley (2007) .....	57
Figura 3-8 – Quadro comparativo das propostas analíticas de rigidez rotacional de base .....	58
Figura 3-9 – Área efetiva da placa de base.....	59
Figura 3-10 – Ensaio experimental da ligação de base proposto pela EN 15512:2009 e FEM 10.2.02:2001.....	66
Figura 3-11- Aparatos experimentais para garantir as exigências de ensaio da EN 15512:2009 .....	71
Figura 3-12- Forças e deslocamentos do ensaio de ligação de base de colunas porta-paleta proposto pela EN 15512:2009 .....	71
Figura 3-13 - Ensaio experimental da ligação de base proposto pela AS 4084:2012 .....	73
Figura 3-14 - Posição dos transdutores responsáveis por medir a rotação da ligação de base. ....	75
Figura 3-15 - Ensaio experimental da ligação de base proposto pela ANSI/RMI MH16-1:2021 .....	75
Figura 3-16 - Forças e deslocamentos do ensaio de ligação de base de colunas porta-paleta proposto pela ANSI/RMI MH16-1:2021 .....	77

Figura 3-17 – Análise experimental de Roure <i>et al.</i> (2016) aplicando o método de ensaio da ANSI/RMI MH16-1:2021 .....	79
Figura 3-18 – Vista em planta do aparato experimental – Método Alternativo 01 .....	81
Figura 3-19 – Forças e deslocamentos – Método Alternativo 01 .....	82
Figura 3-20 – Curva M-θ do Método Alternativo 01 .....	83
Figura 3-21 – Vista em planta do aparato experimental – Método Alternativo 02 .....	84
Figura 3-22 – Aparato que conecta o Macaco nº2 e o bloco de concreto – Método Alternativo 02.....	84
Figura 3-23 – Forças e deslocamentos – Método Alternativo 02.....	85
Figura 3-24 – Modos de falha (a) instabilidade local na coluna (b) rótulas plásticas na placa de base.....	87
Figura 3-25 – Diferentes arranjos estruturais ensaiados por Firouzianhaij <i>et al.</i> (2022).....	88
Figura 3-26 – Aparato experimental – Método Alternativo 03, (a) Ensaio, (b) Registro do ensaio, (c) Forças e deslocamentos .....	89
Figura 3-27 – Relação bilinear que define a rigidez secante da ligação de base .....	93
Figura 3-28 – Relação bilinear que define a rigidez secante da ligação de base .....	94
Figura 3-29 – Análise dos dados experimentais de Roure <i>et al.</i> (2016).....	96
Figura 3-30 – Comportamento da rigidez da ligação de base de Firouzianhaij <i>et al.</i> (2022)...	97
Figura 3-31 – Proposta para cálculo do momento fletor último da ligação.....	99
Figura 3-32 – Gráfico $M_b \times M_1$ – Tipo 01 .....	100
Figura 3-33 – Curva Momento e força lateral $F_2$ – Método Alternativo 02 (a) Força $F_1$ de 33 kN (b) Força $F_1$ de 200 kN .....	100
Figura 4-1 – Aparatos experimentais projetados para garantir o sistema de forças e deslocamentos .....	106
Figura 4-2 – Modelo alternativo de ensaio para ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos.....	107
Figura 4-3 – Sistema de forças e deslocamentos do modelo alternativo de ensaio .....	108
Figura 4-4 – Fluxograma do procedimento experimental .....	109
Figura 4-5 – Equipamentos de medição do modelo alternativo de ensaio (a) Esquema da instrumentação (b) Registro da instrumentação no ensaio .....	111
Figura 4-6 – Parcelas da rotação da ligação de base aferida (a) Pelos transdutores 1 e 2, (b) Pelo inclinômetro 1, (c) Pelo inclinômetro 2, (d) Instrumentação em ensaio .....	112
Figura 4-7 – Aparato experimental Rótula no modelo alternativo de ensaio .....	113
Figura 4-8 – Aparato experimental - Rótula (a) Modelo real, (b) Vista em perspectiva, (c) Localização da coluna na placa inferior, (d) Perspectiva do arranjo experimental .....	114
Figura 4-9 – Aparato experimental Sistema de reação no modelo alternativo de ensaio .....	115
Figura 4-10 – Aparato experimental – Sistema de reação para coluna (a) Perspectiva, (b) Amostra .....	115
Figura 4-11 – Aparato experimental Sistema guia com rolamentos e Vigas guia no modelo alternativo de ensaio.....	116
Figura 4-12 – Aparato experimental – Sistema guia com rolamentos (a) Perspectiva, (b) Amostra, (c) Rolamento, (d) Interface viga guia e rolamento.....	117
Figura 4-13 – Aparato experimental Sistema guia com rolamentos e Vigas guia no modelo alternativo de ensaio.....	118
Figura 4-14 – Aparato experimental – Sistema de ancoragem do bloco e Sistema de cabo e polia .....	119
Figura 4-15 – Aparato experimental Sistema de deslizamento .....	120
Figura 4-16 – Aparato experimental – Componentes do sistema de deslizamento .....	120

Figura 4-17 – Ligação de base (a) Modelo Tipo 1, (b) Modelo Tipo 2.....	122
Figura 4-18 – Seção transversal da coluna e detalhes das perfurações .....	123
Figura 4-19 – Análise de estabilidade elástica da coluna sem perfuração .....	124
Figura 4-20 – Bloco de concreto (a) barras rosadas, (b) detalhes de encaixe, (c) amostra B2 .....	127
Figura 4-21 – Lubrificação com e sem aditivos de superfícies sob altas cargas de contato... Figura 4-22 – Arranjo estrutural de base sob compressão centrada (a) ensaio, (b) modos de instabilidade .....	128 131
Figura 5-1 – Curva M-θ experimental média dos arranjos estruturais de base T1 .....	137
Figura 5-2 – Curva M-θ experimental média dos arranjos estruturais de base T2 .....	137
Figura 5-3 – Falha por formação de rótulas plásticas.....	138
Figura 5-4 – Linha de plastificação .....	139
Figura 5-5 – Exemplos dos resultados do ensaio de líquido penetrante.....	140
Figura 5-6 – Curva M-θ experimental dos arranjos estruturais de base T1-300 (60 kN).....	142
Figura 5-7 – Amostras sob $F_1=60$ kN, interação entre falha por rótula plástica e instabilidade .....	143
Figura 5-8 – Falha por instabilidades na coluna porta-palete.....	144
Figura 5-9 – Gráfico $M_b$ vs. $M_1$ - Arranjo estrutural de base T1.....	146
Figura 5-10 – Gráfico $M_b$ vs. $M_1$ - Arranjo estrutural de base T2.....	147
Figura 5-11 – Resultados experimentais vs. Parâmetros normativos do arranjo estrutural de base T1 .....	154
Figura 5-12 – Máximo momento fletor ' $M_b$ ' vs. Força axial de compressão – Arranjo T1 ...	154
Figura 5-13 – Força horizontal vs. Momento fletor ' $M_b$ ' – Arranjo estrutural T1 .....	155
Figura 5-14 – Resultados experimentais vs. Parâmetros normativos do arranjo estrutural de base T2 .....	157
Figura 5-15 – Máximo momento fletor ' $M_b$ ' vs. Força axial de compressão – Arranjo T2 ...	158
Figura 5-16 – Força horizontal vs. Momento fletor ' $M_b$ ' – Arranjo estrutural T2 .....	159
Figura 5-17 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T2 .....	161
Figura 5-18 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T1 .....	162
Figura 5-19 – Sistema estático da análise de estabilidade de Firouzianhaij <i>et al.</i> (2022) .....	165
Figura 5-20 – Análise comparativa das rotações (a) Arranjo estrutural T1; (b) Arranjo estrutural T2 .....	167
Figura 5-21 – Equipamentos de medição para avaliação das parcelas de rotação .....	169
Figura 5-22 – Gráficos de parcelas de rotação – Arranjo estrutural de base T1 .....	170
Figura 5-23 – Gráficos de parcelas de rotação – Arranjo estrutural de base T2 .....	172
Figura 5-24 – Gráficos M-θ e rigidezes analíticas da literatura .....	174
Figura 5-25 – Análise comparativa (a) Rigidez inicial vs. $F_1$ (b) ' $M_b$ ' vs. $F_1$ .....	176



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4-1 – Comparação entre os ensaios apresentados para ligação de base de colunas porta-paletes.....	104
Tabela 4-2 – Controle tecnológico do concreto .....	126
Tabela 4-3 – Arranjo estrutural de base sob compressão centrada.....	132
Tabela 4-4 – Grupos de ensaio de ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos.....	133
Tabela 5-1 – Parâmetros normativos de projeto do arranjo estrutural de base T1 .....	150
Tabela 5-2 – Parâmetros normativos de projeto do arranjo estrutural de base T2 .....	150
Tabela 5-3 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T2.....	161
Tabela 5-4 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais, AS 4084:2012 – Arranjo estrutural T1 .....	162
Tabela 5-5 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T1 .....	163
Tabela 5-6 – Rotação limite pela ANSI/RMI MH16.1:2021 .....	164
Tabela 5-7 – Rotações experimentais e pela análise de estabilidade.....	167



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS.....	25
1.2	JUSTIFICATIVA .....	26
1.3	METODOLOGIA.....	27
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	28
<b>2</b>	<b>ESTRUTURAS PORTA-PALETES SELETIVOS .....</b>	<b>29</b>
2.1	COLUMNAS PORTA-PALETE .....	36
2.2	LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS .....	40
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
<b>3</b>	<b>LIGAÇÕES DE BASE DE COLUMNAS PORTA-PALETES SELETIVOS..</b>	<b>47</b>
3.1	PROCEDIMENTOS NORMATIVOS PARA LIGAÇÃO DE BASE.....	59
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA LIGAÇÃO DE BASE.....	63
3.2.1	Especificações normativas de programas experimentais.....	65
3.2.2	Métodos alternativos de ensaio.....	80
3.2.3	Análise dos resultados experimentais.....	91
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	101
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>103</b>
4.1	MODELO ALTERNATIVO DE ENSAIO .....	103
4.2	APARATOS EXPERIMENTAIS .....	113
4.2.1	Rótula .....	113
4.2.2	Sistema de reação para coluna.....	114
4.2.3	Sistema guia com rolamentos e Vigas guia .....	116
4.2.4	Sistema de ancoragem do bloco e Sistema de cabo e polia.....	117
4.2.5	Sistema de deslizamento.....	119
4.3	MATERIAIS UTILIZADOS.....	121
4.3.1	Arranjo estrutural de base.....	121
4.3.2	Bloco de concreto .....	125
4.3.3	Graxa de Lítio e Grafite .....	127

4.4 GRUPOS DE AMOSTRAS .....	129
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	133
<b>5 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>135</b>
5.1 CURVA M- $\theta$ EXPERIMENTAL E COMPORTAMENTOS MECÂNICOS ...	136
5.2 RIGIDEZ ROTACIONAL E MOMENTO FLETOR RESISTENTE .....	149
5.3 ROTAÇÕES LIMITES DA LIGAÇÃO DE BASE .....	163
5.4 AVALIAÇÃO DAS PARCELAS DE ROTAÇÃO DA LIGAÇÃO DE BASE	168
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS ARRANJOS ESTRUTURAIS DE BASE	175
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	178
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>181</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	184
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>187</b>
<b>APÊNDICE A – Curvas M-<math>\Theta</math> experimentais.....</b>	<b>193</b>
<b>APÊNDICE B – Parâmetros de projeto das ligações de base.....</b>	<b>195</b>
<b>APÊNDICE C – Análise comparativa das rigidezes rotacionais.....</b>	<b>197</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da produção e o estopim de operações logísticas em depósitos, concebidas a partir da Revolução Industrial do séc. XIX, trouxeram a necessidade da eficiência em movimentação e armazenamento de estoques. Como consequência, o emprego de estruturas que auxiliam nessa gestão teve demanda crescente e proporcional à produtividade das indústrias (Winter; Pekoz, 1973).

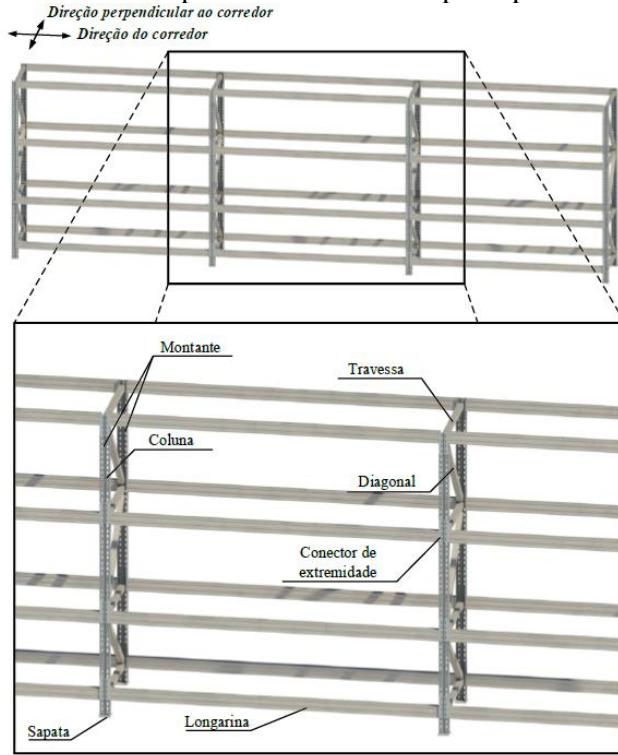
Desde a década de 60, a otimização no armazenamento se tornou um diferencial competitivo das empresas (RMI/ANSI MH16-1:2021). Por consequência, Winter e Pekoz (1973) afirmam que estruturas de armazenamento, como os porta-paletes seletivos, que asseguram alta produtividade e capacidade de armazenamento, ganharam demanda no mercado. Isso impulsionou o desenvolvimento extensivo de soluções estruturais para esse sistema, o qual ainda era pouco trivial para época. Atualmente, embora os porta-paletes seletivos, também conhecidos como racks, sejam sistemas estruturais com os quais a sociedade tem pouco contato direto, eles são amplamente utilizados em depósitos para o armazenamento de estoques industriais. (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Baldassino e Zandonini (2011) afirmam que os porta-paletes seletivos são estruturas metálicas de armazenamento que se destacam como uma forte solução à demanda de eficiência e flexibilidade logística na estocagem. Segundo os autores, a ênfase dada aos racks ocorre devido à sua capacidade de proporcionar competitividade em custos e eficiência logística para grandes estoques. Além disso, destaca-se o fato de serem estruturas com uma vantajosa relação capacidade resistente e peso próprio, principalmente devido ao uso de perfis formados a frio (PFF) em seus principais componentes.

Nesse sentido, a Figura 1-1 apresenta os principais componentes de uma estrutura porta-palete seletivo, os quais são devidamente definidos pela ABNT NBR 15524:2007, norma brasileira destinada aos sistemas de armazenagem. Os elementos que suportam o peso das unidades de carga são as longarinas (estruturas horizontais), e as colunas (estruturas verticais). Os pares de longarinas, com o auxílio de conectores nas suas extremidades, transferem os esforços das unidades de carga para as colunas. As colunas porta-paletes, também denominadas colunas rack, em geral PFF de seção mono ou duplamente simétricas, formam, aos pares, um sistema de montante, os quais são interligadas por travessas e diagonais, o conjunto desses elementos transfere as cargas para o piso. Por fim, “sapata” é a denominação normativa dada às placas de base de fixação da estrutura ao piso, cuja função é a distribuição dos esforços à

fundação. As sapatas, em geral, são conectadas às colunas por meio de soldas ou parafusos (ABNT NBR 15524-1:2007).

Figura 1-1 – Principais elementos de um porta-paleta seletivo



Fonte: Branquinho (2021)

Como ilustrado na Figura 1-1, os racks se apresentam como estruturas tridimensionais. Todavia, Davies (1980) afirma que, decorrente das diferentes contribuições para a estabilidade global, os porta-paletes podem ser analisados a partir de dois pórticos bidimensionais distintos: (i) um pórtico é composto pelos montantes, travamentos e diagonais, o qual se posiciona perpendicular ao corredor, (ii) e outro pórtico é posicionado paralelo ao corredor, composto pelas colunas e longarinas, o qual possui estabilidade dependendo fortemente das ligações semirrígidas entre esses elementos e entre a coluna e a base. Os eixos que delimitam a direção dos pórticos componentes da estrutura porta-paleta seletivo são indicados na Figura 1-1.

Segundo Branquinho (2021), o processo de dimensionamento e análise do pórtico perpendicular ao corredor, de forma geral, recai em procedimentos normativos já consagrados. Nesse sentido, a norma brasileira destinada a estruturas de aço e mista de aço e concreto, ABNT NBR 8800:2008, classifica o pórtico perpendicular ao corredor como um "pórtico em forma de treliça", devido ao contraventamento proporcionado pelas diagonais e travessas. Assim sendo, o dimensionamento dessa estrutura segue as diretrizes normativas estabelecidas para o sistema treliçado. Diante disso, observa-se que, do ponto de vista estrutural, o pórtico perpendicular ao

corredor é estável (Bernuzzi *et al.* 2017) e, portanto, não tem sido frequentemente abordado em investigações da literatura, não sendo incluso também no escopo do presente estudo.

Em contrapartida, o pórtico posicionado paralelo ao corredor, no intuito de manter a logística eficiente dos porta-paletes seletivos, não dispõe de um sistema de contraventamento. Portanto, em termos de estabilidade estrutural, o seu comportamento mecânico global é complexo e sensível à transmissão de esforços pelas ligações semirrígidas típicas do sistema, i.e., ligação longarina-coluna e ligação coluna-base (Baldassino; Bernuzzi, 2000).

Segundo Chen e Scholl (1984), o pórtico paralelo ao corredor se trata de uma estrutura deslocável, i.e., sujeita a efeitos de segunda ordem. Tal pórtico é denominado pelos autores como sistema “momento resistente”. Em um contexto histórico, Davies (1980) aponta a ausência de soluções estruturais acessíveis para a análise de estabilidade de pórticos com ligações semirrígidas. Nesse cenário, o advento de estruturas porta-paletes em aço tornou essencial o investimento em estudos sobre o tema, destacando-se a necessidade de investigações específicas sobre a estabilidade do pórtico posicionado paralelo ao corredor.

Diante do exposto, comprehende-se que as complexidades da análise estrutural dos porta-paletes seletivos são decorrentes das dificuldades relacionadas (i) às colunas PFF suscetíveis a instabilidades, (ii) ao comportamento não linear das ligações longarina-coluna e ligações de base, (iii) à influência de efeitos de segunda ordem na análise da estabilidade global, e (iv) à ação de imperfeições geométricas características do sistema. Sendo assim, é possível concluir que o dimensionamento das estruturas porta-paletes em aço recai na dificuldade em prever o comportamento mecânico do sistema momento resistente (Sarawit; Pekoz, 2006).

No âmbito das prescrições normativas nacionais e internacionais, frente aos complexos comportamentos do pórtico na direção do corredor, há o consenso em se especificar análises experimentais a fim de apurar diretrizes para o cálculo e projetos dos racks. Essas orientações normativas de ensaios buscam suprir a falta de especificações para a análise estrutural de porta-paletes seletivos e são denominadas como abordagem “*Design by testing*” pela norma europeia destinada à porta-paletes (EN 15512:2009). Para tanto, as campanhas experimentais acerca da estabilidade dos racks e/ou de seus componentes são conduzidas com o princípio de simular as condições de contorno e carregamento reais da estrutura de armazenamento, para assim gerar especificações de projeto representativas.

Segundo Sarawit e Pekoz (2006), as investigações sobre o comportamento mecânico e sobre o impacto das ligações semirrígidas na estabilidade global dos racks possuem como objetivo definir a rigidez rotacional dos componentes e seus efeitos de segunda ordem no pórtico na direção do corredor. Essa tarefa não é trivial e envolve a dificuldade decorrente da escassez de estudos representativos para a ampla variedade de ligações disponíveis no mercado. Além disso, a complexa incorporação dos efeitos da semirrigidez na análise global de estruturas porta-paletes seletivos, em geral, apresenta-se como um desafio, uma vez que esses efeitos tendem a desestabilizar o sistema (Branquinho, 2021).

De forma específica, no que diz respeito às ligações de base de colunas porta-paleta seletivo, que são o foco do presente estudo, Baldassino e Bernuzzi (2000) afirmam que os trabalhos sobre o comportamento mecânico dessa ligação representam investigações cruciais para a compreensão da resposta estrutural global dos racks. Nesse cenário, os autores, que inicialmente tinham o propósito de avaliar as ligações entre longarina e coluna, concluíram, por meio de análises numéricas, que pequenas variações nos valores de rigidez adotados para a base podem acarretar alterações significativas na capacidade global da estrutura porta-paleta.

Neste âmbito, com o intuito de avaliar a influência da ligação de base na capacidade última das estruturas porta-paletes, Baldassino e Zandonini (2011) chegaram à conclusão de que, para um mesmo rack, uma ligação de base com comportamento perfeitamente rígido pode proporcionar uma capacidade última aproximadamente 209% superior em comparação à mesma estrutura com base rotulada. Além disso, os autores observaram que, caso a ligação de base apresente elevada flexibilidade, aumentar a rigidez da ligação longarina e coluna não resulta em ganhos significativos na capacidade última global do porta-paleta.

Com base no exposto, atestado os impactos diretos na estabilidade e resistência dos porta-paletes seletivos, justificam-se os esforços aplicados no estudo do comportamento mecânico da ligação entre a coluna rack e o piso que recebe o porta-paleta (Baldassino; Zandonini, 2011). Além disso, Godley *et al.* (1998) afirmam que o comportamento da ligação de base possui influência de parâmetros complexos e ainda pouco explorados por modelos mecânicos analíticos, fato que dificulta a incorporação dos efeitos desta ligação na análise global do porta-paleta seletivo. Por isso, Baldassino e Zandonini (2011) apontam que, não raras as vezes, faz-se necessário o investimento em programas experimentais e análises numéricas avançadas a fim de gerar dados consistentes sobre os fenômenos envolvidos no comportamento da ligação de base de colunas porta-paletes.

Nesse cenário, conforme apontado por Gilbert e Rasmussen (2009), a escassez de diretrizes em normas e em trabalhos da literatura torna ineficaz um estudo exclusivamente numérico do comportamento das ligações semirrígidas de base. Portanto, uma campanha experimental se revela necessária para a análise e compreensão da resposta estrutural das ligações de base de porta-paletes seletivos.

Dentro deste contexto, o presente estudo consiste em uma investigação experimental do comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos. A campanha experimental conduzida no presente trabalho adota as recomendações da abordagem *Design by testing* e, por isso, concebe esclarecimentos (i) quanto à rigidez rotacional e capacidade resistente da ligação frente aos esforços de flexo-compressão, (ii) sobre os impactos da ligação na estabilidade da coluna conectada a ela e (iii) sobre os comportamentos mecânicos e modos de falha característicos do arranjo estrutural de base ensaiado.

Por fim, o presente programa experimental observa a necessidade de se projetar um modelo alternativo de ensaio de ligações de base de porta-paletes seletivos. A concepção de um ensaio diferente das propostas normativas e da literatura tem como intuito adaptar o estudo aos equipamentos e infraestrutura disponíveis e também solucionar falhas e dificuldades atreladas aos complexos modelos de ensaio existentes. Portanto, parte fundamental da presente pesquisa consiste em projetar e validar o modelo alternativo de ensaio proposto para a análise experimental de ligações de base de porta-paletes seletivos.

## 1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como principal objetivo a investigação do comportamento estrutural das ligações de base de estruturas porta-paletes seletivos em aço, visando avaliar sua rigidez rotacional, capacidade resistente e estabilidade do arranjo estrutural de base. Sendo assim, o estudo apresenta como objetivos específicos:

- i. Projetar e validar um modelo alternativo de ensaio para análise experimental das ligações de base de colunas de porta-paletes seletivos, seguindo as premissas da abordagem *Design by testing*;
- ii. Obter experimentalmente o comportamento mecânico das ligações de base de colunas porta-paletes sob esforços de compressão e flexão;

- iii. Avaliar a adequabilidade dos atuais procedimentos normativos nacionais e internacionais de projeto e propostas teóricas da literatura voltados às ligações de base de porta-paletes seletivos;
- iv. Promover esclarecimentos sobre os típicos comportamentos mecânicos das ligações de base e sobre a possível influência dessa ligação na estabilidade do sistema momento resistente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As ligações de base de estruturas porta-paletes seletivos apresentam um complexo comportamento mecânico, decorrente de peculiaridades construtivas da ligação e de seu típico comportamento não linear, os quais lhe conferem o caráter semirrígido. Além disso, a dificuldade em prever as predisposições do sistema momento resistente aos fenômenos de instabilidade torna a investigação do comportamento mecânico da ligação coluna-base um fator essencial para definição da capacidade última das estruturas porta-paletes.

Neste cenário, as normas de projetos nacionais e internacionais carecem de detalhes específicos sobre as ligações de base, muitas vezes sugerindo a adoção de uma rigidez rotacional pouco representativa. O dimensionamento perante as simplificações normativas, não raras as vezes, leva a resultados conservadores ou até mesmo contra-segurança, a depender das negligências assumidas em projeto. Esse cenário se soma ao escasso histórico de investigações da literatura acerca do comportamento das ligações de base de colunas de estruturas porta-paletes seletivos, as quais vêm tomado maior relevância apenas nas últimas décadas.

Diante do exposto, em um cenário de poucas especificações, a recomendação de um programa experimental voltado às ligações de base de colunas porta-paletes frequentemente se apresenta fundamental para o estudo desse componente do rack. Todavia, os modelos de ensaio normativos se mostram complexos e apresentam inconsistências em suas especificações, cenário que torna recorrente os esforços da literatura em projetar modelos alternativos de ensaio e propostas de melhoria para a análise experimental das ligações de base de porta-paletes.

Portanto, visando investigar o comportamento mecânico das ligações de base e, consequentemente, auxiliar na análise global dos projetos de estruturas porta-paletes na direção do corredor, o presente trabalho realiza um estudo de caráter experimental. Para tanto, o presente programa experimental propõe um modelo alternativo de ensaio, o qual se demonstrou

fundamental para a eficácia do estudo. Por fim, a análise dos dados experimentais e a resposta estrutural das ligações de base observadas em ensaio respaldam a análise teórica acerca dos parâmetros de projeto da ligação e sobre seu impacto na estabilidade do sistema momento resistente.

### 1.3 METODOLOGIA

O presente estudo é composto por uma investigação experimental que visa avaliar o comportamento mecânico da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos. A partir da análise experimental, o estudo apresenta uma análise teórica de especificações normativas e propostas da literatura voltadas a definir a semirrigidez e resistência mecânica do componente de base do rack. Por fim, o presente trabalho faz uma análise dos comportamentos característicos do arranjo estrutural de base dos porta-paletes e seus possíveis impactos na estabilidade global da estrutura.

Nesse sentido, é apresentada uma revisão bibliográfica que contemple o tema em questão e as recomendações normativas vigentes. Para tanto, foram apresentadas discussões a respeito das principais características da estrutura porta-paleta seletivo, seus modos de instabilidade característicos, e efeitos desestabilizantes. Também foi detalhado o histórico de investigações da literatura a respeito das ligações de base de colunas rack e seu impacto nas recomendações para a análise global da estrutura porta-paleta seletivo.

Com base na revisão bibliográfica apresentada, o presente estudo experimental desenvolveu e validou um modelo alternativo de ensaio para ligações de base de colunas porta-paletes, o qual consiste na etapa fundamental para viabilizar a presente pesquisa. A campanha experimental foi conduzida no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Nesse cenário, a análise experimental provê os resultados essenciais para a investigação acerca do comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos.

Sendo assim, as análises experimentais do presente estudo possuem por finalidade (i) agregar as especificações vigentes sobre o comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes, (ii) validar e propor um método alternativo de ensaio do arranjo estrutural, e (iii) avaliar a adequabilidade das especificações normativas e teóricas da literatura voltadas às ligações de base de colunas porta-paletes.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto do presente trabalho está organizado em 6 capítulos e 3 apêndices como apresentado em sequência.

O Capítulo 1 destina-se à contextualização geral do problema a ser abordado pela pesquisa, ou seja, o efeito não negligenciável da semirrigidez da ligação de base na estabilidade dos porta-paletes seletivos, avaliados na direção do corredor, e a falta de especificações sobre o comportamento mecânico dessa ligação.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam a revisão bibliográfica da pesquisa. O Capítulo 2 descreve as características das estruturas porta-paletes e as típicas complexidades observadas na análise estrutural do pórtico na direção do corredor. Além disso, apresenta-se uma contextualização dos principais elementos que compõem a estrutura porta-paleta, i.e., colunas rack e ligações semirrígidas. Em sequência, o Capítulo 3 expõe as características típicas do comportamento mecânico das ligações de base dos porta-paletes e apresenta as disposições normativas vigentes. Por fim, um maior enfoque é dado à descrição das diretrizes e análises experimentais normativas, assim como aos trabalhos da literatura sobre o comportamento mecânico de ligações de base de colunas porta-paletes.

O Capítulo 4 apresenta o programa experimental desenvolvido na presente pesquisa. Sendo assim, são descritos (i) o planejamento e concepção do modelo alternativo de ensaio para ligações de base de colunas porta-paletes, (ii) os aparelhos experimentais projetados para o estudo, (iii) a caracterização dos materiais utilizados em ensaio, e (iv) os grupos de amostras que serão avaliados experimentalmente.

O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios de ligações de base, os quais fundamentam as investigações dos comportamentos mecânicos dessa ligação e a avaliação dos procedimentos normativos vigentes.

Por fim, o Capítulo 6 resume as principais conclusões do estudo desenvolvido.

Em caráter complementar, são apresentados os Apêndices A, B e C, os quais detalham as análises experimentais discutidas no Capítulo 5.

## 2 ESTRUTURAS PORTA-PALETES SELETIVOS

A cargo de atender todas as demandas existentes no uso dos porta-paletes seletivos, e.g. estoque de grandes cargas, fácil acesso e também manuseio dos produtos, a geometria e componentes estruturais dos racks tornam as análises estruturais desse sistema uma tarefa pouco trivial. Nesse cenário, comprehende-se que os racks, majoritariamente compostos por perfis formados a frio (PFF), possuem comportamentos tipicamente não linear físico-geométricos, estabilidade dependente de ligações semirrígidas e podem apresentar o impacto de diferentes modos de instabilidade (Branquinho, 2021; Rasmussen; Gilbert, 2013).

Por isso, no presente capítulo, serão apresentados os pontos relevantes sobre o comportamento mecânico dos porta-paletes seletivos e de seus principais componentes estruturais, fundamentação necessária para uma apropriada análise da estabilidade global do pórtico paralelo ao corredor e compreensão dos efeitos da semirrigidez das ligações de base, as quais são o enfoque do presente estudo.

A Mecânica dos Sólidos e Estruturas é definida pelos princípios que relacionam os conceitos de força, tensão, deslocamento e deformação, i.e., é regida por relações de equilíbrio, compatibilidade e constitutivas. Nesse sentido, a análise estrutural não pode basear-se unicamente em conceitos associados à resistência dos materiais e deformabilidades últimas dos seus elementos. Isso é particularmente importante para as estruturas esbeltas, como é o caso dos porta-paletes seletivos. Sendo assim, é indispensável considerar no cálculo estrutural os fenômenos que envolvem os conceitos de estabilidade, sejam estes dos elementos isolados, ou de toda estrutura (Reis; Camotim, 2000).

Branquinho (2021) afirma que a complexidade da análise estrutural de porta-paletes seletivos recai no cenário em que não é possível negligenciar efeitos ainda pouco abordados pelos procedimentos normativos de cálculo de estruturas metálicas convencionais. Por esse motivo, a norma europeia destinada à porta-paletes (EN 15512:2009) enfatiza as precauções que devem ser tomadas para cálculo de racks, frente às especificações normativas de estruturas metálicas tradicionais.

A combinação de fatores que ampliam efeitos desestabilizantes na estrutura e, consequentemente, geram o aparecimento de diferentes formas de instabilidade se somam aos efeitos da rigidez pós-crítica típica de PFF. Por isso, não raras as vezes, as abordagens

normativas se tornam conservadoras ou, inclusive, contra-segurança, a depender das simplificações adotadas em projetos de porta-paletes seletivos (Sarawit; Pekoz, 2002).

Conforme observado por Sarawit e Pekoz (2006), devido à semirrigidez típica das ligações componentes do sistema porta-paleta seletivo, a transmissão de momentos fletores entre os elementos estruturais ocorre de maneira parcial. Além disso, os autores também apontam para a dificuldade em se definir a área efetiva de resistência das colunas porta-paletes, visto que estes elementos estruturais apresentam um padrão de perfuração constante ao longo de seu comprimento.

Faz-se relevante mencionar que as perfurações das colunas rack são feitas a fim de viabilizar as ligações por encaixe e parafuso com as longarinas e contraventamentos, respectivamente. Nota-se, portanto, que o padrão de perfurações nas colunas é uma das características típicas do sistema porta-paleta que penaliza o comportamento estrutural. Maiores detalhes sobre as colunas rack serão apresentados no tópico 2.1 do presente trabalho.

Conforme mencionado, as estruturas porta-paletes seletivo são caracterizadas pelo emprego da maioria dos seus elementos estruturais compostos por PFF, fato que se justifica pela grande aplicabilidade da conformação a frio frente às demandas de flexibilidade na montagem (Winter; Pekoz, 1973). Diante disso, comprehende-se que grande parte das complexidades inerentes às análises estruturais do pórtico na direção do corredor são fundamentadas pelos comportamentos tipicamente observados em PFF perfurados com a presença de enrijecedores (Baldassino *et al.*, 2019).

Nesse âmbito, a Figura 2-1 ilustra o estudo de caso feito por Affolter *et al.* (2009), no qual os autores investigaram as possíveis causas do colapso de uma estrutura porta-paleta seletivo. Na avaliação dos componentes estruturais do sinistro, os autores notaram a presença de modos de instabilidade no montante central do rack, fato que torna o estudo de caso bastante representativo dos típicos comportamentos de falha das estruturas porta-paletes seletivos.

Affolter *et al.* (2009) apontam que, a Figura 2-1 (a) expõe a presença de flambagem lateral da coluna, a Figura 2-1 (b) a interação entre diferentes modos de instabilidades da coluna conectada à base, e a Figura 2-1 (c) revela a falha local na ligação de base. Nesse sentido, as investigações do estudo de caso realizado pelos autores prosseguiram com a avaliação da hipótese de colapso decorrente de instabilidades na coluna conectada à ligação de base. Sendo

assim, Affolter *et al.* (2009) investigaram os fenômenos de instabilidade do sinistro por meio de análises avançadas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Figura 2-1 – Detalhes dos modos de falha dos componentes da estrutura porta-palete que sofreram colapso, (a) flambagem lateral na coluna, (b) instabilidades na coluna conectada à base, (c) instabilidades na ligação de base



Fonte: Affolter *et al.* (2009)

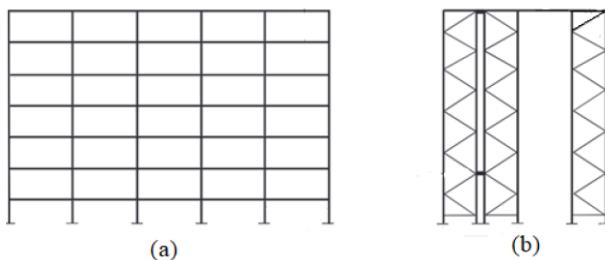
Fundamentados pela comparação entre os resultados numéricos de capacidade última do modelo e os dados de carregamento atuante na estrutura no momento no colapso, Affolter *et al.* (2009) destacam a maior adequabilidade do modelo que incorpora efeitos classificados pelos autores como ‘não negligenciáveis’ à estabilidade de estruturas porta-paletes. Nesse cenário, Affolter *et al.* (2009) indicam ser imprescindível a consideração de: (i) efeitos desestabilizantes decorrentes da semirrigidez da ligação de base, (ii) efeitos de segunda ordem gerados pela incorporação do primeiro modo de falha indicado pela análise de estabilidade elástica, os quais simulam imperfeições geométricas, (iii) semirrigidez da ligação longarina-coluna, e (iv) consideração da não linearidade física do aço da coluna.

Por fim, Affolter *et al.* (2009) concluíram também que o colapso do porta-paletes seletivo foi decorrente de falha estrutural próxima à placa de base, mediante instabilidade por flexo-torção nas colunas da baia central. Ademais, os autores afirmam a grande sensibilidade dos resultados numéricos às diferentes considerações de condições de contorno da base, corroborando com as constatações dos estudos da literatura, e.g. Baldassino e Bernuzzi (2000), Sarawit e Pekoz (2002), Rasmussen e Gilbert (2013) e Branquinho (2021), os quais alertam sobre a necessidade de maiores investigações sobre o comportamento mecânico das ligações de base de colunas de porta-paletes seletivos.

No âmbito normativo, as principais especificações internacionais referentes ao cálculo e projeto de porta-paletes são estabelecidas (i) pelo RMI (*Rack Manufacturers Institute*) que

compõe as especificações norte americanas da ANSI/RMI MH16-1:2021, (ii) pela norma australiana AS 4084:2012, e (iii) pela norma europeia EN 15512:2009. Apesar das normas internacionais aceitarem a análise estrutural global dos racks como dois pórticos posicionados com relação ao corredor (Figura 2-2), os quais são independentes e perpendiculares entre si, reconhecem a importância de também investigar, de forma individual, o comportamento mecânico e as características de cada componente da estrutura de armazenamento e, para isso, propõem diferentes especificações entre si (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Figura 2-2 – Direções principais dos porta-paletes (a) direção do corredor (b) direção perpendicular ao corredor



Fonte: Adaptado de EN 15512:2009

No âmbito nacional, a ABNT NBR 15524:2007 é a norma brasileira destinada aos sistemas de armazenagem, sendo dividida em duas partes. A ABNT NBR 15524-1:2007 é o documento destinado a definir os termos para sistemas de armazenagem, os quais são mencionados na segunda parte da norma. Já ABNT NBR 15524-2:2007 traz diretrizes para o projeto, cálculo, montagem e manutenção dos porta-paletes seletivos.

A ABNT NBR 15524-2:2007 instrui que o cálculo estrutural de sistemas porta paletes seja feito em dois estágios. O primeiro estágio é a avaliação individual dos elementos estruturais. Nesta etapa, são abordadas as especificações da ABNT NBR 14762:2001 e ABNT NBR 8800:1986, normas referentes a estruturas em PFF e aço laminado e soldado, respectivamente. Dessa forma, a norma brasileira de porta-paletes não aborda a última atualização da ABNT NBR 14762:2010, na qual é incluso o Método da Análise Direta para procedimento de cálculo. Portanto, a ABNT NBR 15524-2:2007 limita o dimensionamento da capacidade global da estrutura porta-paleta ao uso do Método da Largura Efetiva (MLE) ou Método da Seção Efetiva (MSE), procedimentos que configuram a segunda etapa de cálculo proposta pela norma brasileira.

Branquinho (2021) aponta que o dimensionamento a partir do MLE ou MSE envolve a definição do comprimento de flambagem, tarefa que não é trivial para avaliação global da estabilidade dos porta-paletes. No contexto da análise do pórtico treliçado perpendicular ao

corredor, ilustrado na Figura 2-2 (b), as simplificações normativas permitem a adoção do coeficiente de flambagem ‘ $K$ ’ igual a 1 para todos os elementos. Nesse sentido, o dimensionamento da estrutura contraventada pelas diagonais e travessas é coberto pelas especificações da ABNT NBR 8800:2008. Conforme concluído pelo estudo de Baldassino e Zandonini (2011), a capacidade do pórtico perpendicular ao corredor é afetada diretamente pela resistência dos elementos de contraventamento (travessas e diagonais) e pela forma como estes elementos são conectados às colunas, conclusões que concordam com as especificações de cálculo e análise da ABNT NBR 8800:2008.

Já na análise do sistema momento resistente, ilustrado na Figura 2-2 (a), a definição de um coeficiente de flambagem ‘ $K$ ’ representativo da instabilidade do sistema é dificultada pelas peculiaridades do rack, e.g. ligações semirrígidas e colunas com perfurações, fazendo com que as especificações normativas não sejam representativas para essa análise (Branquinho, 2021). No contexto de determinação da capacidade resistente das colunas rack PFF perfuradas, a ABNT NBR 15524-2:2007 recomenda que o dimensionamento desse componente seja feito a partir de análises experimentais provenientes do ensaio denominado ‘Ensaio de coluna curta’.

Nesse cenário, Branquinho (2021) avaliou a aplicabilidade do método da análise direta para o dimensionamento do pórtico na direção do corredor. No método da análise direta, os esforços resistentes são obtidos considerando os comprimentos reais das colunas, i.e., coeficientes ‘ $K$ ’ iguais a 1. Segundo a autora, o método da análise direta, vigente na ANSI/AISI S100:2020, apresentou vantagens frente ao método do comprimento efetivo, especificado na ABNT NBR 15524-2:2007, não só pela praticidade de não necessitar definir o parâmetro ‘ $K$ ’, mas também pela melhor concordância com o comportamento mecânico do porta-palete seletivo. Por fim, Branquinho (2021) ainda faz o adento para as análises estruturais considerando o campo de imperfeições característicos dos porta-paletes seletivos, estudo que demonstra que a proposta de análise da ANSI/AISI S100:2020 mostrou-se contra-segurança para alguns casos analisados pela autora.

Diante do estudo realizado por Branquinho (2021) e as conclusões do estudo de caso de Affolter *et al.* (2009), fica clara a importância em se prever cuidadosamente o método de cálculo e análise estrutural para porta-paletes seletivos na direção do corredor. Nesse sentido, a análise de estabilidade dos rack apresenta pontos não negligenciáveis de serem considerados, tais como: padrão de perfurações na coluna, previsão da capacidade última da estrutura considerando modos de instabilidade globais, locais e, principalmente, distorcionais e, por fim,

a presença de ligações semirrígidas como limitantes não só da capacidade última do rack, mas também dos parâmetros de serviço da estrutura. Desta maneira, notam-se as inconsistências perante a abordagem do método do comprimento efetivo para projetos de porta-paletes seletivos, o qual não só é proposto pela norma brasileira ABNT NBR 15524-2:2007, mas também pela EN 15512:2009.

Recentemente a ANSI/RMI MH16.1 passou por atualizações, nas quais já incluem considerações sobre o método da análise direta para porta-paletes seletivos e fazem um adento importante sobre a necessidade de se considerar as rigidezes parciais de todas as ligações componentes do rack na direção do corredor. As obrigatoriedades do novo documento americano (ANSI/RMI MH16-1:2021) também refletem nas maiores especificações quanto à ligação de base, as quais compõem parte das principais atualizações da norma estadunidense.

A norma australiana destinada à porta-paletes AS 4084:2012, além de permitir a análise estrutural de dois pórticos perpendiculares entre si, como ilustrado na Figura 2-2, também especifica duas etapas necessárias para o processo de cálculo estrutural de racks. Primeiramente, a AS 4084:2012 indica uma análise global da estrutura, a fim de obter os esforços solicitantes e deslocamentos de projeto. Nesta etapa, para a devida avaliação da estabilidade do pórtico na direção do corretor, a norma exige a consideração dos efeitos desestabilizantes (i) da coluna PFF sob compressão (efeitos de segunda ordem), (ii) da curva momento-rotação característica da ligação longarina-coluna, (iii) da curva momento-rotação característica da ligação de base, (iv) da rigidez ao cisalhamento pela interação com o pórtico perpendicular ao corredor, (v) de efeitos de emendas nas colunas, e (vi) de ações oriundas da movimentação de cargas.

Por fim, a AS 4084:2012, recomenda uma segunda etapa de análise, na qual avalia de forma individual os elementos estruturais componentes do porta-paleta seletivo, no intuito de mensurar sua adequabilidade frente aos esforços determinados na primeira etapa de análise. De acordo com as recomendações da AS 4084:2012, os arranjos estruturais que devem ser avaliados de forma individualizada, tanto em capacidade última, quanto em limites de serviço, são:

- i. A coluna rack sob esforços de compressão, flexão composta, flexo-torção, e cisalhamento, considerando devidamente a redução da área efetiva em função das perfurações;
- ii. A longarina sob esforços fletores;

- iii. O comportamento da ligação entre a longarina e coluna;
- iv. Análise da rigidez da ligação de base;
- v. Suscetibilidade de esforços decorrentes de sismos e a devida avaliação do sistema global e de seus componentes perante o fenômeno.

Para esta etapa, a AS 4084:2012 recomenda as prescrições da AS/NZS 4600:2005 e AS 4100:2020, normas destinadas a perfis formados a frio e elementos em aço laminado, respectivamente. Por fim, a norma australiana faz um adento aos casos em que não há procedimento de cálculo normativo disponíveis para determinado componente do porta-palete, indicando assim a realização de ensaios experimentais previstos no documento, os quais avaliam de forma individual o componente.

A norma europeia EN 15512:2009 também especifica procedimentos analíticos de cálculos para porta-paletes seletivos, porém, de forma similar às outras normas internacionais, aponta a importância de procedimentos experimentais para a obtenção dos devidos comportamentos mecânicos característicos do sistema estrutural, e.g. avaliação dos modos distorcionais nas colunas PFF perfuradas e rigidez da ligação de base.

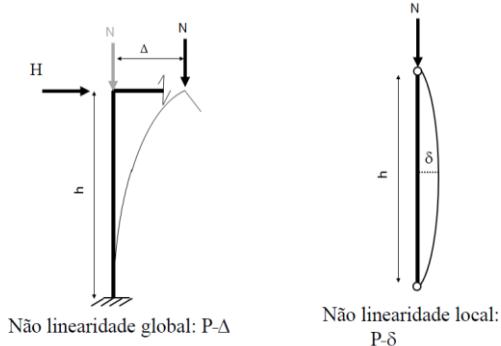
Diante do exposto, fica evidente que, não raras as vezes, os esforços de cálculo e projeto de estruturas porta-paletes seletivos recaem na análise de estabilidade do sistema momento resistente. Nesse sentido, de forma similar, as prescrições normativas especificam que os efeitos de segunda ordem podem ser incorporados nos cálculos estruturais por duas maneiras distintas: através de análises com ferramentas computacionais, ou podem ser considerados através de curvas de dimensionamento que amplificam os efeitos de primeira ordem, obtidos por análises lineares. O Eurocode 3 CEN/EN 1993-1-1:2005 afirma que os efeitos de segunda ordem devem ser considerados caso apresentem um aumento significativo nos esforços internos, ou modificarem consideravelmente o comportamento mecânico estrutural.

Segundo prescrições da ABNT NBR 8800:2008, os efeitos de segunda ordem considerados na ponderação dos esforços solicitantes são  $P-\Delta$  (efeitos globais) e  $P-\delta$  (efeitos locais), ilustrados na Figura 2-3. O deslocamento nodal da estrutura é representado por  $P-\Delta$  e o deslocamento entre nós decorrente da não linearidade do eixo da barra é retratado por  $P-\delta$ . Ambos deslocamentos representam imperfeições geométricas iniciais do sistema estrutural.

Compreendido o comportamento mecânico e as complexidades inerentes à estabilidade dos porta-paletes seletivos na direção do corredor, torna-se pertinente também entender as

particularidades envolvidas na resposta estrutural dos componentes determinantes para a estabilidade global. Nesse sentido, os subitens seguintes apresentam e discutem brevemente os componentes relevantes ao comportamento estrutural do porta-palete na direção do corredor e as suas interações com os efeitos desestabilizantes da estrutura.

Figura 2-3 – Efeitos de segunda ordem global e local



Fonte: Adaptado de Pignatta e Silva (2021)

## 2.1 COLUNAS PORTA-PALETE

Branquinho (2021) afirma que, dentre os componentes estruturais dos racks, as colunas perfuradas possuem o comportamento mecânico mais complexo e determinante para a capacidade global da estrutura. Essa afirmação é fundamentada na gama de variáveis relevantes a serem consideradas na análise estrutural das colunas rack, como: (i) presença de modos de instabilidades estruturais complexos de serem considerados analiticamente, e.g. distorção e flexo-torção e a possível interação entre os modos, (ii) influência de tensões residuais devido ao processo de conformação dos PFF, (iii) e efeitos não negligenciáveis de segunda ordem e imperfeições geométricas (Baldassino; Bernuzzi, 2000).

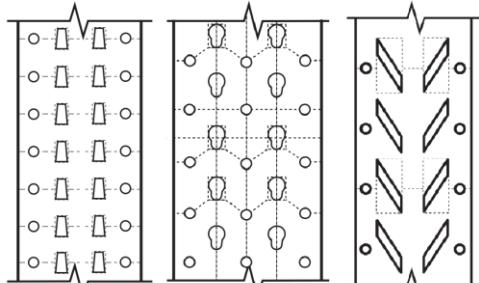
Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que, em função das perfurações constante das colunas, faz-se necessário a investigação de como essa redução na seção transversal impacta na capacidade resistente do elemento estrutural, tanto sob forças axiais, quanto sob flexão. Sendo assim, Baldassino e Zandonini (2011) declararam que o padrão de perfurações das colunas rack é fonte de inúmeras investigações, visto que a descontinuidade do material gera concentração de tensões e também altera as propriedades do aço.

Nesse cenário, o processo de análise estrutural das colunas rack com a presença de furos leva à necessidade de consideração de esforços desestabilizantes não negligenciáveis. Isso ocorre devido à excentricidade dos esforços na peça, tanto em relação ao centro geométrico

quanto ao centro de torção. À vista disso, e considerando o comportamento mecânico típico de PFF perfurados, as análises estruturais no âmbito das simplificações elásticas lineares se tornam ainda menos representativas para os porta-paletes seletivos (Baldassino; Zandonini, 2011).

Diante do exposto, de forma geral, as recomendações normativas especificam campanhas experimentais para a avaliação detalhada dos efeitos das perfurações nas colunas porta-paletes. Os ensaios envolvem a aplicação de esforços mecânicos similares aos que a estrutura é exposta em serviço. A EN 15512:2009 aponta para a dificuldade em se propor métodos analíticos para determinar a seção efetiva resistente das colunas perfuradas, pois, além dos complexos comportamentos estruturais, também há diferentes geometrias de perfuração disponíveis no mercado, variedade exemplificada na Figura 2-4.

Figura 2-4 – Exemplos das variedades de perfurações nas colunas rack



Fonte: Adaptado de EN 15512:2009

No âmbito do padrão de perfurações, a ABNT NBR 15524-2:2007 indica três métodos de análise para a caracterização dos efeitos da perfuração nas colunas sujeitas a compressão:

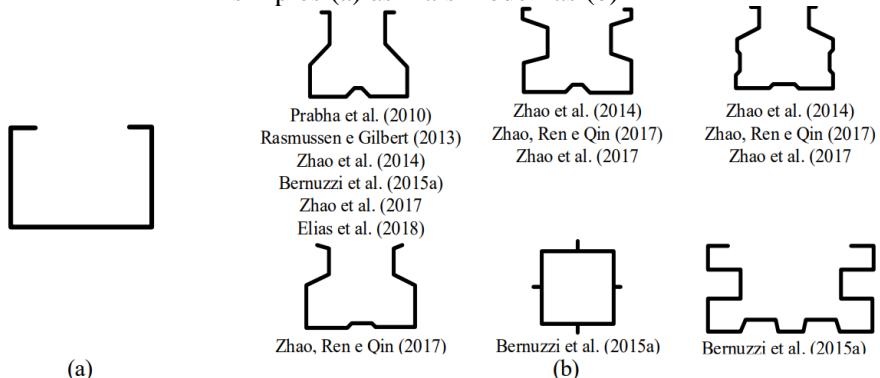
- i. Utilização de resultados experimentais de ensaios padronizados e detalhados na própria norma brasileira;
- ii. Análises avançadas, utilizando elementos finitos e incorporando os efeitos dos modos de instabilidade global, local, distorcional, e a influência de imperfeições geométricas;
- iii. Análise experimental da capacidade última para o modo distorcional de instabilidade e determinação analítica dos modos de flambagem à flexão e à flexo-torção. Em sequência, relaciona-se os dados experimentais e analíticos e a área efetiva da seção é obtida.

Hancock (1985) explica que o desenvolvimento do histórico de diferentes seções transversais para colunas PFF cresceu de forma proporcional à demanda por estruturas de armazenamento. O autor afirma que o estudo de diferentes formas de conformar o PFF teve estopim na necessidade de viabilizar a ligação parafusada da coluna rack com os elementos de

contraventamento e longarinas, condição construtiva que substituiu o tradicional uso de soldas, as quais apresentam baixa resistência aos modos de instabilidades globais. Segundo Gilbert e Rasmussen (2009), promover eficiência no uso dos porta-paletes, também explica a presença de perfurações constantes na coluna.

A Figura 2-5 mostra a variedade de seções PFF utilizadas para as colunas em diversos estudos de porta-paletes seletivos, desde a mais simples Figura 2-5 (a), exemplo das primeiras seções rack, até as mais modernas Figura 2-5 (b), pensadas para viabilizar ligações parafusadas que garantam a resistência mecânica e manuseio logístico (Branquinho, 2021).

Figura 2-5 – Seções transversais típicas de porta-paletes utilizadas em diversos estudos: das mais simples (a) às mais modernas (b)



Fonte: Branquinho (2021)

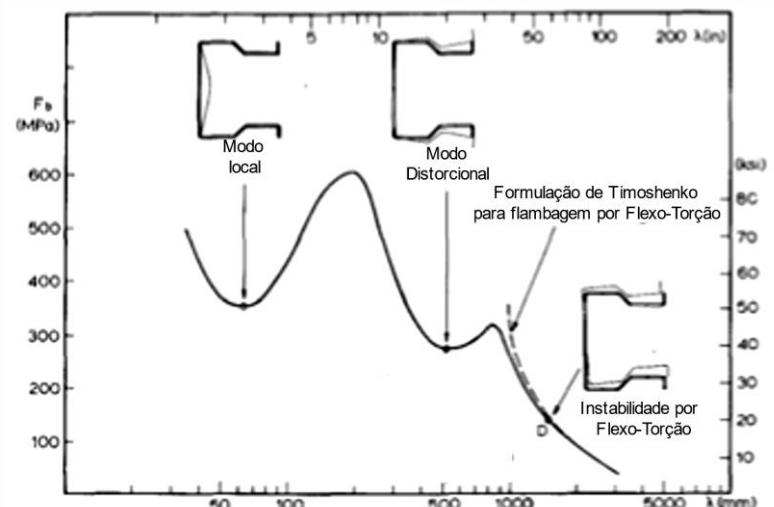
No âmbito dos perfis de aço formados a frio, é devido a esbeltez característica das peças que o fenômeno de bifurcação da trajetória de equilíbrio (fenômeno de perda da estabilidade) ocorre e se faz limitante nos projetos estruturais que utilizam tais perfis metálicos. Além disso, se tratando de seções abertas de paredes finas, i.e., seções com baixa inércia à torção, os fenômenos de instabilidades por flexo-torção e torção também se tornam susceptíveis. Por fim, no intuito de explorar a capacidade da conformação a frio de promover seções com elevada inercia, Silva *et al.* (2014) apontam ser comum a presença de enrijecedores de borda, os quais levam à tendência de instabilidades no perfil por modos distorcionalis, comportamento típico de seções como as ilustradas na Figura 2-5.

Diante do exposto, comprehende-se que seções rack incorporam as complexidades típicas do comportamento mecânico de PFF de seção monossimétrica aberta com a presença de enrijecedores. Além do mais, as constantes dobras feitas pelo trabalho a frio no aço provoca a presença significativa de tensões residuais nesses perfis, fator que eleva o comportamento não linear da estrutura (Branquinho, 2021; Sarawit; Pekoz, 2002).

Reis e Camotim (2000) citam que os efeitos da não linearidade geométrica reduzem a capacidade resistente de estruturas esbeltas em aço, visto que a sua falha, em geral, é condicionada ainda com o material em domínio elástico. À vista disto, Baldassino e Bernuzzi (2000) declaram que os efeitos de segunda ordem não podem ser negligenciados na determinação da capacidade última das colunas porta-paletes.

Nesse contexto, Baldassino e Bernuzzi (2000) alertam para o fato de possíveis limitações de projeto decorrentes de instabilidades locais, globais, e distorcionais, como também a interação entre estes modos. A Figura 2-6 exemplifica o exposto através de um gráfico de tensão de compressão por comprimento destravado (meia onda), obtido pela análise de estabilidade elástica de uma seção típica porta-palete.

Figura 2-6 – Gráfico de tensões críticas por comprimento de meia onda indicando os modos de instabilidade



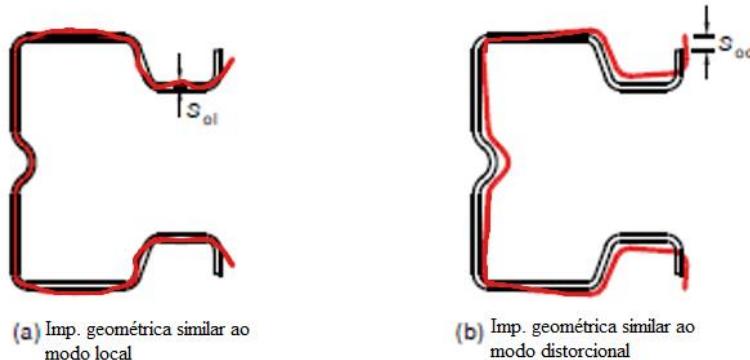
Fonte: Adaptado de Hancock (1985)

No âmbito dos efeitos de segunda ordem, há também a presença significativa de imperfeições geométricas à nível de seção transversal, denominadas imperfeições localizadas, as quais são semelhantes aos modos de instabilidade local e/ou distorcional, como ilustrado na Figura 2-7 (Branquinho, 2021).

Branquinho (2021) aponta que os efeitos das imperfeições localizadas podem alterar o modo de falha da estrutura, tendo um efeito desestabilizante ou restaurador. Em seu estudo, a autora aferiu a predominância de modos de instabilidade na coluna rack por flexo-torção, distorção e a interação entre estes modos e/ou interação com o modo global. Por fim, Branquinho (2021) afirma que a análise do comportamento estrutural das colunas rack é prejudicada pela negligência deste efeito de segunda ordem nas considerações de projeto, fato

que pode gerar resultados contra-segurança de capacidade última, visto que não há especificações e/ou tolerâncias normativas para as imperfeições geométricas localizadas.

Figura 2-7 – Imperfeições geométricas a nível de seção transversal da coluna

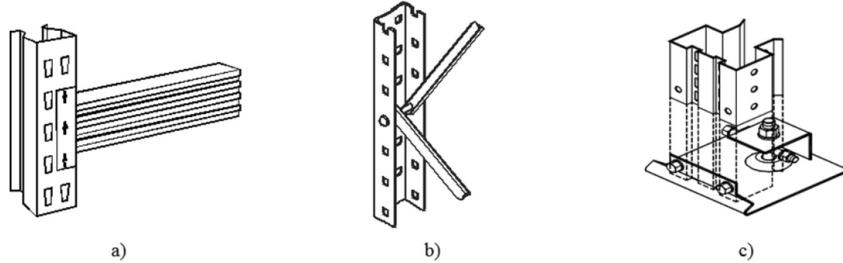


Fonte: Adaptado de AS 4084:2012

## 2.2 LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

Baldassino *et al.* (2019) afirmam que há 3 ligações características que compõem a estrutura tridimensional do rack, ilustradas na Figura 2-8, as quais são eventualmente foco das investigações da literatura.

Figura 2-8 – Detalhes das ligações de porta-palete (a) longarina-coluna (b) coluna-contraventamento (c) coluna-base



Fonte: Baldassino *et al.* (2019)

Na direção perpendicular ao corredor, os montantes se conectam com as barras diagonais e/ou travessas, Figura 2-8 (b). O sistema de pórtico treliçado possui estabilidade fortemente ligada ao contraventamento feito pelas diagonais. A campanha experimental realizada por Baldassino e Zandonini (2011) analisou, por meio de 100 ensaios padronizados, 23 diferentes modelos de pórticos perpendiculares ao corredor. Através dos resultados experimentais, os autores aferiram a influência significativa na forma em que a coluna e os contraventamentos são conectados. Isso se deve ao fato da inevitável excentricidade na transmissão das cargas entre os elementos, expondo a estrutura aos efeitos da flexo-torção e efeitos de segunda ordem. Por fim, os autores concluem o papel indispensável da ligação na capacidade última do pórtico perpendicular ao corredor.

Na direção do corredor, por razões logísticas, o pórtico não apresenta contraventamento, tornando sua estabilidade dependente principalmente das ligações entre longarina-coluna (Figura 2-8 (a)) e coluna-base (Figura 2-8 (c)). Nesse cenário, conforme conclusões do trabalho de Sarawit e Pekoz (2006), a transmissão dos esforços pelas ligações do pórtico momento resistente não é feita de forma perfeitamente rígida.

Segundo a definição fornecida pela ANSI/RMI MH16-1:2021, a rigidez consiste na propriedade estrutural de resistência mecânica às deformações, medida a partir da relação entre força ou momento e as deformações ou rotações correspondentes, respectivamente. À vista disso, o sistema não conservativo semirrígido representado pelas ligações longarina-coluna e ligações de base, possui, portanto, comportamento similar ao de molas.

Baldassino e Zandonini (2011) afirmam que o comportamento das ligações semirrígidas na direção do corredor é impactado principalmente pelas imperfeições geométrica dos componentes e pela existência de uma certa “falta de ajuste” das ligações na acomodação estrutural. Esses fatores resultam em uma relação momento-rotação ( $M-\theta$ ) altamente não linear físico-geométrica, mesmo para pequenas cargas (Baldassino; Zandonini, 2011). Além disso, há uma ampla variedade de ligações disponíveis no mercado, diferenciando-se principalmente em termos de geometria, sendo essa diversidade crescente à medida que as exigências de armazenamento evoluem com a demanda da indústria.

A primeira ligação semirrígida de interesse, a qual, segundo Branquinho (2021), é amplamente abordada na literatura e em procedimentos normativos, é a ligação entre longarina e coluna, também denominada BCC (“*beam-to-column connection*”), ilustrada na Figura 2-9. É exigido desse tipo de ligação versatilidade de montagem e fácil manuseio mecânico e, por isso, o sistema denominado BCC por encaixe é amplamente utilizado nos sistemas porta-paletes seletivos (Baldassino; Zandonini, 2011). As ligações BCC por encaixe são compostas por um conector de extremidade, geralmente em perfil laminado, o qual é soldado à longarina e se encaixa na coluna perfurada através das abas. Para a segurança desse sistema, é previsto um pino de travamento para eventuais encaixes mal executados (Baldassino; Zandonini, 2011).

O conector de extremidade é responsável pela transmissão de momentos fletores das longarinas para as colunas. Essa transmissão de esforços é penalizada pelas deformações do conector e pela faixa de deslocamentos para acomodação dos elementos. Tal configuração de montagem dos racks resulta em uma interrupção na continuidade do momento fletor no nó do pórtico, formado pelo encontro entre coluna e longarina. O caráter semirrígido das ligações

BCC é evidenciado no comportamento da sua curva momento *versus* rotação ( $M-\theta$ ) (Shah *et al.*, 2016).

Figura 2-9 – Detalhes das ligações BCC

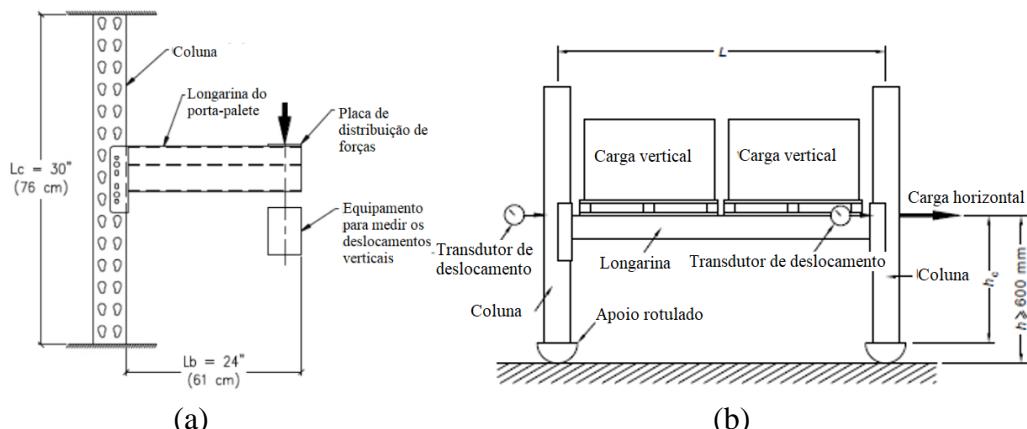


Fonte: Shah *et al.* (2016) *apud* Branquinho (2021)

Segundo Shah *et al.* (2016), em concordância com as especificações da EN 15512:2009, o comportamento mecânico da ligação BCC está principalmente relacionado a (i) disposição das abas no conector de extremidade, (ii) método de conexão entre longarina e coluna, (iii) geometria e modos de instabilidades da coluna, (iv) razão entre a espessura da coluna e do conector de extremidade, (v) folga existente entre os componentes estruturais, (vi) e propriedades dos materiais dos elementos estruturais.

Propostas experimentais de investigação do comportamento mecânico e rigidez das ligações BCC são eventualmente alvo das especificações das normas internacionais e brasileira. A ANSI/RMI MH16.1:2021 indica o ensaio denominado “*cantilever test*”, ilustrado na Figura 2-10 (a). Já a AS 4084:2012 e a ABNT NBR 15524-2:2007, além de indicarem o ensaio proposto pela norma norte americana, denominado na norma brasileira como ‘longarina em balanço’, também indicam o ensaio “efeito pótico”, ilustrado na Figura 2-10 (b).

Figura 2-10 – Ensaios experimentais propostos para estudo das ligações BCC (a) longarina em balanço ANSI/RMI MH16.1:2021 (b) efeito pótico AS 4084 (2012)



Fonte: Adaptado da ANSI/RMI MH16.1:2021 e AS 4084 (2012)

Nesse âmbito, as conclusões da campanha experimental realizada por Baldassino e Zandonini (2011) indicam que o aumento da rigidez das ligações BCC pode não resultar no aumento da capacidade resistente do porta-paleta, mas sim influenciar no modo de instabilidade predominante no colapso do sistema momento resistente.

Diante do exposto, nota-se que o comportamento das ligações longarina-coluna é alvo de diversas especificações normativas de ensaio, sendo também o foco de inúmeros estudos experimentais, numéricos e teóricos. Todavia, o mesmo não se aplica ao caso das ligações entre colunas e piso, as quais se encontram em um cenário de especificações normativas de projeto bastante generalizadas, sendo, por isso, pouco representativas (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que, apesar de destacarem de forma unânime a importância da ligação semirrígida de base na estabilidade do pórtico momento resistente, as recomendações normativas existentes sobre este componente, não raras as vezes, apresentam especificações generalizadas e/ou que divergem entre si, o que muitas vezes motiva simplificações de projeto, tais como consideração da ligação como rotulada ou engastada.

Baldassino e Zandonini (2011) realizaram um extenso estudo experimental sobre diferentes arranjos estruturais componentes do rack. Os autores concluem que a restrição imposta pela rigidez da ligação de base é a condição de contorno com grande potencial de afetar diretamente a capacidade última da estrutura porta-paleta seletivo. Por isso, Roure *et al.* (2016) afirmam que a quantidade de estudos com enfoque no comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes vem crescendo constantemente nas últimas décadas. Esse crescimento é resultado da compreensão da importância que esse arranjo estrutural, responsável por ancorar o rack ao piso, tem na estabilidade global.

Posto isso, o Capítulo 3 do presente trabalho apresenta o estado da arte referente às investigações do comportamento mecânico das ligações de base de colunas de porta-paleta seletivos, bem como estudos e especificações normativas a respeito dos efeitos desse componente na estabilidade global do pórtico na direção do corredor.

## 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou as características das estruturas porta-paletes seletivos e dos principais elementos estruturais que as compõem. Nesse sentido, evidenciou-se as contribuições, positivas ou não, destes elementos para a estabilidade da estrutura porta-paleta.

*A priori*, foram apresentados os pontos relevantes sobre os característicos comportamentos dos porta-paletes seletivos na direção do corredor. Nota-se que as limitações das análises estruturais do sistema momento resistente (pórtico paralelo ao corredor) são justificadas pela presença de complexos efeitos não negligenciáveis no comportamento mecânico e estabilidade dos porta-paletes. Tais efeitos, em geral desestabilizantes, ainda são pouco abordados pelos procedimentos analíticos de cálculo de estruturas metálicas convencionais.

Em sequência, foram apresentadas as principais especificações normativas vigentes para estruturas porta-paletes seletivos e suas instruções para análise estrutural. Nesse sentido, evidenciou-se as especificações quanto a consideração dos fatores críticos à estabilidade do pórtico na direção do corredor. Dentre diferentes especificações, é consenso entre os documentos normativos a relevância em se avaliar de forma individualizada os principais componentes estruturais que compõem o porta-paleta seletivo. Sendo assim, o primeiro elemento descrito no presente trabalho é a coluna rack.

Nota-se que, em função da sua típica geometria e padrão de perfurações, as colunas porta-paletes são sensíveis a efeitos de segunda ordem, imperfeições geométricas, tensões residuais e efeitos da redução da área resistente. Consequentemente, o comportamento desse elemento é tipicamente não linear físico e geométrico, tendo a presença de diferentes modos de instabilidades e a recorrente interação entre os modos. Portanto, as colunas porta-paletes, em contrapartida ao seu complexo comportamento mecânico, são primordiais na estabilidade e capacidade resistente do pórtico na direção do corredor.

Ainda no âmbito dos elementos que contribuem para a estabilidade dos porta-paletes, no presente capítulo foram apresentadas as três ligações típicas dessa estrutura. De conhecimento das características típicas do pórtico na direção do corredor, comprehende-se os esforços em se investigar o comportamento semirrígido das ligações do sistema momento resistente, i.e., ligação coluna-longarina (BCC) e ligações de base.

Diante do exposto, em contraste às diversas diretrizes e estudos voltados à ligação BCC, as ligações de base se encontram em um cenário de poucas especificações. Todavia, é consenso entre estudos da literatura a relevância em se compreender o comportamento mecânico das ligações de base de colunas porta-paletes, visto que possuem impacto direto na capacidade portante e modos de instabilidade do pórtico na direção do corredor. Por isso, em sequência, o Capítulo 3 contextualiza as características típicas do comportamento mecânico do arranjo estrutural de base dos porta-paletes e apresenta as disposições normativas vigentes.

Por fim, torna-se evidente a importância de se compreender de forma holística os comportamentos mecânicos típicos de estruturas porta-paletes seletivos e de seus principais componentes, mesmo que se pretenda investigar um arranjo estrutural em específico. Por conseguinte, o Capítulo 2 compõe a sequência de fundamentações necessárias para se desenvolver o estudo sobre o comportamento mecânico das ligações de base de colunas porta-paletes.



### 3 LIGAÇÕES DE BASE DE COLUNAS PORTA-PALETES SELETIVOS

O elemento estrutural denominada “sapata” pela ABNT NBR15524-1:2007, mais comumente intitulado como ligação de base, é responsável por transmitir os esforços axiais e momentos fletores do rack para a fundação. A ABNT NBR 15524-2:2007 exige que todos os montantes do porta-paleta precisam ser fixados ao piso por meio de uma sapata. Geralmente, esses componentes são constituídos por uma placa de base, a qual é ancorada ao piso de concreto por barras ou chumbadores.

A norma americana ANSI/RMI MH16.1:2021, visando a integridade e manutenção dos porta-paletes, especifica a importância do uso de placas de base nas extremidades das colunas em contato com o piso. Nesse âmbito, o documento americano não exige ligações de base apenas para o caso de racks com até 2,4 metros de altura entre o piso e a última longarina com uma logística de armazenamento que ocorra de forma manual.

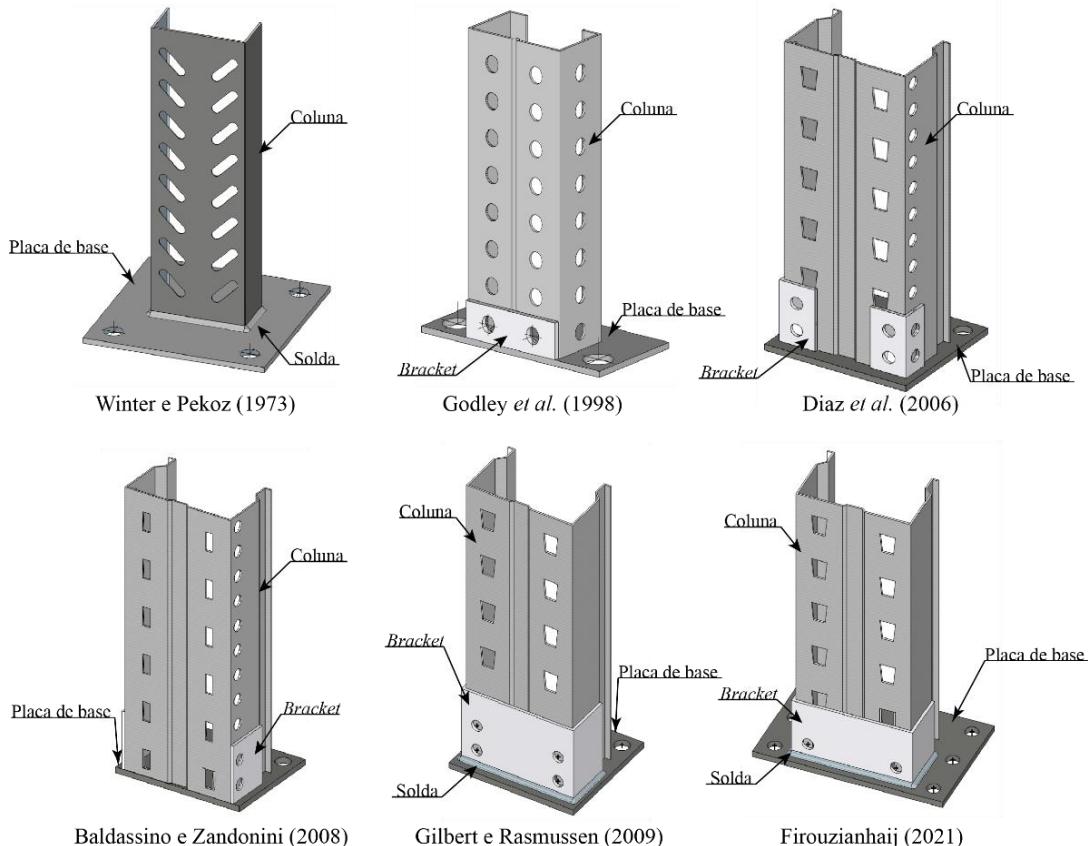
Segundo Gilbert e Rasmussen (2011), a ligação da placa de base com a coluna porta-paleta pode ser feita de diferentes formas, a depender: do fabricante, da proporção do rack e do padrão de perfurações na coluna. Sendo assim, alguns modelos de ligação de base presentes na literatura são ilustradas na Figura 3-1. Um exemplo mencionado por Gilbert e Rasmussen (2011) que destaca a recorrente variabilidade de modelos da ligação coluna-base de porta-paletes é a diferença do arranjo estrutural decorrente da região do fabricante. Nesse cenário, fabricantes estadunidenses geralmente conectam as colunas às placas de base por meio de soldas, como exemplificado na Figura 3-1 para o estudo de Winter e Pekoz (1973). Já os modelos comuns de fabricantes europeus, possuem um dispositivo que “recebe” a coluna rack denominado *bracket*, também esboçado nos exemplos da Figura 3-1, o qual é parafusado ao restante da estrutura e pode apresentar diferentes geometrias (Gilbert; Rasmussen, 2011).

Portanto, no âmbito estrutural, comprehende-se que a diversidade de modelos de ligações de base é possível pela variedade de (i) formas de conexão entre a coluna e a placa de base, (ii) disposição dos parafusos de ancoragem, (iii) geometria da placa de base, (iv) altura e geometria do *bracket* e (v) o posicionamento da coluna com relação à placa de base.

Apesar do avanço dos estudos investigativos sobre o arranjo estrutural de base dos porta-paletes, as especificações de projeto que definem parâmetros mecânicos da ligação de base, se existentes, tendem a ser generalistas e, por vezes, pouco representativas do comportamento real

do componente. Por consequência, é comum que este cenário de poucas especificações acessíveis conduza a dimensionamentos conservadores, que negligenciam o comportamento semirrígido da ligação de base, ou até mesmo a casos de projetos contra-segurança, dependendo das negligências assumidas no processo de análise e dimensionamento (Godley *et al.*, 1998; Bernuzzi *et al.*, 2017).

Figura 3-1 – Diferentes modelos de ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste cenário, Baldassino e Zandonini (2011) destacam que o dimensionamento de ligações de base para porta-paletes é pouco similar ao dimensionamento de ligações que ancoram outras estruturas metálicas à fundação. Este fato se deve aos parâmetros críticos levantados pelos autores na determinação da rigidez, resistência, e ductilidade da base dos porta-paletes seletivos, os quais são: (i) influência das folgas de encaixe entre placa de base e coluna na rigidez rotacional, (ii) deformações plásticas e modos de instabilidade na coluna nas proximidades com a base, (iii) instabilidades locais nos elementos componentes da ligação e/ou a interação entre estes fenômenos com a formação de rótulas plásticas na placa de base, (iv) localização da coluna em relação a placa de base, (v) a típica transmissão parcial de esforços normais e momentos fletores entre os componentes estruturais, e (vi) a ocorrência de fenômenos de flexo-torção.

Outro fator limitante ao procedimento de análise estrutural das placas de base, mas agora no âmbito construtivo, é o fato de que, em geral, não é comum a avaliação estrutural da adequação do piso de concreto que suporta o porta-paleta, isto não só em termos de capacidade estrutural, como também em alinhamento da superfície. Na grande maioria dos casos, a execução da edificação não tem interação nenhuma com o projeto do rack. Por isso, com o conhecimento da recorrência desse cenário, os procedimentos normativos possuem simplificações previstas para esta falta de compatibilização entre projetos, especificações estas que normalmente recaem no cenário típico de dimensionamentos conservadores de estruturas porta-paletes seletivos (Bernuzzi *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a ABNT NBR 15524-2:2007, para o caso de desconhecimento da resistência do piso, impõe a necessidade de meios para considerar um contorno rígido para o porta-paleta. Esta exigência é fundamentada pela norma brasileira devido ao fato de que a falta de especificações sobre o material do piso impossibilita a consideração das forças estabilizadoras provenientes da ancoragem por chumbadores da placa de base. Nesse cenário, Baldassino e Zandonini (2008) afirmam que o reforço estrutural para consideração do piso de concreto como uma estrutura rígida não é uma tarefa trivial, pois gera aumentos significativos no orçamento e cronograma de execução da estrutura porta-paleta seletivo.

Conforme as limitações apresentadas, Baldassino e Zandonini (2008) afirmam que a estratégia geralmente adotada pelos projetistas é de reduzir a capacidade portante do rack, visando, consequentemente, reduzir os efeitos de segunda ordem na estrutura. Todavia, os autores alertam que tal simplificação não garante a segurança do dimensionamento da estrutura porta-paleta seletivo.

A norma australiana AS 4084:2012 reforça a necessidade de um projeto adequado do piso de concreto, levando em consideração a instalação do porta-paleta. Recomenda-se comunicar previamente as dimensões do rack e os esforços axiais previstos, a fim de garantir que o dimensionamento do piso seja realizado de maneira ideal. Todavia, ciente da frequente ausência de informações detalhadas sobre o material do piso no qual o rack será fixado, a AS 4084:2012 recomenda a adoção de uma resistência de 25 MPa para cálculo e análise estrutural, simplificação que se restringe ao caso de pisos de concreto. Nesse contexto as normas ANSI/RMI MH16.1:2021 e EN 15512:2009 indicam a possibilidade de o projetista adotar o valor de 20 MPa para as verificações estruturais.

Godley *et al.* (1998) afirmam que as deformações não uniformes do piso, em resposta aos momentos fletores transmitidos pela placa de base, resultam em tensões adicionais e inclinações indesejadas na estrutura do rack, comportamento que se soma aos efeitos desestabilizantes de segunda ordem. Sendo assim, por se tratar de uma estrutura em PFF perfurados de elevada esbeltez, Baldassino e Zandonini (2008) afirmam que as contribuições da ligação de base na estabilidade do pórtico momento resistente, positivas ou não, não devem ser negligenciadas.

A incorporação da semirrigidez da ligação de base na análise estrutural global de porta-paletes seletivos ocorre considerando o arranjo estrutural como um nó ou elemento de ligação com propriedades lineares ou não lineares (Gilbert; Rasmussen, 2009). O comportamento mecânico da ligação coluna-base é devidamente caracterizado pela curva momento-rotação ( $M-\theta$ ) do arranjo estrutural. Isto se deve ao fato de a curva do comportamento constitutivo da ligação de base incorporar sua resistência às rotações de forma satisfatória e, consequentemente, guiar as análises estruturais do porta-paleta com maior confiabilidade (Sarawit; Pekoz, 2002).

Segundo investigações da literatura, e.g. Godley *et al.* (1998), Çelik *et al.* (2022) e Branquinho (2021), os fatores limitantes para a caracterização do comportamento mecânico da ligação de base e definição da curva  $M-\theta$  do arranjo estrutural, são:

- i. O comportamento característico não linear físico-geométrico da ligação;
- ii. A dissipação parcial de energia entre a coluna rack e o piso de concreto, que fundamenta a comparação entre os efeitos da ligação de base com o comportamento de uma mola;
- iii. A possibilidade de diferentes modos de falha na base e/ou em regiões próximas a mesma, e.g. rótulas plásticas, modos locais, distorcionalis e de flexo-torção na coluna e a interação entre estes modos e o global;
- iv. A grande diversidade de modelos comerciais para ligação de base de colunas de porta-paletes, exemplificado na Figura 3-1, os quais alteram parâmetros que mudam a resposta estrutural do componente;
- v. Escassez de especificações detalhadas sobre a resposta estrutural das ligações de base de porta-paletes seletivos, bem como poucos fundamentos sobre como incorporar o comportamento mecânico do componente na análise estrutural do sistema global;

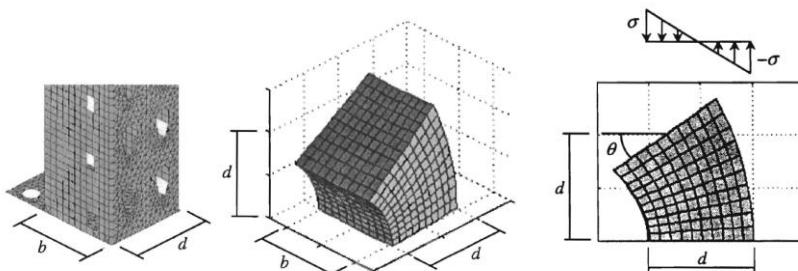
Nesse contexto, algumas propostas analíticas de avaliação da rigidez rotacional das ligações de base de colunas rack surgiram na literatura, as quais assumem diferentes hipóteses simplificadoras.

As especificações do RMI (2008) admitem o comportamento da ligação de base como uma relação linear entre momento ( $M$ ) e rotação ( $\theta$ ), dada pela Equação (1). Esta formulação foi desenvolvida por Salmon *et al.* (1955), na qual os autores admitem que o piso de concreto está exposto a um momento fletor linearmente distribuído na área da placa de base em torno do eixo de maior inércia da coluna rack, conforme ilustrado na Figura 3-2.

Na Equação (1), ' $E_c$ ' é o módulo de elasticidade do concreto à compressão e ' $b$ ' e ' $d$ ' são as dimensões da seção transversal da coluna, paralela e perpendicular ao eixo de flexão, respectivamente, conforme Figura 3-2. Faz-se relevante mencionar que a formulação de Salmon *et al.* (1955) avalia a rigidez da ligação de base de colunas rack considerando apenas a contribuição de resistência promovida pelo material do piso que recebe a estrutura.

$$\frac{M}{\theta} = \frac{b d^2 E_c}{12} \quad (1)$$

Figura 3-2 – Modelo de deformação do concreto que ancora a ligação de base de porta-paletes seletivos, segundo formulação de Salmon *et al.* (1955)



Fonte: Sarawit e Pekoz (2002)

Nesse contexto, Sarawit e Pekoz (2002) apontam algumas inconsistências na proposta do RMI (2008). Os autores afirmam que a formulação de Salmon *et al.* (1955) desconsidera os efeitos da força axial da coluna, que também é transferida pela placa de base ao piso, estratégia que resulta em valores conservadores de rigidez rotacional. A negligência dos esforços de compressão leva à desconsideração do confinamento do material no entorno da placa de base, efeito que Sarawit e Pekoz (2002) apontam como potencial estabilizador da estrutura, pois proporciona ganho de resistência na deformação do concreto.

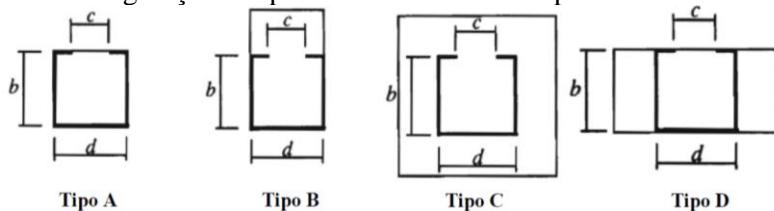
Por fim, Sarawit e Pekoz (2002) também concluem que a distribuição da tensão normal, transmitida da placa de base para o concreto, não seria linear, como ilustrado na Figura 3-2,

mas sim concentrada no entorno da seção transversal da coluna porta-paleta. Os autores explicam que esse comportamento ocorre devido às dimensões da espessura da seção transversal da coluna rack e da placa de base serem significativamente menores que as dimensões do arranjo estrutural da ligação. Isso faz com que o caminhamento das tensões se concentre no entorno da pequena área de contato entre placa base e coluna.

Nesse sentido, o estudo realizado por Sarawit e Pekoz (2002) teve por objetivo compreender a transmissão de esforços da placa de base para o piso, buscando uma maneira de quantificar as deformações resultantes do concreto, para então, caracterizar a rigidez da ligação de base. Assim sendo, para as hipóteses do método de Sarawit e Pekoz (2002), a distribuição de tensões normais e, consequentemente, rigidez rotacional da ligação de base, dependem essencialmente (i) da consideração dos efeitos de confinamento do concreto em função da flexo-compressão atuante na base, (ii) concentrações de tensão devido à geometria dos componentes, expressa na relação da espessura da placa de base ( $t_p$ ) e da seção do rack ( $t_w$ ) e (iii) localização da coluna com relação a placa de base.

Isto posto, com objetivo de corrigir as inconsistências da proposta de Salmon *et al.* (1955), Sarawit e Pekoz (2002) apresentam um extenso estudo numérico no qual são avaliadas as formas de distribuições de tensão normal para uma seção rack tipo C conectada a 4 distintas configurações de placa de base, as quais são ilustradas na Figura 3-3. Por fim, os autores obtiveram as rotações da ligação de base decorrentes da deformação do piso de concreto.

Figura 3-3- Configurações de placa de base estudadas por Sarawit e Pekoz (2002)



Fonte: Adaptado de Sarawit e Pekoz (2002)

Definida a forma como as tensões normais atuam no concreto confinado, é possível compreender como o material da placa de base se deforma e assim obter as rotações resultantes no componente estrutural. Além disso, a análise por meio do método dos elementos finitos (MEF) de Sarawit e Pekoz (2002), desconsiderou os efeitos de torção na coluna e o efeito de atrito entre os componentes. Por fim, os autores consideraram o material da ligação de base como elasto-plástico e os efeitos de ancoragem da placa de base foram inseridos no modelo através de condições de contorno idealizadas, as quais garantiam a imposição de deslocamentos entre a placa de base e a superfície de concreto (Sarawit; Pekoz, 2002).

As análises paramétricas de 900 modelos numéricos não lineares físico-geométricos, realizadas por Sarawit e Pekoz (2002), assumiram a parametrização das seguintes relações geométricas: ‘ $bd$ ’, ‘ $d/b$ ’, ‘ $c$ ’, ‘ $t_w$ ’ e ‘ $t_p/t_w$ ’. Os resultados indicaram que a placa que transferiu os esforços de forma mais uniforme ao concreto foi o arranjo tipo C, i.e., o modelo em que a coluna é centralizada na placa de base. Os modelos de placa de base tipo A e B apresentaram similaridades entre seus resultados, assim como os resultados das placas tipo C e D também exibiram conformidade entre si. Segundo Sarawit e Pekoz (2002), a semelhança dos resultados numéricos entre os pares de configuração de placa de base se justifica pelo fato do momento fletor ser transferido majoritariamente pelas mesas.

Diante do exposto, os autores propuseram a Equação (2) para a expressão da rigidez rotacional dos modelos tipo A e B e a Equação (3) para os modelos tipo C e D. Sarawit e Pekoz (2002) apontam que as formulações propostas são válidas para o estudo da rigidez inicial das ligações de base, i.e., a circunstância em que a placa ainda está em contato com o piso em regime elástico de deformação do aço. Em vista disso, os autores delimitaram uma faixa limite para utilização das equações (2) e (3), dada pela desigualdade da Equação (4), na qual ‘ $A$ ’ é a área transversal da coluna rack, ‘ $S$ ’ é o módulo de flexão também da coluna para a fibra mais tensionada e ‘ $P$ ’ é a carga axial de compressão do arranjo estrutural.

$$\frac{M}{\theta} = \frac{7b d^2 E_c}{25} \quad (2)$$

$$\frac{M}{\theta} = \frac{7b d^2 E_c}{20} \quad (3)$$

$$\frac{M}{P} \leq \frac{S}{A} \quad (4)$$

Por fim, Sarawit e Pekoz (2002) apontam que a proposta analítica de seu estudo pode resultar em rigidezes conservadoras, pois desconsideraram o comportamento pós-crítico presente em PFF. Em contrapartida, pelas análises numéricas desconsiderarem os efeitos de torção no arranjo estrutural da ligação, em geral, desestabilizantes, Sarawit e Pekoz (2002) concluem que os resultados de rigidez rotacional podem ser considerados adequados para projetos de porta-paletes seletivos. Nesse cenário, os autores alertam que o fenômeno previsto pela Teoria de Vlasov (1961) – flexo-torção em seções monossimétricas –, não raras as vezes, determina o modo de falha de estruturas porta-paletes seletivos, conclusão similar ao estudo de caso de Affolter *et al.* (2009), Figura 2-1.

Importante ressaltar que a formulação proposta por Sarawit e Pekoz (2002) assume apenas a rotação na placa de base decorrente da deformação do piso de concreto, negligenciando outros efeitos mecânicos também influentes na rigidez da ligação de base (Baldassino; Zandonini, 2008). Nesse sentido, estudos sobre ligações de base de porta-paletes, e.g. Gilbert e Rasmussen (2011), Çelik *et al.* (2022), Huang *et al.* (2021), e Firouzianhaij *et al.* (2022), progrediram no intuito de investigar quais parâmetros referentes ao arranjo estrutural de base são primordiais para o seu comportamento mecânico. Além disso, há estudos designados a compreender como a semirrigidez típica do componente impacta na estabilidade global do porta-palete, e.g. Bernuzzi *et al.* (2017), Baldassino e Bernuzzi (2000) e Baldassino e Zandonini (2011).

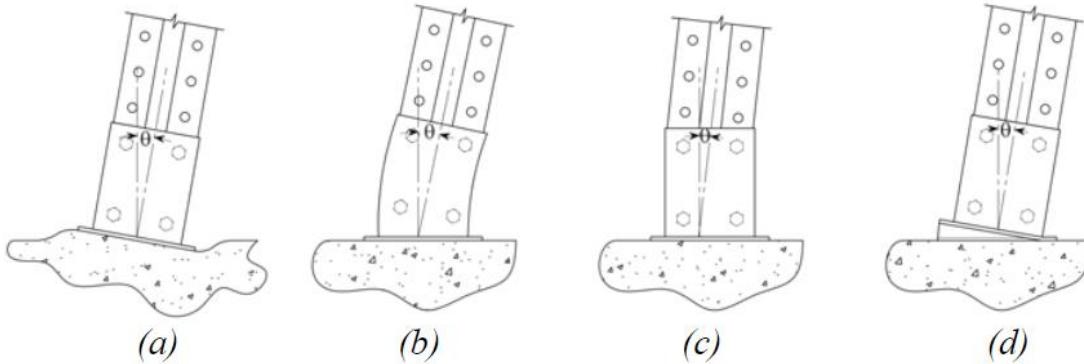
Segundo Gilbert e Rasmussen (2009), as rotações características das ligações de base de porta-paletes seletivos podem ser classificadas na colaboração de 4 principais componentes, ilustrados na Figura 3-4 e detalhadas a seguir:

- i. Parcada de deformação local do piso de concreto abaixo da placa de base, Figura 3-4 (a). Rotação que caracteriza a proposta de Sarawit e Pekoz (2002) e que Godley *et al.* (1998) afirmam ser significativa aos porta-paletes, diferentemente das estruturas metálicas convencionais, visto que se apoiam sob finas camadas de concreto;
- ii. Componente de deformação por flexão do *bracket*, Figura 3-4 (b), o qual, segundo Firouzianhaij *et al.* (2022), auxilia na transferência dos esforços fletores e promove o ganho de rigidez da ligação;
- iii. A parcada de deformação da coluna devido a flexão e rotação relativa à placa de base, Figura 3-4 (c), a qual é indicada por Gilbert e Rasmussen (2011) como efeito presente já nas primeiras relações momento e rotação da ligação de base;
- iv. Formação de rótulas plásticas na placa de base, que resultam em efeitos desestabilizantes à ligação, Figura 3-4 (d), e que, segundo Gilbert e Rasmussen (2011), conferem maior não linearidade ao comportamento mecânico da ligação de base do porta-palete seletivo;

Em síntese, fica claro a importância de se compreender as deformações características das ligações de base, haja vista suas implicações nas investigações do comportamento mecânico do arranjo estrutural. Por fim, nota-se que os comportamentos ilustrados na Figura 3-4 são

diretrizes importantes para os estudos experimentais e numéricos sobre ligações de base e seus efeitos na estabilidade global dos porta-paletes seletivos (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Figura 3-4 – Deformações características das ligações de base de racks (a) deformação do piso de concreto, (b) flexão do *bracket*, (c) rotação de deformações locais da coluna, (d) rotação da placa de base por formação de rótulas plásticas



Fonte: Gilbert e Rasmussen (2011)

Nesse âmbito, validados por uma campanha experimental, Gilbert e Rasmussen (2009) propuseram um método analítico para obtenção da rigidez rotacional das ligações de base. Sendo assim, os autores adotam a formulação de Sarawit e Pekoz (2002) para quantificar os efeitos do piso no comportamento da ligação, dado pela Equação (5) em termos de rigidez ( $K_b$ ).

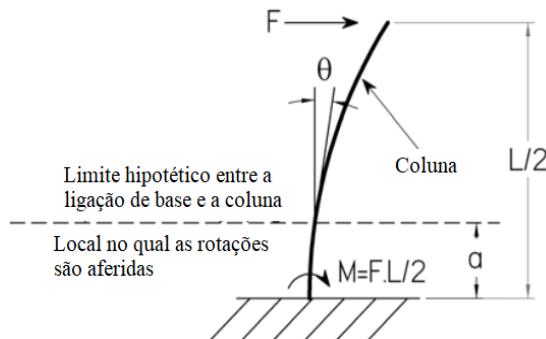
$$K_b = \frac{7b d^2 E_c}{25} \quad (5)$$

Em sequência, Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que um sistema estaticamente equivalente ao arranjo estrutural de base de porta-paletes seletivos é representado pela estrutura da Figura 3-5. Nesse cenário, fundamentados por uma análise elástica linear do comportamento estrutural, os autores determinaram analiticamente a rigidez aos momentos fletores da coluna ( $K_u$ ) nas proximidades com a ligação de base, dada pela Equação (6). A rigidez ' $K_u$ ', refere-se ao fenômeno ilustrado na Figura 3-4 (c) (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Na Equação (6), ' $E$ ' e ' $I_c$ ' são, respectivamente, o módulo de elasticidade do aço e o momento de inércia da coluna e ' $L$ ' é o dobro do comprimento da coluna avaliada. Faz-se relevante mencionar que a linha delimitada na Figura 3-5 refere-se à altura do *bracket* da ligação de base ou a altura do posicionamento dos transdutores de deslocamento, caso queira-se comparar a previsão teórica com resultados experimentais. Por fim, comprehende-se que a rigidez rotacional ' $K_u$ ' considera uma ligação de base engastada.

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{FL}{2} \\ \theta &= \frac{Fa}{2EI_c}(L-a) \end{aligned} \right\} \Rightarrow M = K_u \theta = \frac{EI_c L}{(L-a)a} \theta \Rightarrow K_u = \frac{EI_c L}{(L-a)a} \quad (6)$$

Figura 3-5 – Sistema estaticamente equivalente ao experimento da ligação de base



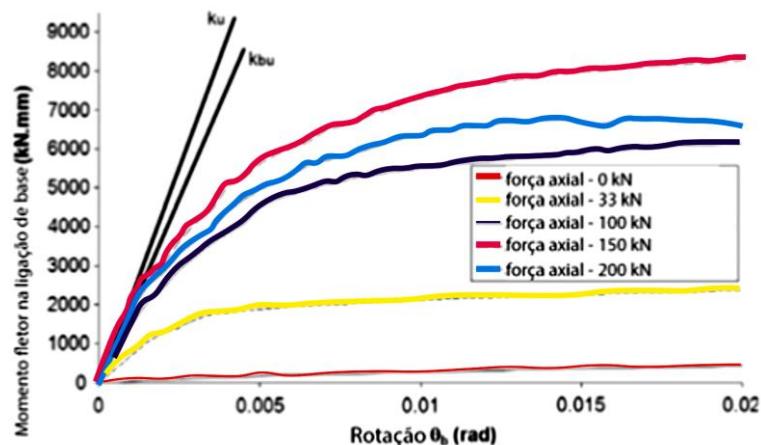
Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2009)

Por conseguinte, para uma proposta analítica de rigidez rotacional que considera tanto as rotações do piso de concreto, quanto as deformações da coluna Gilbert e Rasmussen (2009) fizeram a associação de rigidezes pela Equação (7), a qual soma as componentes ‘ $K_b$ ’ e ‘ $K_u$ ’, conforme a associação em série de um sistema de duas molas.

$$K_{bu} = \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_u}} \quad (7)$$

O gráfico da Figura 3-6 compara os resultados teóricos de rigidez ‘ $K_u$ ’ e ‘ $K_{bu}$ ’ com as curvas M-θ experimentais obtidas por Gilbert e Rasmussen (2009). A diferença nos valores entre a situação de engaste perfeito ( $K_u$ ) e rigidez desenvolvida pela associação dos efeitos do piso e da coluna ( $K_{bu}$ ) confirmam os resultados elevados de rigidez promovidos pelo método de Sarawit e Pekoz (2002).

Figura 3-6 – Comparação das propostas de rigidez  $K_u$  e  $K_{ub}$



Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

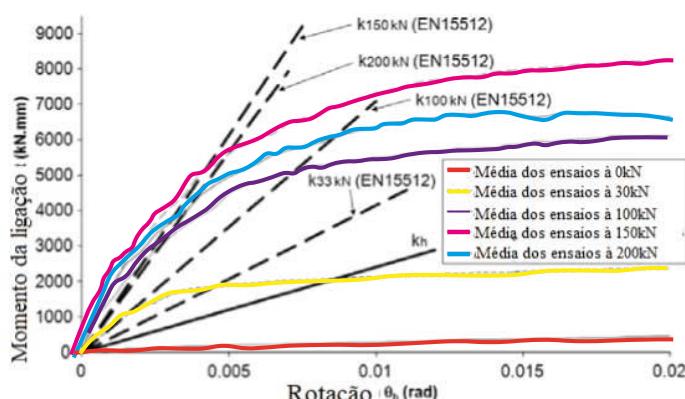
Além disso a rigidez analítica ' $K_{bu}$ ' apresenta similaridade com a rigidez elástica das amostras sob cargas axiais elevadas (150 kN e 200 kN). Portanto, Gilbert e Rasmussen (2009) concluem que as primeiras rotações apresentadas pela ligação de base, caracterizada pela fase elástica do material, são compostas majoritariamente pelos efeitos de deformações no piso de concreto e deformações da coluna nas proximidades com o arranjo da ligação de base.

Ainda no âmbito de propostas teóricas para definição da rigidez da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos, Godley (2007) afirma que há um limite inferior de valores de rigidez rotacional para ligações de base, o qual representa o valor de referência para análise dos impactos do arranjo na capacidade última e estabilidade da estrutura porta palete na direção do corredor. Nesse cenário, Godley (2007) limitou a rigidez da ligação de base ( $K_h$ ) conforme expressão dada pela Equação (8), na qual ' $h$ ' é a distância entre o piso e a primeira longarina.

$$M = K_h \theta = \frac{EI_c}{h} \theta \Rightarrow K_h = \frac{EI_c}{h} \quad (8)$$

A Figura 3-7 ilustra a análise comparativa entre os (i) resultados experimentais de Gilbert e Rasmussen (2009), (ii) resultados da proposta de análise experimental especificada na EN 15512:2009 e (iii) rigidez ' $K_h$ ' de Godley (2007). Nesse contexto, de acordo com a formulação proposta por Godley (2007), como os resultados de rigidez das amostras ensaiadas se apresentam maiores que a rigidez limite ' $K_h$ ', é possível simplificar o comportamento da ligação de base como um engaste. Portanto, o método de Godley (2007) admite que, para as ligações de base analisadas por Gilbert e Rasmussen (2009), resultados confiáveis de capacidade última do pórtico na direção do corredor podem ser obtidos a partir da hipótese de uma ligação de base perfeitamente rígida.

Figura 3-7 – Comparação entre curvas experimentais de Gilbert e Rasmussen (2011) e propostas de rigidez da ligação de base da EN 15512:2009 e de Godley (2007)



Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

Nota-se que as rigidezes teóricas propostas pela literatura procuram promover especificações acessíveis aos projetos de porta-paletes seletivo. Nesse sentido, fundamentada pelas conclusões do estudo de Gilbert e Rasmussen (2009), o quadro da Figura 3-8 resume as propostas analíticas de rigidez rotacional e a sua consideração, ou não, dos respectivos comportamentos que compõem a rotação da ligação (Figura 3-4).

Figura 3-8 – Quadro comparativo das propostas analíticas de rigidez rotacional de base

	i) Deformações no piso	ii) Rotações nos componentes	iii) Rotações na coluna	iv) Rótulas plásticas
Sarawit e Pekoz (2002)	$\frac{M}{\theta} = \frac{7b d^2 E_c}{25}$	$\frac{M}{\theta} = \frac{7b d^2 E_c}{20}$		
Gilbert e Rasmussen (2009)	$K_{bu} = \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_u}}$			
Godley (2007)	$K_h = \frac{E I_c}{h}$			

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse contexto, Branquinho (2021) afirma que o projeto de ligações de base não é uma tarefa trivial, ainda mais em razão da extensa variedade de modelos disponíveis no mercado, elucidado na Figura 3-1. Assim sendo, em concordância com as simplificações expostas no quadro da Figura 3-8, Branquinho (2021) aponta que se torna praticamente inviável uma formulação teórica geral capaz de prever o comportamento mecânico e estabilidade da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos.

Nesse cenário, investigações eficientes do comportamento mecânico das ligações de base recaem, em sua quase totalidade, no apoio de análises experimentais ou, como apontado por Baldassino e Zandonini (2011), na abordagem *Design by testing*, prevista nas especificações de ensaio da EN 15512:2009.

Em vista do exposto, inserido no contexto de poucas especificações normativas quanto ao comportamento semirrígido da ligação de base, os itens subsequentes procuram descrever as recomendações em documentos oficiais existentes para este componente da estrutura porta-paleta seletivo. Além disso, também serão detalhadas as investigações experimentais realizadas pela literatura e propostas pelas normas internacionais.

### 3.1 PROCEDIMENTOS NORMATIVOS PARA LIGAÇÃO DE BASE

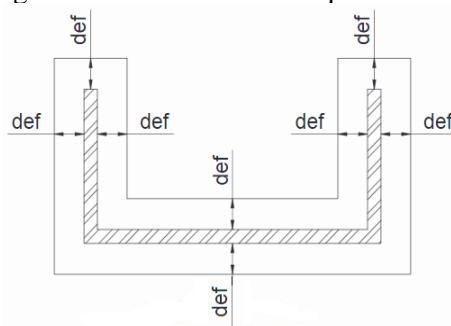
Diferentemente das ligações longarina-coluna, as recomendações de ensaios experimentais e considerações sobre a rigidez das ligações da base não costumam ser alvo das especificações normativas destinadas à porta-paletes (Branquinho, 2021). Baldassino e Zandonini (2008) sugerem que isto é reflexo das simplificações permitidas pelos documentos normativos, as quais levam os projetistas a adotarem ligações de base rotuladas ou engastadas ao piso, estratégia de projeto que pode resultar em dimensionamentos contra-segurança do pórtico momento resistente, conforme conclusões do estudo de Sarawit e Pekoz (2002).

A ABNT NBR 15524-2:2007 se abstém de qualquer recomendação com relação aos procedimentos de ensaio da ligação de base. Quanto ao comportamento da placa de base, suas especificações se restringem à adoção de tensões uniformemente distribuídas na área efetiva da sapata e à exigência sobre o conhecimento da resistência do piso de instalação da estrutura porta-palete. A área efetiva da placa de base (Figura 3-9) é definida pela ABNT NBR 15524-2:2007 como a região responsável por transmitir os esforços axiais ao piso. Nesse sentido, a área efetiva é delimitada por uma distância efetiva ( $d_{ef}$ ) calculada pela Equação (9), na qual ‘ $e$ ’ e ‘ $f_y$ ’ são a espessura e tensão de escoamento do aço da placa de base, respectivamente, e ‘ $F_c$ ’ é a tensão do material do piso para pressão de contato.

$$d_{ef} = e \sqrt{\frac{f_y}{2F_c}} \quad (9)$$

Portanto, as especificações da norma brasileira se restringem a definir uma área mínima da placa de base, que distribui uniformemente a tensão admissível axial do arranjo estrutural. Note que, as provisões da norma brasileira avaliam apenas a resistência elástica dos materiais da ligação de base aos esforços axiais, desconsiderando os esforços fletores e omitindo o dimensionamento da peça à efeitos de segunda ordem.

Figura 3-9 – Área efetiva da placa de base



Fonte: ABNT NBR 15524-2:2007

Nesse âmbito, a norma europeia EN 15512:2009 é ligeiramente mais conservadora na definição da distância efetiva ( $d_{ef}$ ), conforme expresso na Equação (10), na qual foi feita a adaptação da nomenclatura das variáveis para estar condizente com a Figura 3-9. Nas especificações da norma europeia, caso o piso seja de concreto, a tensão do material ( $F_c$ ) é considerada penalizando a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), conforme Equação (11), na qual o coeficiente de segurança do material ( $\gamma_m$ ) é igual a 1,5. A partir da definição de uma área efetiva ( $A_{ef}$ ), a EN 15512:2009 limita a capacidade última da coluna conectada à base ( $V_{sd}$ ) por meio da desigualdade da Equação (12), a qual avalia a resistência aos esforços axiais.

$$d_{ef} = e \sqrt{\frac{f_y}{3F_c}} \quad (10)$$

$$F_c = 2,5 \frac{f_{ck}}{\gamma_m} \quad (11)$$

$$V_{sd} \leq f_y A_{ef} \quad (12)$$

Além disso, a EN 15512:2009 permite desconsiderar a deformabilidade do piso caso: (i) a rotação da placa de base apoiada ao piso não exceder 0,5 mrad., e (ii) as imperfeições geométricas globais verticais do pórtico na direção do corredor, causadas pela deformação do piso, não excederem 1/2000 da altura total do porta-paleta, ou do comprimento total do pórtico momento resistente. Bernuzzi *et al.* (2017) apontam que, devido à sua utilidade limitada para os projetistas, não raras as vezes, as especificações europeias podem dar brechas a dimensionamentos contra-segurança das ligações de base de colunas de porta-paletes seletivos.

Portanto, de forma semelhante à norma brasileira, as especificações analíticas da EN 15512:2009 apenas avaliam a placa de base sob forças axiais concêntricas à coluna porta-paleta. Nesse sentido, a norma europeia declara que os efeitos de transmissão de momentos fletores e, consequente, a definição da rigidez rotacional da ligação de base é obtida apenas de forma experimental. Para tanto, a EN 15512:2009 aborda especificações para um programa experimental voltado às ligações de base, o qual se insere nas diretrizes da metodologia *Design by testing*, a qual será detalhada no tópico 3.2.1.

As recomendações da ‘*Fédération Européenne de la Manutention*’ (FEM) 10.2.02:2001 são similares às descritas na ABNT NBR 15524-2:2007, sendo que o documento europeu define a tensão do material ( $F_c$ ), para o caso de piso de concreto, pela Equação (13). Por fim, a FEM 10.2.02:2001 reforça a importância de programas experimentais para a definição de parâmetros

de projeto das ligações de base de porta-paletes seletivos. Faz-se relevante mencionar que a EN 15512:2009 tem por intuito substituir as recomendações documentadas na FEM 10.2.02:2001, por isso será dado o devido enfoque às especificações da EN 15512:2009.

$$F_c = 0,67 f_{ck} \quad (13)$$

A norma americana ANSI/RMI MH16.1 recentemente atualizou seu escopo de especificações referentes às ligações de base de racks. Em sua versão anterior (ANSI/RMI MH16.1:2012), a norma apresentava poucas provisões para o projeto de ligações de base e, apesar de indicar o uso de dados experimentais para determinação de parâmetros de projeto, não continha orientações para ensaios.

Nesse contexto, as atualizações das especificações normativas americanas trouxeram mudanças significativas ao cenário das estruturas de armazenamento porta-paletes. Em um recorte apenas no que diz respeito às ligações de base, a ANSI/RMI MH16-1:2021 traz como nova proposta para definição dos parâmetros de projeto uma abordagem similar ao *Design by testing*, proposto pela EN 15512:2009. Para tanto, a norma americana especifica o próprio modelo de ensaio na versão atualizada do documento, a qual será devidamente detalhada no item 3.2.1.

A ANSI/RMI MH16-1:2021 também atualizou suas especificações referentes à definição das tensões máximas permitidas no contato entre a placa de base e piso de concreto ( $F'_p$ ), sendo esta relação definida pela Equação (14), a qual indica diferentes procedimentos a depender do método de dimensionamento adotado pelo projetista. Nesse sentido, ' $P_p$ ' é a capacidade nominal de momento fletor, ' $A_{brg}$ ' é a área efetiva da placa de base, ' $f'_c$ ' é a resistência à compressão de 28 dias do concreto utilizado para o piso e ' $\Omega_c$ ' e ' $\phi_c$ ' são os diferentes coeficientes de segurança definidos pela norma para cada método de dimensionamento.

$$F'_p \begin{cases} \text{Método das tensões admissíveis (ASD)} \Rightarrow \frac{P_p}{\Omega_c} = \frac{1,7 f'_c A_{brg}}{2,31} \\ \text{Método dos estados limites (LRFD)} \Rightarrow \phi_c P_p = 0,651,7 f'_c A_{brg} \end{cases} \quad (14)$$

A ANSI/RMI MH16-1:2021 define ' $A_{brg}$ ' como a área mínima que garante a distribuição dos esforços de flexo-compressão, a qual deve ser determinada respeitando os limites do material do piso em que o rack é instalado. Diferentemente da ABNT NBR 15524-2:2007 e EN 15512:2009, a norma americana especifica que ' $A_{brg}$ ' deve ser determinada pelos resultados experimentais ou análises numéricas avançadas (análise racional), indicando a

possibilidade de se adotar (i) a região delimitada pelo perímetro da seção da coluna, (ii) a área total da placa de base, ou (iii) alguma área entre as opções (i) e (ii).

Por fim, a ANSI/RMI MH16-1:2021 determina um limite de rotações em serviço ( $\theta_b$ ) da ligação de base, apresentado na Equação (15). Para tanto, ‘ $C_d$ ’ é o fator de amplificação das deflexões, adotado como 5,5 para análises do pórtico na direção do corredor, e 3,5 para direção perpendicular ao corredor, ‘ $\alpha_s$ ’ é o fator de amplificação de cargas gravitacionais em função dos efeitos de segunda ordem, o qual a norma apenas indica que deve ser determinado por “análises devidamente fundamentadas”. Em sequência, ‘ $M_b$ ’ é o momento fletor de projeto, obtido utilizando o Método dos Estados limites (LRFD) e ‘ $k_d$ ’ é a rigidez à rotação obtida experimentalmente. Porém, caso a combinação de esforços tenha sido feita através das combinações por Tensão admissível (ASD), o momento resultante na base deve ser majorado em 1,43.

$$\theta_b = \frac{C_d(1 + \alpha_s)M_b}{k_d} \leq \theta_{máx} \quad (15)$$

Dando continuidade às especificações de documentos oficiais, a norma australiana destinada aos porta-paletes seletivos, AS 4084:2012, apesar de também recomendar que os parâmetros de projeto de ligação de base sejam obtidos experimentalmente, apresenta algumas especificações teóricas para o arranjo estrutural da base do rack.

Nesse sentido, a AS 4084:2012 especifica que a rigidez da ligação de base ( $k$ ), pode ser determinada pela Equação (16), na qual ‘ $h$ ’ é o valor de altura entre o piso e o primeiro nível de longarinas, sendo um valor mínimo de 1 m, e ‘ $E$ ’ e ‘ $I$ ’ são o módulo de elasticidade do aço e inércia da seção rack na direção do corredor, respectivamente. A proposta analítica de rigidez da base especificada pela AS 4084:2012 foi desenvolvida por Godley (2007), já mencionada anteriormente.

$$k = \frac{EI}{h} \quad (16)$$

A AS 4084:2012 indica que a consideração de rigidezes maiores que as obtidas pela Equação (16), podem ser adotadas em projeto mediante validação de um programa experimental do arranjo estrutural de base. Por fim, a norma australiana também permite a simplificação de consideração da ligação de base como rotulada para análises estruturais que não preveem ações sísmicas, alertando para possíveis resultados conservadores caso esta estratégia de dimensionamento seja adotada.

Para a definição da geometria efetiva da placa de base, a norma australiana, recomenda a mesma expressão apresentada pela ABNT NBR 15524-2:2007, dada pela Equação (9), sendo que a resistência de projeto para pisos de concreto deve ser obtida pela Equação (17), na qual ‘ $\emptyset$ ’ é o coeficiente de segurança, definido em 0,6, e ‘ $f_{ck}$ ’ é a resistência à compressão do concreto em 28 dias. A AS 4084:2012 indica que, aos casos em que não são possíveis delimitar uma área efetiva do arranjo estrutural da base, a geometria e espessura mínima da placa de base devem ser obtidas de forma experimental. Para a verificação do dimensionamento da ligação de base, a AS 4084:2012 recomenda a Equação (12), semelhante à EN 15512:2009.

$$F_c = 0,85\emptyset f_{ck} \quad (17)$$

Observa-se que, de forma similar, os documentos normativos recomendam fortemente a incorporação do comportamento semirrígido da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos, utilizando como referência resultados experimentais do comportamento mecânico do componente. Em concordância com o exposto, Godley *et al.* (1998) declaram que a fiel caracterização da rigidez da ligação de base de porta-paletes seletivos somente é obtida por um programa experimental. Nesse cenário os autores afirmam que o ensaio deve considerar a atuação simultânea de momentos fletores e forças axiais, condição de carregamento que simula a ligação de base em serviço, princípio também especificado pelo *Design by testing*.

Nesse cenário, os subitens em sequência procuram detalhar os procedimentos experimentais propostos pelas principais recomendações normativas (AS 4084:2012, EN 15512:2009, e ANSI/RMI MH16-1:2021), bem como os métodos alternativos de ensaio propostos pela literatura para a avaliação do comportamento mecânico da ligação de base de porta-paletes seletivos.

### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA LIGAÇÃO DE BASE

Conforme elucidado nos itens anteriores, a definição do comportamento semirrígido da ligação de base de colunas porta-paletes seletivos, assim como sua influência na estabilidade global do pórtico na direção do corredor, possuem tal complexidade que recaem em um cenário no qual as teorias adequadas ainda não estão disponíveis para resolver e representar com segurança os problemas do sistema estrutural. Portanto, o método experimental não apenas visa desvendar o comportamento mecânico das ligações que ancoram o porta-paleta ao piso, mas

também permitir que se compreendam as limitações e simplificações aplicáveis para futuros modelos mecânico.

Observando o contexto atual de estruturas porta-paletes seletivos, torna-se evidente os maiores esforços em investigar os fatores responsáveis pela estabilidade na direção do corredor. Sendo assim, inseridos no cenário de estudos sobre a estabilidade do sistema momento resistente, o histórico de campanhas experimentais das ligações de base de colunas rack conclui a relevância direta desse componente na estabilidade do porta-paleta frente às cargas laterais.

Nesse sentido, a grande variabilidade dos modelos de ligação e as poucas especificações acessíveis para projetos de porta-paleta tornam as pesquisas sobre o comportamento mecânico das ligações de base ainda com carácter bastante investigativo. Esse cenário frequentemente se reflete em desafios ao realizar análises experimentais e numéricas, devido aos custos econômicos e computacionais associados, respectivamente.

A definição de parâmetros de cálculo e projeto oriundos de ensaios experimentais é denominado pela EN 15512:2009 como *Design by testing*, abordagem já relatada anteriormente. Sendo assim, o método *Design by testing* viabiliza a utilização de dados experimentais em análises estruturais e especificações de projeto. Para tanto, o ensaio de um componente específico do sistema porta-paleta pode ser feito mediante a circunstância de que sejam simuladas as condições construtivas e de contorno previstas para o componente *in loco*.

Sendo assim, os ensaios de ligações de base devem contemplar não apenas a aplicação de uma faixa de forças axiais representativas, mas também considerar esforços de momento fletor na ligação, os quais simulam os efeitos de segunda ordem do pórtico na direção do corredor. Godley *et al.* (1998) reforçam a importância do planejamento de ensaio perante a escolha das cargas axiais de compressão da coluna, visto que, dentre as escassas recomendações da época para ligações de base de racks, já havia um consenso de que o comportamento mecânico da ligação semirrígida depende diretamente do nível de força axial da coluna. Portanto, as cargas axiais de compressão do ensaio devem ser definidas a partir da carga solicitante característica do porta-paleta seletivo que o arranjo estrutural de base compõe.

As tensões adicionais na estrutura, decorrentes das deslocabilidade do arranjo estrutural de base aos momentos fletores, são devidamente mensuradas a partir da obtenção da curva momento-rotação ( $M-\theta$ ) da ligação. Assim sendo, é de grande importância a documentação por parte das análises experimentais da resposta da ligação frente aos esforços fletores, tanto no

âmbito das deformações, quanto na magnitude das forças do sistema. Desta maneira há a correta determinação da rigidez rotacional de projeto, que é parâmetro essencial para incorporação da resposta estrutural da ligação de base na estabilidade e capacidade última da estrutura porta-paletes seletivo.

Ademais, a partir das investigações experimentais, também é possível elucidar importantes comportamentos mecânicos da ligação, e.g. estabilidade do arranjo e comportamento não linear físico-geométrico da curva M-θ experimental, os quais se apresentam como orientações relevantes aos estudos sobre o comportamento mecânico de porta-paletes seletivos.

Por fim, Branquinho (2021) alerta para a complexidade dos modelos de ensaios propostos para avaliação da ligação de base de colunas racks. Isso se deve principalmente (i) à recorrente presença de comportamentos indesejados em ensaio, (ii) à complexidade na montagem do aparato experimental de reação necessário e (iii) à necessidade de realizar um estudo experimental abrangente que contemple uma faixa adequada de valores de força axial de compressão na coluna. Essas dificuldades somam-se à grande variedade de modelos de colunas e ligações de base, as quais são características de cada fabricante e, por isso, exigem ensaios específicos para cada modelo (Sarawit; Pekoz, 2002).

Portanto, os itens seguintes do presente trabalho apresentam as especificações normativas de ensaio e o histórico de análises experimentais voltados às ligações de base de colunas porta-paletes.

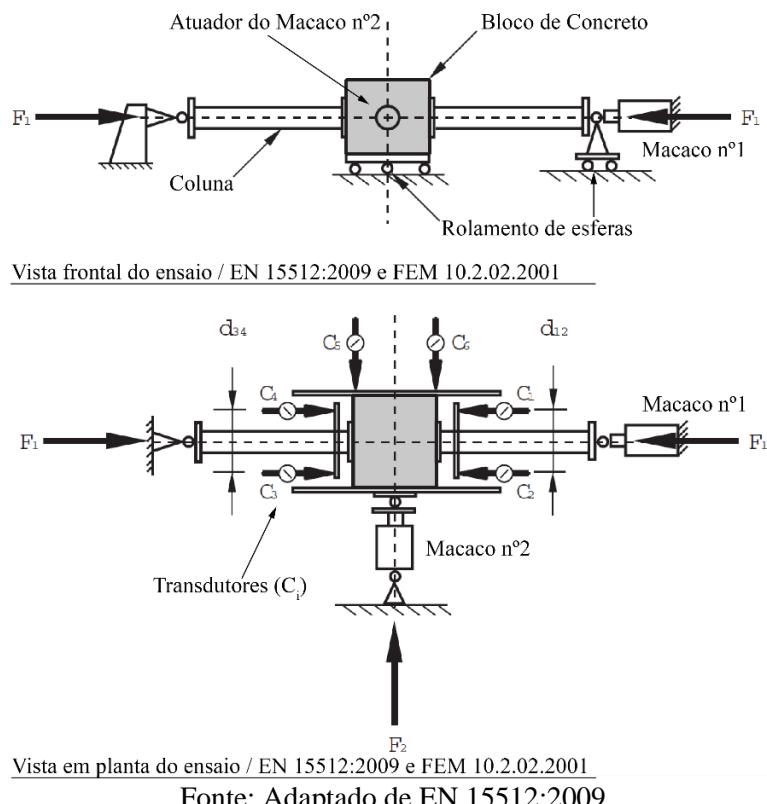
### 3.2.1 Especificações normativas de programas experimentais

Inserido no contexto da metodologia *Design by testing* para ligações de base de porta-paletes seletivos, a norma europeia EN 15512:2009 especifica o modelo de ensaio simétrico ilustrado na Figura 3-10, o qual também é proposto pela FEM 10.2.02:2001. Apesar do modelo da Figura 3-10, ambos os documentos permitem a proposição de formas alternativas de ensaio, desde que sejam seguidos os princípios da metodologia *Design by testing*.

Nesse âmbito, conforme ilustrado na Figura 3-10, as colunas rack são conectadas à ligação de base e o arranjo estrutural simétrico é ancorado ao bloco de concreto. Conforme princípios do *Design by testing*, *F1* e *F2* fazem o papel de simular os esforços atuantes na

ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos, i.e., a ligação deve ser submetida à flexo-compressão. Além disso, a amostra de bloco de concreto deve apresentar a mesma rigidez desempenhada pelo material do piso em que o porta-paleta será instalado.

Figura 3-10 – Ensaio experimental da ligação de base proposto pela EN 15512:2009 e FEM 10.2.02:2001



Fonte: Adaptado de EN 15512:2009

Neste cenário, uma vez que as deformações no piso abaixo da placa de base constituem uma parcela significativa da rotação da ligação (Figura 3-4 (a)), Branquinho (2021) destaca possíveis dificuldades em definir um bloco de fundação representativo para o experimento. Caso não sejam fornecidos dados sobre a resistência do piso destinado a receber o porta-paleta, a EN 15512:2009 indica a utilização do material de classe de resistência 20/25 MPa, já a FEM 10.2.02:2011 indica o uso da classe 16/20 MPa, para a mesma situação.

Ainda em relação ao bloco de concreto, é consenso entre os documentos europeus que o mesmo deve apresentar faces paralelas e permitir uma folga mínima de 50 mm ao redor de toda placa de base. Tais restrições são necessárias para que o ensaio simule corretamente o confinamento do material ao redor da placa, o qual possui efeito estabilizador na ligação, conforme as conclusões do estudo de Sarawit e Pekoz (2002).

No programa experimental de Godley *et al.* (1998), os autores optaram por ensaiar blocos de dimensões 400x400x400 mm de concreto e também blocos de madeira. Outros

autores, como Baldassino e Zandonini (2011) e Firouzianhaij *et al.* (2022), também adotaram as mesmas dimensões, porém ensaiando apenas blocos de concreto. As características geométricas e de resistência do bloco de fundação adotados nos estudos experimentais são raramente detalhadas pelas publicações existentes, fazendo com que as especificações normativas sejam uma das fontes principais para definição destes parâmetros.

Nesse cenário, o estudo de Godley *et al.* (1998) optou pela utilização de blocos de madeira, com o objetivo de realizar uma análise comparativa com os ensaios utilizando blocos de concreto. Os módulos de elasticidade dos materiais empregados são de 182,36 N/mm<sup>2</sup> para madeira, e 21468,8 N/mm<sup>2</sup> para o concreto, não sendo disponibilizado pelos autores detalhes quanto a obtenção das propriedades. Isto posto, os autores observaram diferenças significativas nas curvas M-θ obtidas para cada modelo de bloco de fundação, enfatizando assim a relevância das deformações do piso no comportamento da ligação, fenômeno ilustrado na Figura 3-4 (a). Portanto, em concordância com o estudo de Godley *et al.* (1998), a EN 15512:2009 reforça a importância de o ensaio ser realizado com o bloco moldado a partir do material previsto para o piso na prática.

Ao definir corretamente as amostras de ensaio, a EN 15512:2009 destaca que, antes de iniciar efetivamente o experimento, é necessário realizar o processo de “escorvamento”. Essa etapa pré-ensaio é essencial para avaliar o posicionamento dos equipamentos de medição, remover as folgas da ligação e também avaliar a disposição do Macaco nº2 em relação ao centro do bloco de concreto. Para este fim, o escorvamento é realizado aplicando uma determinada força  $F1$ , compressão através do Macaco nº1, como indicado na Figura 3-10. De acordo com as recomendações do FEM 10.2.02:2011, essa força deve corresponder a 20% da magnitude da força axial máxima prevista para o programa experimental.

Feito o processo de acomodação da estrutura e validação dos aparelhos experimentais, a norma europeia estabelece que a primeira etapa do ensaio seja realizada exclusivamente com a aplicação de forças pelo Macaco nº1 ( $F1$ ). Essa etapa tem como objetivo simular os esforços axiais de compressão transmitidos do rack para a fundação. Nesse sentido, a atuação de  $F1$  em ensaio deve ocorrer no centro geométrico da seção rack e pode ser aplicada de forma contínua ou por incrementos, até alcançar um valor pré-determinado de compressão característico da estrutura porta-paleta.

Atingido o valor de  $F1$  e garantido a eventual estabilização do arranjo estrutural de base, a força de compressão deve permanecer constante durante toda continuidade do ensaio. Essa

exigência, destacada por Godley *et al.* (1998), é de extrema importância no planejamento do aparato experimental e tem relevância direta na validação dos resultados de ensaio. Gilbert e Rasmussen (2011) explicam que, devido ao caráter de atuação de  $F1$  na amostra e à exigência da manutenção da força de compressão constante durante todo ensaio, pode-se assumir que o atuador do Macaco nº1 seja controlado por taxa de incremento de força.

Para esta primeira etapa do ensaio, a EN 15512:2009 especifica o agrupamento de amostras conforme a magnitude de forças axiais ( $F1$ ) atuantes em ensaio. Para tanto, a FEM 10.2.02:2011 indica a faixa de forças de 25, 50, 75, e 100% do esforço de compressão solicitante de cálculo da coluna porta-paleta. Nesse âmbito, Baldassino e Zandonini (2011) afirmam que é crucial estabelecer um número representativo de forças  $F1$  para o ensaio. Segundo os autores, esse número deve ser determinado de maneira a abranger a alta sensibilidade da rigidez rotacional da ligação de base em relação aos esforços de compressão, uma vez que desempenham um papel estabilizador no arranjo estrutural.

Em sequência, a segunda etapa do experimento proposto pela EN 15512:2009 ocorre com a aplicação de força pelo Macaco nº2 ( $F2$ ). O carregamento  $F2$ , aliado ao braço de alavanca feito pela coluna, tem por intuito simular o momento fletor na ligação de base. Por isso, alguns cuidados devem ser tomados mediante a forma de controle de atuação do Macaco nº2, bem como cuidados no contexto de estabilização do arranjo estrutural perante os esforços fletores na amostra.

Roure *et al.* (2016) salientam a importância de se determinar experimentalmente o máximo momento resistente da ligação. Nesse sentido, os autores explicam que o controle de atuação do Macaco nº2 por meio da taxa de carregamento impossibilita a determinação do *peak load* da força  $F2$  e, por conseguinte, inviabiliza o traçado do ramo descendente da curva experimental M-θ. Portanto, a fim de obter uma melhor leitura e interpretação dos resultados experimentais, Firouzianhaij *et al.* (2022), Gilbert e Rasmussen (2011), Roure *et al.* (2016), dentre outros trabalhos da literatura recomendam que o Macaco nº2 seja manuseado a partir de um controle por taxa de deslocamento do pistão atuador. Os esforços empregados na escolha do equipamento do Macaco nº2 se mostram cruciais para a análise dos resultados experimentais e estudo do comportamento mecânico do arranjo estrutural de base.

Por fim, o critério de parada do ensaio estabelecido pela EN 15512:2009 determina a continuidade do experimento até que (i) a força  $F2$  atinja seu valor máximo ou (ii) que a rotação da ligação de base apresente magnitude que inviabiliza o seu uso em estruturas porta-paletes.

Nesse âmbito, a partir dos seus respectivos programas experimentais, Gilbert e Rasmussen (2011) e Baldassino e Zandonini (2011) indicam algumas inconsistências no critério de parada de ensaio da EN 15512:2009. De forma similar, os autores compreenderam que, eventualmente, a ligação de base não tem sua capacidade resistente definida pelo *peak load* de  $F_2$ .

Gilbert e Rasmussen (2011) afirmam que o colapso do arranjo estrutural de base de porta-paletes e, consequentemente, a definição do momento fletor resistente máximo envolvem fenômenos atrelados às rotações características das ligações de base, as quais são ilustradas na Figura 3-4. Portanto, Firouzianhajj *et al.* (2022), em concordância com as conclusões de Gilbert e Rasmussen (2011), afirmam que os critérios de parada de ensaio devem contemplar os diferentes fenômenos envolvidos no colapso do arranjo estrutural de base, i.e., (i) efeitos desestabilizantes de segunda ordem global, (ii) instabilidades locais, distorcionais e/ou de flexo-torção na coluna, e (iii) rotações acima dos limites de serviço. Nesse cenário, comprehende-se a necessidade da correta documentação do *peak load* referente à  $F_2$ , e do traçado da curva descendente experimental M-θ. Esses são fatores que exercem influência direta na definição dos aparelhos experimentais e no planejamento do ensaio.

À vista do exposto, nota-se que é de extrema importância ao planejamento do programa experimental o conhecimento prévio dos fenômenos estruturais envolvidos na falha das ligações de base de colunas porta-paletes, recomendação que corrobora com as boas práticas e precauções do guia para análises experimentais de Gilbert *et al.* (2022).

Nesse âmbito, diante das poucas recomendações encontradas na literatura e devido as inconsistências nas especificações da EN 15512:2009, um ponto crítico ao planejamento de ensaio é a correta disposição dos transdutores ilustrados na Figura 3-10, os quais devem ser dispostos conforme previsões de falha do arranjo estrutural ensaiado. Conforme alertado por Gilbert *et al.* (2022), experimentos que não se atentam ao correto planejamento diante dos possíveis comportamentos mecânicos das amostras, não raras as vezes, levam ao descarte dos dados experimentais do arranjo ensaiado, ou até mesmo apresentam resultados incoerentes ao estudo.

Diante do exposto, no âmbito dos comportamentos mecânicos observados ao longo do experimento, a EN 15512:2009 faz um importante adendo sobre a estabilização da amostra perante a força  $F_2$ . A norma europeia exige que o bloco de fundação deve estar “livre para mover no plano horizontal, mas restrito de rotacionar no em torno do seu eixo vertical”, por isso, prescreve que o bloco deve ser apoiado em rolamentos ou em superfície bem lubrificadas,

conforme ilustrado na Figura 3-10. Tais recomendações da EN 15512:2009, procuram garantir que o arranjo estrutural ensaiado possa se movimentar livremente no sentido de aplicação da força  $F_2$ , sem que eventuais atritos interfiram no ensaio e/ou que o bloco rotacione no plano dos atuadores.

Baldassino e Zandonini (2011) apontam para o caráter crítico dessa exigência na montagem e execução do ensaio de ligações de base de colunas porta-paletes, visto que rotações indesejadas no bloco e forças de atrito entre a amostra e o piso podem resultar em esforços indesejados ao programa experimental, i.e., esforços parasitas. Os autores alertam que os esforços parasitas amplificam os efeitos de segunda ordem na amostra e, consequentemente, prejudicam os resultados experimentais. Além disso, o extenso estudo experimental de Baldassino e Zandonini (2011) conclui que a estabilidade do arranjo estrutural de base apresenta grande sensibilidade aos efeitos parasitas do ensaio. Logo, nota-se que a devida restrição às rotações indesejadas do bloco e a garantia da superfície livre de atrito aumentam significativamente a complexidade da campanha experimental.

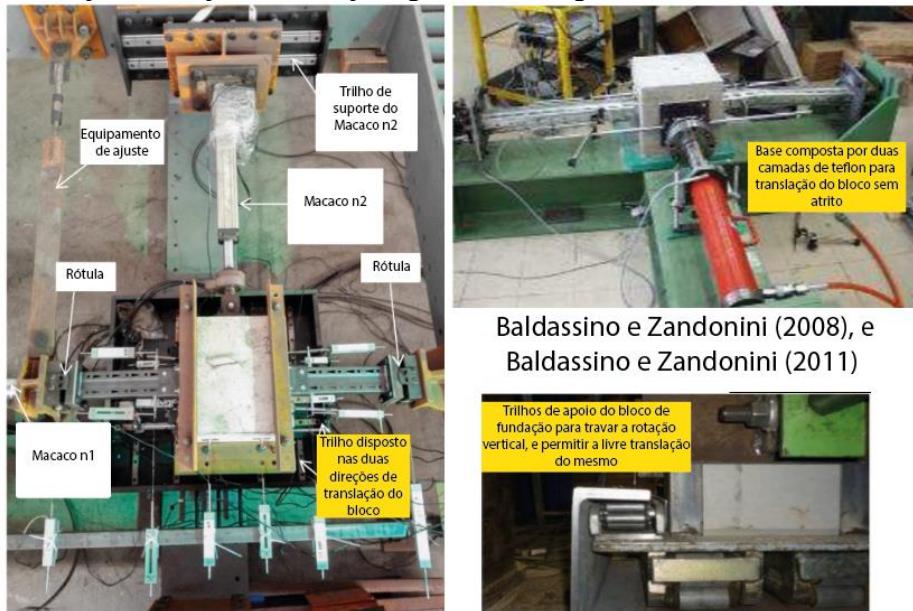
Nesse cenário, Baldassino e Zandonini (2011) e Zhao *et al.* (2019) indicam a utilização dos dados de ' $C_5$ ' e ' $C_6$ ' – transdutores indicados na Figura 3-10 – como uma medida para mensurar a ocorrência, ou não, das rotações do bloco em torno do seu eixo vertical. Isso pois, caso os transdutores afirmam valores diferentes, há, consequentemente, o indicativo do efeito parasita no ensaio. Portanto, os dados de ' $C_5$ ' e ' $C_6$ ' representam um parâmetro para avaliação da qualidade das condições de contorno impostas ao bloco de fundação pelo aparato experimental utilizado.

Gilbert e Rasmussen (2011) afirmam que a exigência de restrição à rotação do bloco, em contraste com o aparato experimental proposto pela EN 15512:2009, é contraditória ao sistema de equilíbrio e aos deslocamentos intrínsecos do modelo de ensaio da Figura 3-10. Nesse sentido, os autores explicam que a simetria do arranjo experimental não garante a simetria no comportamento mecânico das ligações ensaiadas e, por conseguinte, torna-se inevitável a rotação do bloco de fundação em torno do seu eixo vertical.

De fato, os aparatos de ensaio indicados nos estudos experimentais de ligação de base que reproduzem o ensaio da EN 15512:2009, e.g. Zhao *et al.* (2019); Huang *et al.* (2021); Gilbert e Rasmussen (2011); Baldassino e Zandonini (2011); Godley *et al.* (1998); e Baldassino e Zandonini (2008), expõem o notável esforço em garantir as exigências da norma europeia. A

Figura 3-11 ilustra os aparelhos experimentais idealizados para garantir a livre translação do bloco de concreto e impedir as rotações indesejadas do mesmo.

Figura 3-11- Aparatos experimentais para garantir as exigências de ensaio da EN 15512:2009



Baldassino e Zandonini (2008), e  
Baldassino e Zandonini (2011)



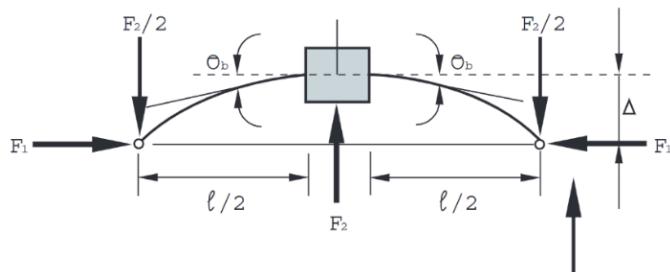
Zhao et al. (2019) e Huang et al. (2021)

Firouzianhaj et al. (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor

Compreende-se que os esforços na reprodução do experimento proposto pela EN 15512:2009 têm por finalidade conceber o sistema de forças e deslocamentos idealizado para o ensaio, o qual é ilustrado na Figura 3-12. Diante do exposto, é evidente que o comportamento idealizado no modelo de ensaio da EN 15512:2009 não é garantido de forma simples, expondo falhas nas especificações normativas de ensaio (Gilbert; Rasmussen, 2011).

Figura 3-12- Forças e deslocamentos do ensaio de ligação de base de colunas porta-palete proposto pela EN 15512:2009



Fonte: EN 15512:2009

Por fim, na etapa de análise dos dados obtidos experimentalmente, a norma europeia prevê o cálculo do momento na ligação de base ( $M_b$ ) e a rotação da mesma ( $\theta_b$ ) pelas Equações (18) e (19), respectivamente. Nas equações as incógnitas ' $\delta_i$ ', sendo ( $i=1,2,3,4$ ), são os deslocamentos aferidos pelos transdutores ' $C_i$ ', sendo ( $i=1,2,3,4$ ), e ' $d_{ij}$ ', sendo ( $i=1,3$  e  $j=2,4$ ), as respectivas distâncias entre transdutores ' $i$ ' e ' $j$ '.

$$M_b = \frac{F_2 l}{4} + F_1 \Delta \quad (18)$$

$$\theta_b = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} + \frac{\delta_3 - \delta_4}{d_{34}} \right] \quad (19)$$

Caso não haja rotações do bloco em torno do seu eixo vertical, ‘ $C_5$ ’ e ‘ $C_6$ ’ possuem valores idênticos e definem a variável que mensura os efeitos globais de segunda ordem ( $\Delta$ ). Todavia, para experimentos em que rotações indesejadas ocorrem, os valores de ‘ $C_5$ ’ e ‘ $C_6$ ’ são, consequentemente, diferentes. Para estes casos, a EN 15512:2009 defini ‘ $\Delta$ ’ como a média aritmética entre os deslocamentos ‘ $C_5$ ’ e ‘ $C_6$ ’. Concluídas as análises experimentais através dos procedimentos padronizados pela norma europeia, a curva M-θ experimental da ligação de base de colunas porta-paletes é então traçada.

Nota-se que, apesar das exigências normativas serem claras quanto a restrição da rotação do bloco de concreto, a mesma permite a média aritmética de ‘ $C_5$ ’ e ‘ $C_6$ ’ para cálculo dos efeitos de segunda ordem em ensaio. Diante disso, compreendido a negligência de efeitos parasitas inevitáveis ao modelo de ensaio da EN 15512:2009, trabalhos da literatura – e.g. Baldassino e Zandonini (2011); Zhao *et al.* (2019) e Gilbert e Rasmussen (2011) – concluem que tais especificações experimentais são inconsistentes e com resultados passíveis de questionamento quanto a sua confiabilidade.

Baldassino e Zandonini (2011), a partir dos resultados do seu programa experimental, alertam que os ensaios de ligações de base de colunas porta-paletes exigem um número de amostras grande, cuidado extra que os autores apontam ser necessário para garantir a confiabilidade do complexo programa experimental. Em vista disso, e de conhecimento das limitações do ensaio, a EN 15512:2009 especifica que, para o caso de ligações de base, serão admitidos os resultados experimentais da análise de um número mínimo de 6 ensaios de um mesmo arranjo estrutural, sendo no mínimo 3 amostras por valor de carga de compressão  $F_1$ , o dobro exigido pela abordagem *Design by testing* para outros componentes do rack, os quais apresentam ensaios menos complexos.

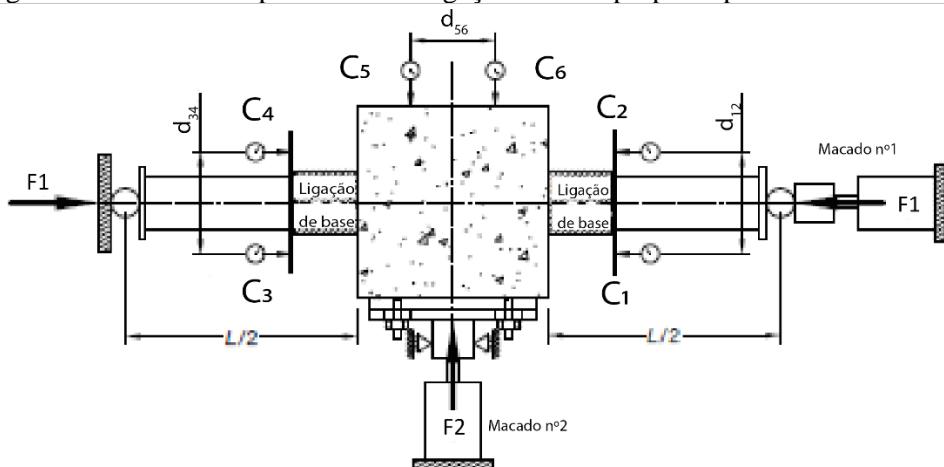
Faz-se relevante mencionar que, as especificações apresentadas pela EN 15512:2009 permitem que os resultados finais da curva M-θ do experimento sejam obtidos por uma média dos resultados das duas amostras simétricas ensaiadas. Todavia, por conta das condições de contorno do ensaio, o comportamento mecânico das amostras não é similar, ocasionando a falha de apenas uma das ligações conectadas ao bloco de fundação. Consequentemente, não raras as

vezes, apenas uma das amostras pode ser utilizada para compor os resultados do programa experimental, fato que prejudica a amostragem e penaliza o estudo, tanto em termos financeiros, quanto em tempo.

Dando sequência às especificações normativas de ensaio, a norma australiana de porta-paletes seletivos, AS 4084:2012, além das especificações teóricas já mencionadas, também propõe um programa experimental para definição da rigidez de projeto de ligações de base de colunas porta-paletes. Nesse cenário, em concordância com a norma europeia, a AS 4084:2012 também exige um número mínimo de 6 ensaios por arranjo estrutural de base.

Diante das complexidades observadas pela proposta experimental da EN 15512:2009, a AS 4084:2012 adotou um método de ensaio alternativo proposto por Gilbert e Rasmussen (2009), o qual será devidamente detalhado no item destinado aos métodos experimentais alternativos da literatura. Sendo assim, a Figura 3-13 ilustra o modelo de ensaio da AS 4084:2012.

Figura 3-13 - Ensaio experimental da ligação de base proposto pela AS 4084:2012



Fonte: Adaptado AS 4084:2012

A AS 4084:2012 indica um comprimento de coluna ( $L$ ) mínimo de 4 vezes a largura da alma da seção transversal da coluna porta-paleta, especificação similar à EN 15512:2009. No caso de desconhecimento dos parâmetros do material do bloco de fundação do porta-palete *in loco*, a norma australiana prevê o uso de concreto com faixa de resistência de 20/25 MPa, fazendo um adendo sobre a importância de se escolher uma amostra representativa da condição do piso que recebe o porta-paleta.

De maneira geral, as especificações de ensaio da AS 4084:2012 seguem os mesmos princípios definidos pela norma europeia. Nesse sentido, a força  $F1$  simula a compressão das colunas conectadas à base e a força  $F2$  é responsável por produzir momento fletor no arranjo

estrutural. A AS 4084:2012 define um processo de escorvamento com a aplicação de 5% da carga prevista para  $F_1$ , a qual é definida pela norma como a máxima carga axial prevista em projeto para as colunas da estrutura porta-paleta seletivo.

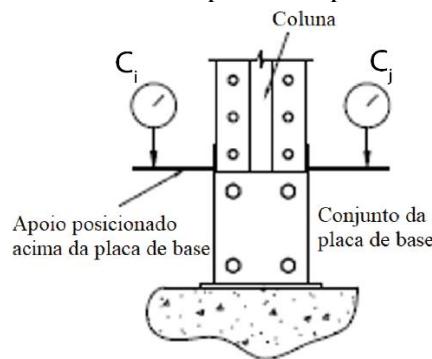
O principal aspecto que diferencia a proposta australiana do ensaio da norma europeia é o aparato experimental previsto para aplicação da força  $F_2$ . Haja vista a complexidade em se restringir as rotações em torno do eixo vertical do bloco de fundação, a AS 4084:2012 especifica o apoio do bloco sob equipamentos de rolamento ou base lubrificada e também à ancoragem de uma placa que conecta o Macaco nº2 ao bloco. A placa rígida adicionada ao aparato experimental tem por finalidade garantir a aplicação centrada da força  $F_2$  na amostra e restringir as rotações indesejadas no experimento. Para tanto, a norma especifica que a placa seja ancorada no bloco por parafusos, os quais precisam ser previstos com folgas para que não transmitam esforços cisalhantes ao experimento. Por fim, a AS 4084:2012 também define que o Macaco nº2 precisa estar restrito às translações verticais e horizontais.

A norma AS 4084:2012 faz o adendo sobre o critério de parada do ensaio, corrigindo as inconsistências da EN 15512:2009. Nesse sentido, a norma australiana traz especificações que indicam que a continuação do experimento deve ocorrer até a falha de um dos arranjos estruturais de base - coluna ou ligação de base - ou até a ligação apresentar uma rotação que inviabilize o seu uso na estrutura porta-paleta.

Também na norma australiana, há a recomendação de que o controle do Macaco nº2 deve ser realizado por meio de taxa de deslocamento. Essa especificação é justificada pela AS 4084:2012, devido ao critério de parada do ensaio por colapso do arranjo estrutural. Em suas notas, o documento australiano alerta para o fato de que os transdutores, indicados na Figura 3-13, precisam ser posicionados levando em conta os possíveis comportamentos mecânicos previstos para a amostra de ligação de base.

No que diz respeito ao detalhamento da posição dos equipamentos de medição, a AS 4084:2012 especifica, por meio da Figura 3-14, o posicionamento dos transdutores ' $C_1$ ', ' $C_2$ ', ' $C_3$ ' e ' $C_4$ '. Tal diretriz normativa é fundamentada conforme as rotações características da ligação de base, elucidadas por Gilbert e Rasmussen (2009) e ilustradas na Figura 3-4. À vista disso, os transdutores devem estar localizados logo acima do limite entre a ligação de base e a coluna, sendo devidamente fixados na coluna.

Figura 3-14 - Posição dos transdutores responsáveis por medir a rotação da ligação de base

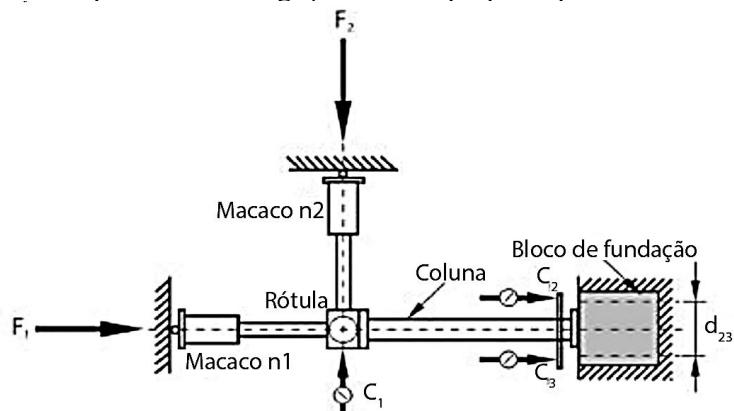


Fonte: Adaptado de AS 4084:2012

Por fim, a partir da curva M- $\theta$  experimental da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos é possível definir a rigidez característica de projeto deste componente. Maiores detalhes sobre a proposta experimental da AS 4084:2012 serão abordadas no tópico 3.2.2, na descrição do estudo experimental de Gilbert e Rasmussen (2009), o qual serviu de base para as especificações da norma australiana.

Como mencionado anteriormente, as atualizações da norma norte americana ANSI/RMI MH16-1:2021 trazem como novidade especificações de ensaio para ligações de base de colunas porta-paletes seletivo, a qual tem o aparato de ensaio ilustrado na Figura 3-15. Nesse sentido, o documento americano adota a proposta experimental desenvolvida por Roure *et al.* (2013), a qual tem o intuito de ser uma alternativa ao ensaio da EN 15512:2009.

Figura 3-15 - Ensaio experimental da ligação de base proposto pela ANSI/RMI MH16-1:2021



Fonte: Adaptado de ANSI/RMI MH16-1:2021

As especificações de geometria e parâmetros dos componentes do arranjo experimental, e.g. comprimento da coluna, são similares às especificações dadas pela metodologia *Design by testing* da EN 15512:2009. Todavia, diferentemente da norma europeia, a ANSI/RMI MH16-1:2021 determina que as dimensões mínimas do bloco de fundação e a distância entre face do bloco e borda da placa de base sejam de 30,5 cm, e 16,5 cm, respectivamente. Por fim, a norma

americana também indica que, para o caso de desconhecimento do material do piso de concreto, uma resistência mínima de 26,6 MPa deve ser adotada para a amostra de ensaio.

A ANSI/RMI MH16-1:2021 afirma que os equipamentos de medição de deslocamentos lineares, indicados na Figura 3-15 como ‘ $C_i$ ’, sendo ( $i=1,2,3$ ), devem ter uma precisão de medição de 0,25 mm. Já para os macacos hidráulicos 1 e 2, a norma americana dita que a precisão dos equipamentos deve ser da ordem de 1% da carga de compressão  $F1$  prevista para o ensaio. Nesse cenário, a ANSI/RMI MH16-1:2021 determina que a faixa de forças  $F1$  deve ser pré-estabelecida de forma representativa à estrutura porta-paleta, indicando que a maior compressão  $F1$  de ensaio deve corresponder às maiores cargas prevista para as colunas da estrutura.

De acordo com a norma americana a menor força de compressão  $F1$  ( $P_{min}$ ) a ser utilizada na campanha experimental é determinada pela Equação (20), na qual ‘ $Q$ ’, expresso pela Equação (21), é o parâmetro de instabilidade local da coluna rack, o qual é obtido experimentalmente pelo ensaio de colunas curtas, também especificado na ANSI/RMI MH16-1:2021. Já ‘ $A_{netg}$ ’, descrita pela Equação (22), é a área efetiva da seção e ‘ $f_y$ ’ é a tensão de escoamento do aço.

$$P_{min} = (0,5f_yA_{netg}Q)0,1 \quad (20)$$

$$Q = \frac{N_{cc}}{f_y A_n} \quad (21)$$

$$A_{netg} = \left[ 1 - (1 - Q) \left( \frac{\chi f_y}{f_y} \right)^Q \right] A_n \quad (22)$$

Na Equação (21), ‘ $N_{cc}$ ’ é o valor da força de ruptura observada na amostra do ensaio de coluna curta e ‘ $A_n$ ’ é a área líquida mínima da seção transversal. Além disso, a Equação (22) mostra que a área efetiva é dependente do parâmetro ‘ $Q$ ’ e do nível de tensão ‘ $\chi f_y$ ’, demonstrando a consideração dos fenômenos de instabilidade local e global, respectivamente. Por fim, a ANSI/RMI MH16-1:2021 indica que devem ser ensaiados no mínimo dois valores entre as magnitudes máxima e mínima pré-determinadas para  $F1$ .

Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que, em geral, os fabricantes norte-americanos conectam as colunas porta-paletes às placas de base através de soldas, como ilustrado na Figura 3-1 no estudo de Winter e Pekoz (1973). À vista disso, compreende-se a indicação da

ANSI/RMI MH16-1:2021 em posicionar os transdutores de deslocamentos ‘ $C_2$ ’ e ‘ $C_3$ ’ o mais próximo possível do bloco de fundação.

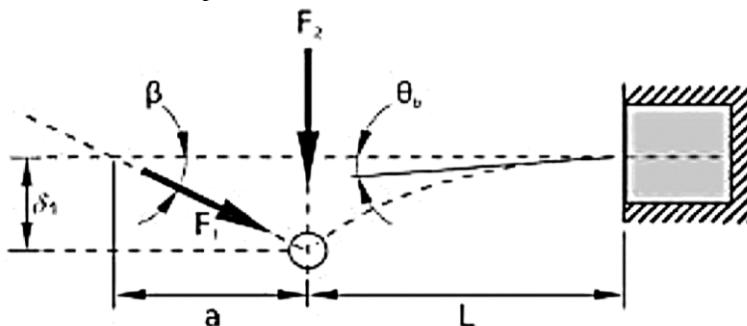
A fim de contornar as dificuldades de restrição da rotação do bloco em torno do seu eixo vertical, ponto crítico da análise experimental da EN 15512:2009, a proposta de ensaio da ANSI/RMI MH16-1:2021 prevê o engastamento do bloco no aparato de reação, conforme indicado na Figura 3-15. Ademais, a norma americana especifica um dispositivo rotulado no topo da coluna, o qual recebe, tanto as forças axiais quanto os carregamentos do Macaco nº2. Consequentemente, as condições de contorno deste dispositivo rotulado requerem que o equipamento esteja livre para transladar nos sentidos de  $F_1$  e  $F_2$ , porém restrito de se deslocar no eixo perpendicular ao plano das forças.

Em sequência, determinado o aparato experimental para o ensaio de ligações de base de porta-paletes seletivos, a norma americana indica a necessidade do processo de escorvamento e acomodação do arranjo estrutural do ensaio, todavia não detalha valores de carregamento para o Macaco nº1 nesta etapa. Por fim, o sistema de forças e deslocamentos idealizados pela ANSI/RMI MH16-1:2021 são ilustrados na Figura 3-16. O momento fletor na ligação de base da coluna rack ( $M_b$ ) e a rotação do arranjo estrutural ( $\theta_b$ ), são dados pelas Equações (23) e (24).

$$M_b = (F_2 + F_1 \sin \beta)L + (F_1 \cos \beta)\delta_1 \quad (23)$$

$$\theta_b = \frac{(d_3 - d_2)}{d_{23}} \quad (24)$$

Figura 3-16 - Forças e deslocamentos do ensaio de ligação de base de colunas porta-palete proposto pela ANSI/RMI MH16-1:2021



Fonte: ANSI/RMI MH16-1:2021

A ANSI/RMI MH16-1:2021 afirma que o procedimento de ensaio pode ocorrer de duas formas, a depender dos objetivos da análise experimental. Independente do processo adotado, o aparato experimental e sistema de forças e deslocamentos, continuam o mesmo. A primeira proposta de procedimento experimental da norma americana é similar às especificações da EN

15512:2009, através da qual obtém-se a curva M-θ da ligação para uma força axial  $F_1$  constante. Nesse caso, na primeira fase do experimento, o Macaco nº1 deve aplicar a força  $F_1$  até o valor pré-estabelecido e garantir que a força perpendicular ao bloco de fundação ( $F_1\cos\beta$ ) se mantenha constante ao longo do ensaio. A partir disto, a segunda etapa do experimento proposto pelo documento norte americano, é realizado através da aplicação da força  $F_2$ , a qual simula o momento na ligação.

A ANSI/RMI MH16-1:2021, para a segunda etapa do ensaio, aponta a necessidade de análise do sentido do carregamento de  $F_2$ , a fim de obter a situação mais desfavorável para o arranjo estrutural ensaiado. Em função disso, o procedimento normativo afirma que logo após a estabilização da estrutura pela aplicação da força  $F_1$ , o transdutor ‘ $C_1$ ’ irá indicar deslocamentos iniciais do topo da coluna. Portanto, de acordo com o sentido indicado por ‘ $C_1$ ’, é definido o sentido de aplicação da força  $F_2$  pelo Macaco nº2, haja vista a soma dos efeitos desestabilizantes.

Ainda no âmbito da primeira proposta de procedimento de ensaio, a norma americana indica que a força  $F_2$  cresça gradualmente ao longo do experimento, com incrementos na dimensão de um décimo da carga máxima prevista para o Macaco nº2. Nota-se que, diferentemente da AS 4084:2012, o controle do Macaco nº2 pela ANSI/RMI MH16-1:2021 é especificado através de incrementos de força.

A segunda proposta de procedimento experimental da ANSI/RMI MH16-1:2021 recorre à obtenção de uma análise experimental que informa os parâmetros de rotação atrelados à razão entre os carregamentos  $F_1$  e  $F_2$ . Nesse sentido, a norma americana afirma que se deve prever a razão entre forças representativa da estrutura porta-paleta avaliada. Sendo assim, a força perpendicular ao bloco de fundação ( $F_1\cos\beta$ ) deve atuar com pequenos incrementos de carregamento ao longo do ensaio, de forma simultânea, também o carregamento previsto para o Macaco nº2 atua através de incrementos de força. A norma indica que para cada passo de carga de  $F_1$  e  $F_2$ , após o sistema estabilizar suas medidas, faz-se necessário os registros das forças e deslocamentos resultantes.

Por fim, a ANSI/RMI MH16-1:2021 especifica as diretrizes da ANSI/AISI S100:2016 para determinar o número mínimo de ensaios. Nesse âmbito, a norma americana destinada a PFF, ANSI/AISI S100:2016, determina que as análises experimentais de componentes estruturais devem ser baseadas nos resultados de no mínimo 3 ensaios de um mesmo arranjo estrutural, i.e., para o caso de campanhas experimentais de ligações de base de colunas rack,

amostras de mesma geometria e sob mesma força axial  $F1$ . Este número mínimo de amostras é definido sob a condição de que os resultados dos mesmos não desviam mais que 15% entre seus respectivos valores.

A ANSI/RMI MH16-1:2021 não dispõem de especificações acerca do critério de parada a ser adotado para o ensaio de ligação de base de colunas porta-paletes. Todavia, Roure *et al.* (2016), apontam a adoção de dois critérios: o alcance da máxima capacidade em esforços fletores do arranjo estrutural ou pela ligação atingir níveis de rotação que tornam inviáveis a estabilidade da estrutura porta-paleta. À vista disso, o autor indica a limitação da continuidade dos ensaios à uma rotação máxima de 0,12 radianos e/ou o decrescimento da força  $F2$ , até que a mesma se anule.

Conforme apontado por Roure *et al.* (2016), nota-se que de fato há uma redução no aparato experimental em comparação com o ensaio proposto pela EN 15512:2009. Todavia, apesar da restrição imposta ao bloco de fundação, o aparato necessário para o carregamento  $F1$  e  $F2$  na extremidade livre da coluna, visando o esquema ilustrado na Figura 3-16, exige equipamentos específicos para o modelo de ensaio proposto, recaindo em limitações para a reprodução da metodologia experimental da norma americana. A Figura 3-17, ilustra a bancada de ensaios com os aparelhos experimentais necessários para reproduzir o modelo experimental especificado na ANSI/RMI MH16-1:2021.

Figura 3-17 – Análise experimental de Roure *et al.* (2016) aplicando o método de ensaio da ANSI/RMI MH16-1:2021



Fonte: Roure *et al.* (2016)

Diante das propostas das normas internacionais para análises experimentais de ligações de base de colunas porta-paletes seletivos, comprehende-se os apontamentos feitos Branquinho (2021), nos quais a autora menciona que, apesar da ligação de base apresentar modelos de ensaios normativos com princípios mecânicos similares, fato que isenta a necessidade de avaliação de diferentes propostas experimentais, os modelos de ensaio disponíveis são complexos e bastante sensíveis à comportamentos mecânicos indesejados.

Nesse sentido, constata-se que reproduzir os programas experimentais propostos pelos documentos normativos não é uma tarefa trivial. Consequentemente, a fim de investigar o comportamento mecânico de ligações de base de porta-paletes, algumas propostas de métodos alternativos de ensaio surgiram em publicações da literatura nas últimas duas décadas. Nesse sentido, inserido no contexto de novas propostas experimentais, o item subsequente detalha os avanços da literatura em contornar as complexidades dos procedimentos experimentais normativos.

### 3.2.2 Métodos alternativos de ensaio

No trabalho de Gilbert e Rasmussen (2009) e na sequência de estudos publicados pelos autores, os mesmos concluem a já mencionada complexidade em se reproduzir com exímio o ensaio proposto pela EN 15512:2009. Por isso, motivados pela falta de detalhes sobre especificações necessárias do procedimento de ensaio e pelas inconsistências entre o sistema estático esperado (Figura 3-12) e o aparato experimental proposto (Figura 3-10), Gilbert e Rasmussen (2009) realizaram um extenso estudo experimental que propõe a avaliação de dois métodos alternativos de ensaio de ligações de base de porta-paletes seletivo. Nesse âmbito, os autores concluem o estudo apontando as vantagens de um método alternativo sob o outro.

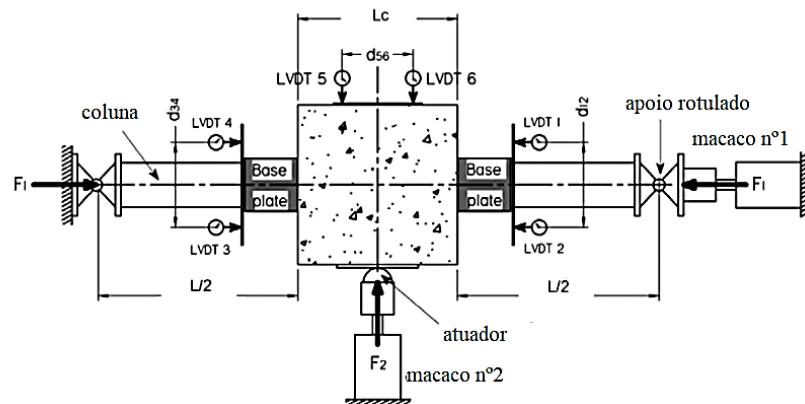
Faz-se relevante mencionar que, como consequência do estudo de Gilbert e Rasmussen (2009), a AS 4084:2012 adotou nas suas especificações a metodologia de ensaio validada pelos autores, a qual é ilustrada na Figura 3-13 e será melhor detalhada no presente item. Ademais, como constatado por Godley *et al.* (1998), faz-se necessário a escolha de um bloco de fundação representativo da estrutura porta-paleta *in loco*, portanto, Gilbert e Rasmussen (2009) se restringiram ao uso de amostras de bloco de concreto, haja visto uso recorrente deste material para pisos de galpão de armazenamento.

O primeiro método alternativo de ensaio proposto por Gilbert e Rasmussen (2009), denominado como Método Alternativo 01 no presente trabalho, é similar ao experimento proposto pela EN 15512:2009, porém concebido com o intuito de (i) trazer maiores detalhes sobre aspectos do aparato experimental necessário e (ii) corrigir as inconsistências entre o comportamento mecânico do arranjo estrutural e a análise dos resultados. Desta forma, as etapas de ensaio do Método Alternativo 01 de Gilbert e Rasmussen (2009) são idênticas às etapas descritas no tópico 3.2.1 para o experimento da norma europeia, i.e., força  $F1$  de compressão constante em todo o ensaio e incrementos de  $F2$  até atingir o respectivo *peak load* da força.

Portanto, o presente item dará o enfoque nas melhorias e detalhamentos propostos por Gilbert e Rasmussen (2009), uma vez que o procedimento de ensaio já foi descrito.

Assim sendo, conforme ilustrado na Figura 3-18, o Método Alternativo 01 prevê a atuação da força  $F_2$  advinda de um pistão em formato de meia esfera, que atua como rótula nas condições de contorno do bloco de concreto, i.e., restringe apenas translações na direção e sentido de atuação do Macaco nº2. A escolha do atuador em formato esférico também é fundamentado pela necessidade de impedir o atrito entre o Macaco nº2 e o bloco. Sendo assim, o aparecimento de esforços cisalhantes entre a amostra e o equipamento é evitado, os quais ampliam as rotações indesejadas em torno do eixo vertical do bloco. Para tanto, Gilbert e Rasmussen (2009) conectaram uma placa rígida com a superfície engraxada na região entre o bloco de concreto e Macaco nº2.

Figura 3-18 – Vista em planta do aparato experimental – Método Alternativo 01

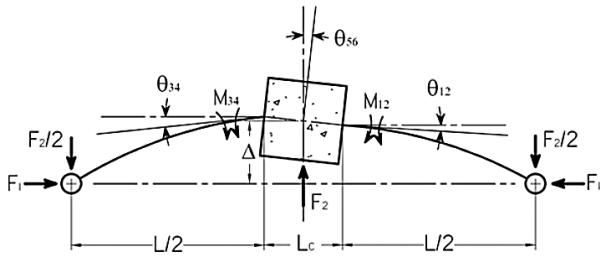


Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

Nota-se que, de forma similar à proposta da EN 15512:2009, no Método Alternativo 01, o bloco de concreto fica livre para rotacionar em torno do seu eixo vertical. Nesse cenário, para contornar as inconsistências entre o ensaio da norma europeia e a análise dos resultados de momento e rotação da ligação de base, Gilbert e Rasmussen (2009) propõem a inclusão dos transdutores 5 e 6 (Figura 3-18) na análise das rotações resultantes. Com isso, incorporam-se os efeitos dos deslocamentos parasitas nos resultados experimentais.

Assim sendo, as formulações para obtenção da relação  $M-\theta$  experimental do Método Alternativo 01 são dadas na sequência das Equações (25) à (29), as quais derivam do sistema de forças e deslocamentos ilustrados na Figura 3-19. As variáveis ' $\delta_i$ ' representam a leitura dos deslocamentos lineares dos transdutores  $i$ , sendo ( $i = 1,2,3,4,5,6$ ), ilustrados na Figura 3-18, já ' $\theta_{b,ij}$ ' são as rotações relativas das ligações de base  $ij$ , simétricas, sendo ( $i = 1,3,5$  e  $j = 2,4,6$ ).

Figura 3-19 – Forças e deslocamentos – Método Alternativo 01



Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

$$\theta_{b,12} = \theta_{12} - \theta_{56} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} - \frac{\delta_5 - \delta_6}{d_{56}} \quad (25)$$

$$\theta_{b,34} = \theta_{34} - \theta_{56} = \frac{\delta_4 - \delta_3}{d_{34}} - \frac{\delta_5 - \delta_6}{d_{56}} \quad (26)$$

$$M_{12} = \frac{F_2 L}{4} + F_1 \left( \Delta - \frac{\theta_{56} L_c}{2} \right) \quad (27)$$

$$M_{34} = \frac{F_2 L}{4} + F_1 \left( \Delta + \frac{\theta_{56} L_c}{2} \right) \quad (28)$$

$$\Delta = \frac{\delta_5 + \delta_6}{2} \quad (29)$$

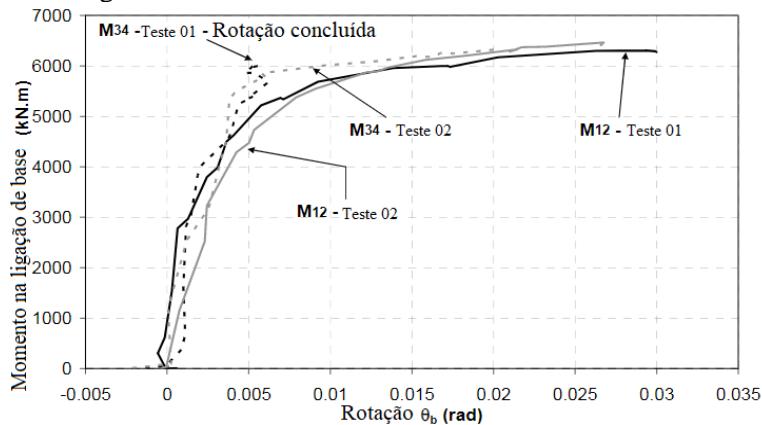
No Método Alternativo 01, a simetria das amostras em ensaio não é o suficiente para garantir que ambas estejam expostas à mesma magnitude de esforços fletores. A assimetria no comportamento mecânico ocorre principalmente em função de imperfeições geométricas e devido a amplificação dos efeitos de segunda ordem pelas rotações indesejadas do bloco. Consequentemente, comportamentos distintos entre os arranjos estruturais são observados, levando as amostras a falharem em momentos diferentes.

Nesse cenário, em função do comportamento assimétrico da ligação, a curva M-θ experimental do Método Alternativo 01 é composta apenas pelos dados obtidos da amostra que falhou por primeiro, descartando-se os dados da segunda amostra ensaiada. Gilbert e Rasmussen (2009) realizaram dois ensaios empregando o Método Alternativo 01, com colunas sob compressão constante de 100 kN, os resultados dos momentos em cada amostra são apresentados na Figura 3-20. Nota-se que, no Teste 01 apenas uma ligação falhou, enquanto a segunda amostra teve sua rotação interrompida no ensaio. Já no Teste 02, ambas as ligações falharam, porém em momentos diferentes. Por fim, a partir da curva M-θ experimental da ligação de base de colunas porta-paletes é possível definir a rigidez rotacional do arranjo.

Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que, em função da ligação rotulada entre o Macaco nº2 e o bloco de concreto, não foi possível empregar os incrementos da força  $F_2$  por controle

de taxa de deslocamento, apenas por taxa de carregamento. Nesse sentido, comprehende-se que, apenas a leitura dos resultados apresentados na Figura 3-20, torna difícil a identificação do pico de momento fletor resistente da amostra da ligação de base ensaiada, fato que reitera a relevância de se empregar o controle do Macaco nº2 por taxas de deslocamento do pistão atuador.

Figura 3-20 – Curva M-θ do Método Alternativo 01



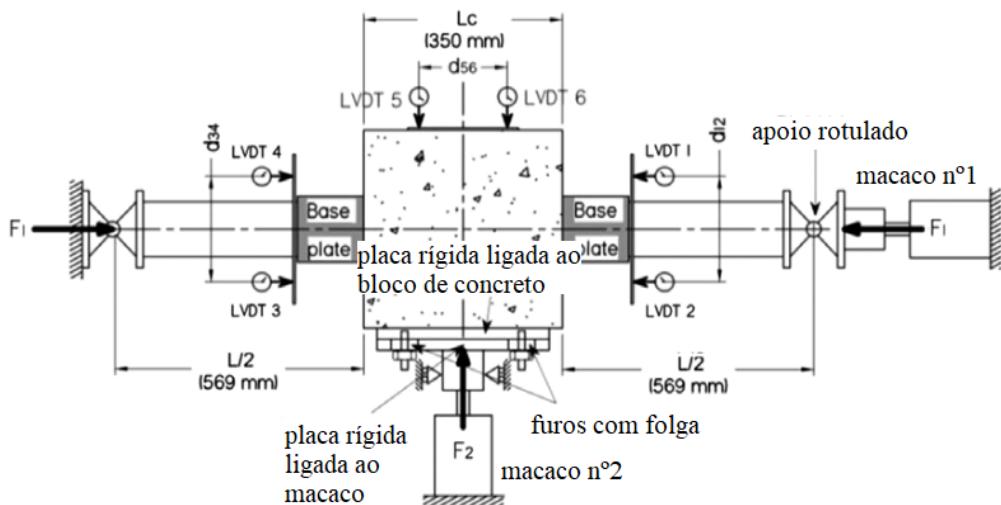
Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2009)

Em decorrência das diferentes funções dos esforços advindos dos Macacos nº1 e nº2, Gilbert e Rasmussen (2009) concluem que a força  $F_2$  deve ser controlada por taxa de deslocamento do pistão, enquanto o controle da força  $F_1$  é mais adequada se feita em termos de força. Essa recomendação é feita não apenas para garantir a qualidade dos resultados experimentais, mas também prevendo a segurança do procedimento experimental, visto que, a partir do controle por taxa de deslocamento do Macaco nº2, é possível evitar o colapso repentino no ensaio.

O segundo método de ensaio desenvolvido por Gilbert e Rasmussen (2009), denominado como Método Alternativo 02 no presente trabalho, também tem por princípio suprir as complexidades e inconsistências do ensaio da norma europeia. Nesse cenário, o aparato experimental do Método Alternativo 02 é ilustrado na Figura 3-21.

No Método Alternativo 02, os autores propõem que a conexão entre o bloco de concreto e o atuador do Macaco nº2 seja feita através de uma placa rígida ancorada no bloco e conectada ao atuador. Portanto, pela forma como a transmissão da força  $F_2$  ocorre e com o aparato de reação restringindo possíveis translações relativas entre o Macaco nº2 e a placa rígida, é garantido que (i) as rotações do bloco de concreto no em torno do seu eixo vertical não ocorram e que (ii) o Macaco nº2 possa ser controlado via taxa de deslocamento do pistão.

Figura 3-21 – Vista em planta do aparato experimental – Método Alternativo 02

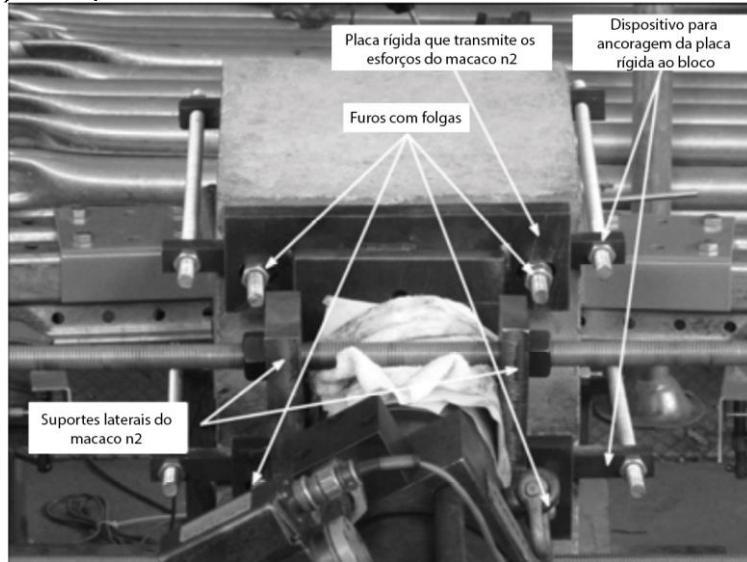


Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

Gilbert e Rasmussen (2009) apontam para alguns cuidados necessários na implementação do Método Alternativo 02, dentre eles a necessidade de que os furos na placa rígida sejam feitos considerando uma folga para o parafuso. Isto posto, aliado a uma ancoragem levemente frouxa com relação à placa rígida, se garante que nenhum esforço cisalhante seja transmitido e interfira no sistema de forças e deslocamentos do ensaio.

No mais, Gilbert e Rasmussen (2009) apontam que, se para o Método Alternativo 01 o pistão do Macaco n°2 atua como uma rótula, no Método Alternativo 02 as condições de contorno impostas entre bloco e Macaco n°2 são similares à um engaste, análise fundamental para formulação dos resultados do ensaio. O aparato experimental necessário para viabilizar a ligação perfeitamente rígida do Método Alternativo 02 é ilustrado na Figura 3-22.

Figura 3-22 – Aparato que conecta o Macaco n°2 e o bloco de concreto – Método Alternativo 02

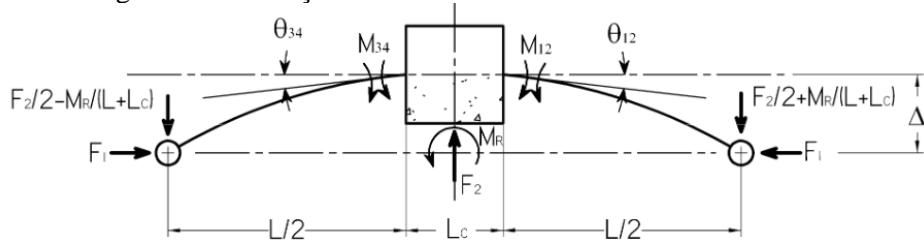


Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

Atestado a vantagem em se empregar um controle por taxa de deslocamento para o Macaco nº2, os autores também decidiram por utilizar da estratégia de ‘pausar’ o ensaio quando a ligação atingisse o máximo momento fletor resistente causado por  $F_2$ . Apesar dos autores não mencionarem como foi empregado a pausa no programa experimental, comprehende-se que a estratégia proposta por Gilbert e Rasmussen (2009) consiste em expor as amostras à um patamar de estabilização dos incrementos do Macaco nº2. Após a pausa do experimento, é observado o decrescimento gradual de  $F_2$ .

As fórmulas para obtenção da relação  $M-\theta$  pelo Método Alternativo 02, são dadas na sequência das Equações (30) à (36), e derivam do sistema de forças e deslocamentos ilustrados na Figura 3-23. As variáveis ' $\delta_i$ ' representam a leitura dos deslocamentos lineares dos transdutores ' $i$ ', sendo ( $i = 1,2,3,4,5,6$ ), já ' $\theta_{b,ij}$ ' são as rotações relativas das amostras ' $ij$ ', simétricas, sendo ( $i = 1,3$  e  $j = 2,4$ ). Por fim, ' $\theta_b$ ' e ' $M_b$ ' são a rotação e o momento fletor, respectivamente, da ligação de base ensaiada, obtidos pela média aritmética dos resultados das amostras simétricas.

Figura 3-23 – Forças e deslocamentos – Método Alternativo 02



Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2011)

$$\theta_{b,12} = \theta_{12} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} \quad (30)$$

$$\theta_{b,34} = \theta_{34} = \frac{\delta_4 - \delta_3}{d_{34}} \quad (31)$$

$$M_{12} = \frac{F_2 L}{4} + \frac{M_R L}{4(L + L_c)} + F_1 \Delta \quad (32)$$

$$M_{34} = \frac{F_2 L}{4} - \frac{M_R L}{4(L + L_c)} + F_1 \Delta \quad (33)$$

$$\theta_b = \frac{1}{2} (\theta_{12} + \theta_{34}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} - \frac{\delta_4 - \delta_3}{d_{34}} \right) \quad (34)$$

$$M_b = \frac{1}{2} (M_{12} + M_{34}) \frac{F_2 L}{4} + F_1 \Delta \quad (35)$$

$$\Delta = \frac{\delta_5 + \delta_6}{2} \quad (36)$$

Gilbert e Rasmussen (2009) não detalham a forma de obtenção do momento ' $M_R$ ' proveniente do binário de forças da ancoragem da placa rígida ao bloco de concreto. Todavia,

em função dos transdutores 5 e 6 apresentarem similaridade em suas medidas, conforme comportamento descrito na Figura 3-23, comprehende-se que uma possível forma de aferir ' $M_R$ ' seja a partir das reações dos parafusos que conectam os aparelhos, medidas por meio de uma célula de carga ligada às peças.

Por fim, em virtude das condições de contorno propostas no Método Alternativo 02, assegura-se a simetria do comportamento mecânico de ambas as amostras de ligações de base de colunas de porta-paleta, fenômeno previsto pelas especificações da EN 15512:2009, porém, dificilmente obtido com o modelo de ensaio europeu. Assim sendo, há a grande probabilidade de ambos os arranjos estruturais conectados ao bloco de concreto falharem ao mesmo tempo, permitindo assim que os resultados experimentais sejam uma média entre os dados obtidos das duas amostras simétricas ensaiadas, conforme Equação (34) e (35), respectivamente. Em virtude do exposto, Gilbert e Rasmussen (2009) atestam a maior vantagem em se empregar o Método alternativo 02, frente ao Método Alternativo 01 e ao ensaio da EN 15512:2009.

Nesse âmbito, comprehende-se que a placa rígida ilustrada na Figura 3-22 configura uma das principais estratégias propostas pelo Método Alternativo 02. Conforme descrito anteriormente, a restrição imposta pelo suporte do Macaco nº2 impõe esforços fletores adicionais nas amostras ensaiadas ( $M_R$ ). Consequentemente, corrobora com os comportamentos mecânicos observados em ensaio, sendo necessária sua consideração na curva M- $\theta$  experimental. Todavia, não é possível afirmar que os comportamentos que originam o esforço ' $M_R$ ', i.e., comportamentos parasitas do ensaio, representam condições de contorno promovidas pelo piso de concreto ao arranjo estrutural de base.

Sendo assim, observa-se inconsistências entre o Método Alternativo 02 e as exigências feitas pelas premissas do *Design by testing*, i.e., simulação dos esforços e condições de contorno que o componente estrutural é exposto em serviço. Além do mais, de conhecimento da sensibilidade dos resultados experimentais, notam-se possíveis interferências do esforço ' $M_R$ ' na representatividade das análises experimentais de capacidade resistente, rigidez rotacional e modos colapso do arranjo estrutural de base ensaiado.

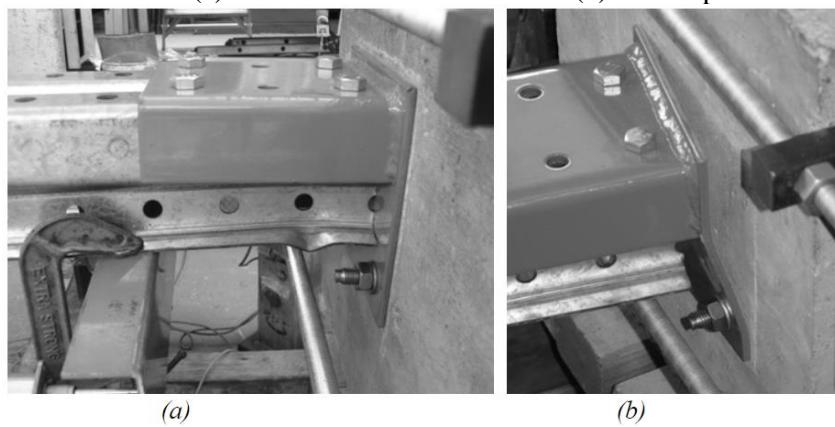
Gilbert e Rasmussen (2009) realizaram 15 ensaios empregando o Método Alternativo 02, os quais foram divididos em 5 grupos de diferentes forças de compressão ( $F_1$ ). Nesse cenário, Gilbert e Rasmussen (2009) concluíram que é possível observar uma melhor estabilização do arranjo estrutural ao adotar a estratégia de pausar o procedimento de ensaio. Dessa forma, torna-se possível obter uma leitura mais precisa e identificação do máximo

momento fletor causado pelos efeitos de primeira ordem do ensaio, os quais são progressivamente amplificados pelos efeitos de segunda ordem globais e locais do arranjo estrutural (Gilbert; Rasmussen, 2009).

Além disso, Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que os resultados de rigidezes iniciais dos arranjos estruturais de base sob maiores compressões apresentaram similaridade entre si. No entanto, os ensaios realizados com forças  $F_1$  menores evidenciaram uma considerável redução nas primeiras rigidezes da ligação, atestando assim os efeitos estabilizantes do confinamento do piso decorrentes da compressão, previstos por Sarawit e Pekoz (2002).

Por fim, Gilbert e Rasmussen (2009) apontam que a magnitude de compressão no arranjo estrutural de base também determinou o modo de colapso do experimento. Segundo os autores, as amostras expostas a compressões maiores apresentaram falha por instabilidade local na coluna em seções próximas da placa de base, colapso ilustrado na Figura 3-24 (a). O mesmo comportamento não foi observado nos modos de falha das amostras sob menores magnitudes de compressão, as quais apresentaram colapso decorrente da formação de rótulas plásticas na placa de base, conforme ilustrado na Figura 3-24 (b).

Figura 3-24 – Modos de falha (a) instabilidade local na coluna (b) rótulas plásticas na placa de base.



Fonte: Gilbert e Rasmussen (2009)

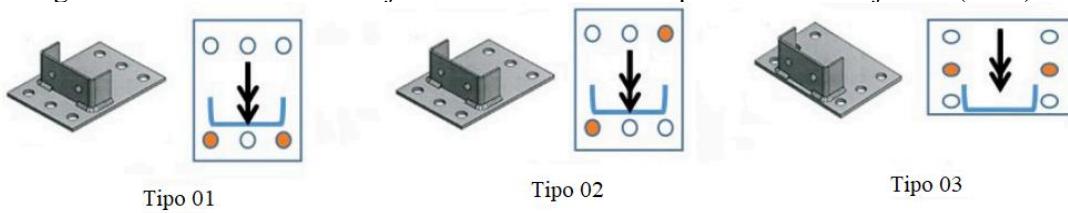
Consequentemente, para as amostras ensaiadas com menor magnitude de  $F_1$ , a identificação do momento fletor máximo resistido não foi possível pelos resultados experimentais, uma vez que, devido ao aparecimento de tensões residuais de membrana (típicas dos efeitos de plastificação), os esforços fletores mantiveram-se crescente sob regime de grandes deformações. Diante do exposto, em concordância com o estudo por Baldassino e Bernuzzi (2000), torna-se evidente a relevância em se investigar a influência dos níveis de forças axiais no comportamento das ligações de base de porta-palete.

Diante do exposto, Gilbert e Rasmussen (2009) evidenciaram a influência de particularidades da coluna rack no comportamento mecânico de ligações de base de porta-paletes, e.g. (i) imperfeições geométricas, (ii) tensões residuais, (iii) baixa inércia a torção e (vi) a tendência de empenamento. Sendo assim, nota-se que as características não negligenciáveis observadas no comportamento mecânico das colunas porta-paletes - contextualizadas no item 2.1 do presente trabalho -, são de igual relevância na investigação da resposta estrutural das ligações de base.

Ademais, Gilbert e Rasmussen (2009) fazem uma análise sobre as prescrições da EN 15512:2009 referentes aos critérios de parada do ensaio. Nesse âmbito, os autores atestam a imprecisão em seguir as especificações europeias, visto que foi constatado que a força  $F2$  pode atingir seu valor máximo sem necessariamente indicar (i) o ponto de capacidade máxima em momento fletor do arranjo ensaiado e/ou (ii) ocorrência de rotações que inviabilizam o uso da ligação. Portanto os autores concluem que a limitação do ensaio pelo *peak load* de  $F2$  – conforme especificação da EN 15512:2009 – é incoerente ao propósito de investigação do comportamento mecânico da ligação de base de porta-paletes seletivos.

Dando sequência aos estudos que propõem métodos de ensaios alternativos, Firouzianhaij *et al.* (2022) realizaram um estudo experimental, numérico e teórico sobre ligações de base de colunas de porta-paletes seletivos. Os autores tinham por objetivo avaliar a rigidez do componente estrutural sob diferentes placas de base e arranjos de ancoragem. Nesse cenário, Firouzianhaij *et al.* (2022) analisaram experimentalmente três modelos de ligação, as quais se diferenciam por condições de ancoragem e/ou geometria da placa de base. A Figura 3-25 ilustra as amostras avaliadas pelos autores, sendo que a ancoragem da placa de base no bloco de concreto é indicada pelos pontos com hachuras sólidas.

Figura 3-25 – Diferentes arranjos estruturais ensaiados por Firouzianhaij *et al.* (2022)



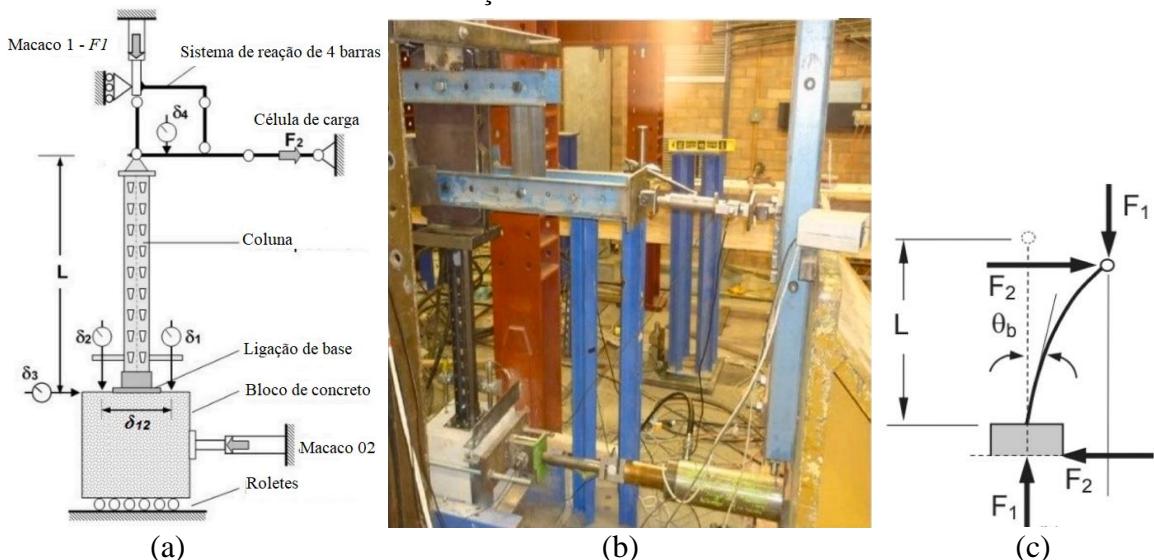
Fonte: Adaptado de Firouzianhaij *et al.* (2022)

Dando enfoque à campanha experimental de Firouzianhaij *et al.* (2022), os autores afirmam que não foi possível reproduzir o ensaio proposto pela EN 15512:2009 (Figura 3-10), em função da complexidade em se garantir experimentalmente as condições de contorno

exigidas para o bloco de concreto, i.e., livre translação nos dois eixos ortogonais do plano de flexão e restrição da rotação neste mesmo plano.

Sendo assim, Firouzianhaij *et al.* (2022), partindo das mesmas limitações apontadas por Gilbert e Rasmussen (2009), propuseram um ensaio diferente da norma europeia. O arranjo experimental proposto pelos autores é ilustrado na Figura 3-26 e será identificado no presente trabalho como Método Alternativo 03. Nota-se que, diferente dos modelos experimentais até então apresentados, apenas uma amostra de ligação de base é ensaiada por experimento.

Figura 3-26 – Aparato experimental – Método Alternativo 03, (a) Ensaio, (b) Registro do ensaio, (c) Forças e deslocamentos



Fonte: Adaptado de Firouzianhaij *et al.* (2022)

O princípio mecânico simulado pelo Método Alternativo 03 é similar à proposta da EN 15512:2009, na qual é avaliada a rotação do arranjo estrutural sob efeitos de compressão ( $F_1$ ) e momentos fletores (decorrentes de  $F_2$ ). O esquema de forças e deslocamentos idealizado para o Método Alternativo 03 é ilustrado na Figura 3-26 (c). No mais, a escolha dos parâmetros das amostras ensaiadas, e.g. comprimento da coluna, resistência e dimensões do bloco de concreto, seguem as especificações presentes na EN 15512:2009.

Segundo Firouzianhaij *et al.* (2022), além de ligações rotuladas no topo da coluna, também foram previstos roletes para apoio do bloco de concreto, a fim de reduzir os efeitos do atrito entre a amostra e o piso. Ademais, um sistema de reação à força  $F_2$  foi previsto por um arranjo de 4 barras rígidas (Figura 3-26 (a)).

A célula de carga conectada ao aparato que restringe horizontalmente a coluna rack foi concebida por Firouzianhaij *et al.* (2022) para mensurar o esforço que gera momento fletor na

amostra de ligação, o qual é uma relação entre a carga aplicada pelo Macaco nº2 e as perdas decorrentes do atrito em ensaio. Sendo assim, seguindo as recomendações da EN 15512:2009, o Método Alternativo 03 tem por critério de parada rotações que inviabilizam o uso da ligação ou o *peak load* da força  $F_2$ .

As Equações (37) à (39) definem a rotação relativa da ligação de base ( $\theta_b$ ), o momento fletor de primeira ordem ( $M_1$ ) e o momento total resistido pelo arranjo estrutural ( $M_b$ ), respectivamente. Os equipamentos de medição ‘ $\delta_i$ ’, sendo ( $i=1,2,3,4$ ), são os transdutores, já ‘ $\delta_{12}$ ’ é a distância entre o equipamento 1 e 2, e ‘ $L$ ’ é o comprimento entre o topo da reação  $F_2$  e a face do bloco de concreto, medidas devidamente indicadas na Figura 3-26 (a).

$$\theta_b = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_{12}} \quad (37)$$

$$M_1 = F_2(L - \delta_4) \quad (38)$$

$$M_b = M_1 + F_1\delta_3 \quad (39)$$

Firouzianhaij *et al.* (2022) ensaiaram 18 amostras de 3 diferentes modelos de ligação de base. O comportamento mecânico constatado no trabalho de Firouzianhaij *et al.* (2022) corrobora com as conclusões de Gilbert e Rasmussen (2009), os quais indicam que, dependendo do modo de falha do arranjo estrutural de base, diferentes critérios de parada de ensaio são aconselhados.

Os autores também observaram a influência da disposição dos parafusos de ancoragem no modo de instabilidade e rotações do componente estrutural ensaiado. Para arranjos de ancoragem tipo 01 e tipo 03 (Figura 3-25) a relação entre força axial nas colunas e magnitude de rotação foi inversamente proporcional, já para o arranjo tipo 02, a proporcionalidade entre as grandezas não foi constatada. Segundo Firouzianhaij *et al.* (2022), a disposição dos parafusos na ligação de base tipo 02, levou o arranjo estrutural a apresentar esforços torcôres, fenômeno que amplificou os momentos fletores decorrentes de efeitos de segunda ordem na ligação, configurando um comportamento mecânico altamente não linear, em comparação com as amostras do tipo 01 e tipo 03.

Por fim, Firouzianhaij *et al.* (2022) afirmam que para o modelo de ligação de base avaliada pelos autores, um valor limite para rotação do arranjo estrutural seria na faixa de 0,01 a 0,02 radiados, a qual foi indicada pelos autores como critério de parada de ensaio. Nota-se que o limite imposto por de Firouzianhaij *et al.* (2022) é diferente da indicação de limite de

rotação feita por Gilbert e Rasmussen (2009) e Godley (2007), os quais adotam um limite de 0,1 radianos, diferença que evidencia a variação do comportamento mecânico da ligação de base decorrente dos diferentes modelos de cada fabricante.

Apesar das importantes melhorias e esclarecimentos necessários proporcionados pelos métodos alternativos de ensaio descritos no presente tópico, comprehende-se que as campanhas experimentais voltadas à investigação do comportamento mecânico de ligações de base de colunas porta-paletes ainda são uma tarefa bastante complexa.

Nesse âmbito, é notável a importância de, além de um planejamento experimental cuidadoso, dedicar devida atenção à análise e interpretação dos resultados das amostras ensaiadas. Isso é essencial para validar a execução do complexo ensaio, gerar dados representativos e garantir a relevância do estudo. Em vista disso, o tópico subsequente tem por objetivo detalhar as formas de análise dos resultados obtidos com o programa experimental, abordando tanto especificações normativas quanto diretrizes alternativas indicadas pela literatura.

### 3.2.3 Análise dos resultados experimentais

A incorporação da semirrigidez da ligação de base na análise estrutural global de porta-paletes seletivos ocorre considerando o componente estrutural como um nó ou elemento, com propriedades lineares ou não lineares, que descrevem as condições de contorno impostas pela ligação. Nesse sentido, comprehende-se que a simples obtenção da curva M-θ experimental não supre integralmente as demandas existentes por especificações de projeto acessíveis, bem como, pode também não revelar seus impactos no modo de instabilidade do rack na direção do corredor.

Branquinho (2021) aponta que uma das limitações para os estudos sobre ligações semirrígidas que fixam o rack ao piso é a representatividade limitada do experimento frente a sua complexidade. Em vista disso, observa-se um grande esforço dos estudos da literatura em compreender formas eficazes de extrair e analisar resultados experimentais do comportamento mecânico de ligações de base de colunas rack. O objetivo é fundamentar campanhas experimentais mais eficientes que acrescentem dados para melhores especificações de projeto.

Inserido no contexto das análises experimentais de ligações de base via metodologia *Design by testing*, o presente tópico tem, portanto, a finalidade de trazer um panorama das principais propostas para análise dos resultados de ensaios de ligações de base de colunas porta-

paletes seletivo. Para tanto, serão abordados tanto prescrições normativas, quanto propostas de estudos da literatura, os quais investigam não só o melhor tratamento dos dados de ensaio, mas também propõem melhorias aos programas experimentais.

Nesse cenário, como já mencionado, a EN 15512:2009 especifica que os parâmetros de projeto da ligação de base, e.g. rigidez rotacional do componente e máximo momento fletor resistente, sejam definidos via análise da curva  $M-\theta$  experimental. Sendo assim, a norma europeia alerta que a análise dos resultados experimentais deve ser feita de forma individualizada para cada modelo de ligação de base e para cada valor de compressão  $F1$  ensaiado, uma vez que são os parâmetros que caracterizam o arranjo estrutural de base.

A primeira etapa da análise experimental proposta pela EN 15512:2009 consiste em obter o valor característico de momento fletor da ligação de base ( $M_k$ ). Para tanto, a Equação (40) é proposta, na qual ' $M_m$ ' é a média dos momentos fletores das amostras ensaiadas, dada pela Equação (41). Na Equação (41), ' $M_{t,i}$ ' são os resultados individuais de máximo momento fletor das ' $n$ ' amostras. Segundo as especificações de ensaio da norma europeia, ' $M_{t,i}$ ' consiste no momento fletor correspondente ao *peak load* de  $F2$  ou à rotação limite estabelecida para ensaio, dando prioridade ao critério que configura a parada do experimento.

Ainda sobre a Equação (40), ' $s$ ' representa o desvio padrão dos resultados experimentais do grupo em análise, dado pela Equação (42) e ' $k_s$ ' é o coeficiente de confiabilidade da amostragem, o qual depende do número ' $n$ ' de amostras do grupo e é definido pela Tabela 13 da EN 15512:2009.

$$M_k = M_m - k_s s \quad (40)$$

$$M_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{t,i} \quad (41)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (M_{t,i} - M_m)^2} \quad (42)$$

Em sequência, o momento fletor de projeto da ligação de base ( $M_{Rd}$ ) é dado pela Equação (43), na qual ' $\eta$ ' é o fator de redução do momento fletor. A EN 15512:2009 especifica ' $\eta \leq 1$ ', todavia permite que a redução fique a critério do projetista. Por fim, ' $\gamma_M$ ' é o coeficiente de segurança para ligações, que é definido pela norma europeia em 1,1 para avaliação do estado limite último (ELU) e 1,0 para estado limite de serviço (ELS).

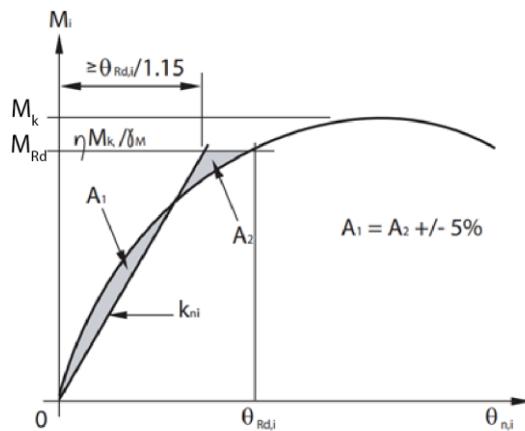
$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \quad (43)$$

Com relação às constantes da Equação (43), principalmente o fator ‘ $\eta$ ’, a norma europeia traz poucas especificações, cenário também presente nas investigações da literatura. Todavia, Baldassino e Zandonini (2008) informam que adotaram ‘ $\eta = 1$ ’ e ‘ $\gamma_M = 1,1$ ’, sem maiores esclarecimentos por parte dos autores se deduz que, para análises estruturais em ELU, não foram consideradas reduções para os dados experimentais.

Definido o momento fletor de projeto ( $M_{Rd}$ ), a EN 15512:2009, a fim de determinar a rigidez rotacional da ligação, indica o processo de ajuste de uma relação bilinear entre esforços fletores e rotações experimentais. Para tanto, com base na curva M-θ de cada amostra de ligação de base, a rigidez rotacional secante ‘ $k_{n,i}$ ’ é definida pela inclinação da reta que parte da origem e delimita duas áreas equivalentes ‘ $A_1$ ’ e ‘ $A_2$ ’, as quais se referem a região abaixo e acima da curva M-θ experimental, respectivamente. Além disso, a área ‘ $A_2$ ’ também é limitada por ‘ $M_{Rd}$ ’.

Sobre a equivalência das áreas, a EN 15512:2009, permite um desvio de 5% entre as mesmas. Nesse âmbito, o traçado da curva bilinear da amostra ‘ $i$ ’, que define a rigidez da ligação de base de colunas porta-paletes é ilustrada na Figura 3-27, a qual também demonstra graficamente o processo de obtenção da mesma.

Figura 3-27 – Relação bilinear que define a rigidez secante da ligação de base



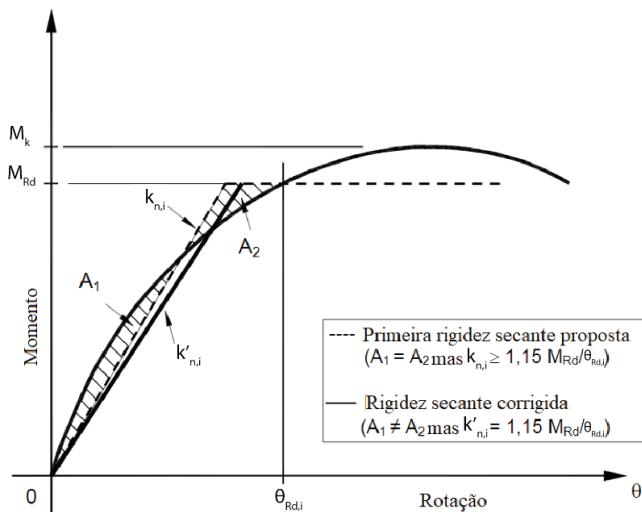
Fonte: EN 15512:2009

Nesse sentido, de conhecimento do comportamento mecânico não linear das ligações de base de colunas rack, a EN 15512:2009 estabelece que a rigidez rotacional secante ( $k_{n,i}$ ) obtida pela curva bilinear deve atender à desigualdade da Equação (44), na qual ‘ $\theta_{Rd,i}$ ’ é o valor de rotação para o esforço ‘ $M_{Rd}$ ’, conforme ilustrado no gráfico da Figura 3-27.

$$k_{n,i} \leq \frac{1,15 M_{Rd}}{\theta_{Rd,i}} \quad (44)$$

Baldassino e Zandonini (2008) explicam que a Equação (44) avalia a magnitude do comportamento não linear da amostra ensaiada, visto que, para estes casos, ocorre uma típica redução constante da rigidez do arranjo estrutural de base, ocasionando assim o descumprimento da desigualdade. Os autores também indicam que, caso a Equação (44) não seja respeitada, deve-se prever menores valores de rigidez rotacional secante, a fim de atender a desigualdade imposta pela norma europeia. O processo de correção dos parâmetros de projeto para ligações de base de porta-paletes é ilustrado na Figura 3-28.

Figura 3-28 – Relação bilinear que define a rigidez secante da ligação de base



Fonte: Adaptado de Baldassino e Zandonini (2008)

Nesse cenário, Baldassino e Zandonini (2008), de conhecimento da possível dificuldade em se realizar a análise de equivalência de áreas, propõem a Equação (45), a qual apresenta uma forma analítica de obtenção da rigidez rotacional secante ( $k_{n,i}$ ). Faz-se relevante mencionar que para aplicar a Equação (45) são necessárias as funções aproximativas das curvas  $M-\theta$  experimentais, as quais segundo os autores devem ser no mínimo polinomiais quadráticas.

$$k_{n,i} = \frac{M_{Rd}^2}{2 \left( M_{Rd} \theta_{Rd,i} - \int_0^{\theta_{Rd,i}} M_{k,i}(\theta) d\theta \right)} \quad (45)$$

Por fim, frente à consideração da divisão de grupos de amostragens por magnitudes de força  $FI$ , a EN 15512:2009 estabelece que a rigidez rotacional a ser utilizada em projeto ( $k_d$ ) deve ser a média entre os valores obtidos de ' $k_{n,i}$ ', conforme descrito na Equação (46).

$$k_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{n,i} \quad (46)$$

Por fim, a norma europeia também permite que os projetistas analisem os dados experimentais da forma alternativa aos cálculos especificados no documento. Todavia, para estes casos, a EN 15512:2009 alerta para a necessidade de relatórios detalhados e que justifiquem os parâmetros de projeto adotados.

Baldassino e Zandonini (2008) empregaram as especificações europeias em suas análises experimentais. Diante disso, os autores notaram o elevado distanciamento entre os resultados experimentais e os parâmetros de esforços resistentes e rigidez de projeto. Baldassino e Zandonini (2008) apontam que a faixa de comportamento elástico da ligação sofreu uma redução média de 12,5%, tendo uma redução máxima de 34,7% dos seus valores para as amostras avaliadas.

Nesse sentido, Baldassino e Zandonini (2008) apontam que uma possível justificativa para a notável penalização dos dados experimentais é o fato do modelo europeu de ensaio de ligação de base ser complexo e ainda apresentar questionamentos quanto sua confiabilidade por parte da literatura, conforme exposto no item 3.2.1. Como conclusão, os autores compreendem que as avaliações dos dados experimentais via EN 15512:2009 apresentam resultados consideravelmente conservadores, deixando como recomendação para futuros trabalhos o refinamento da análise dos resultados obtidos pelo programa experimental.

Dando sequência às especificações normativas para análise dos resultados do programa experimental, a norma americana ANSI/RMI MH16.1:2021 também indica um processo próprio de análise dos resultados de ensaio. Similar a norma europeia, a ANSI/RMI MH16.1:2021 propõe que os resultados experimentais devem ser analisados por grupos de arranjos estruturais de base equivalentes.

Nesse sentido, a norma americana define que o momento fletor de projeto da ligação ( $M_{Rd}$ ) deve atender a Equação (47), na qual ' $M_{ti}$ ' é a capacidade máxima em momento fletor observado no experimento, a qual é reduzida em 60% do seu valor para compor os parâmetros de projeto. Já a rigidez rotacional da ligação de base ( $k_d$ ), deve ser obtida através da Equação (48), na qual ' $\theta_{Rd}$ ' é a rotação do arranjo na magnitude do momento fletor de projeto.

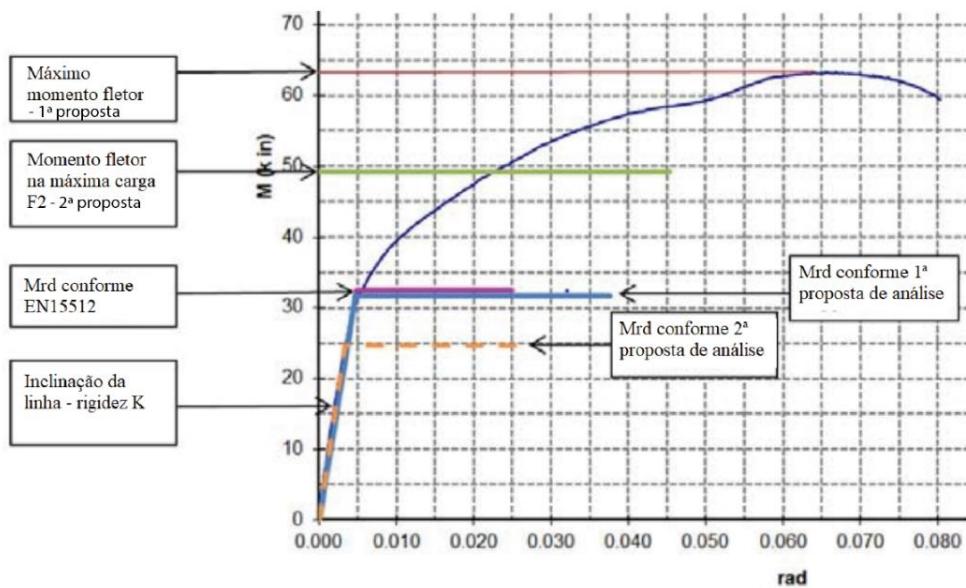
$$M_{Rd} = 0,6M_{ti} \quad (47)$$

$$k_d = \frac{M_{Rd}}{\theta_{Rd}} \quad (48)$$

Na seção de comentários da ANSI/RMI MH16.1:2021 fica claro que suas especificações e fator de redução adotado na Equação (47) são frutos do trabalho de Roure *et al.* (2013) e Roure *et al.* (2016). No trabalho de Roure *et al.* (2016), os autores avaliaram duas formas de definir capacidade máxima de momento fletor experimental ( $M_{ti}$ ). Na primeira alternativa de análise, Roure *et al.* (2016) utilizaram os máximos valores de momento fletor observados na curva M-θ da amostra. Nesse sentido, para os casos em que as amostras falharam por atingirem rotações excessivas, os autores definiram um valor limite de 0,12 rad. Já na segunda forma de análise apresentada em Roure *et al.* (2016), ' $M_{ti}$ ' foi definido como o momento fletor de ensaio no ponto em que a força  $F_2$  atinge seu *peak load*.

Em sequência, os autores apresentam uma análise comparativa entre os (i) dados experimentais, (ii) os resultados das duas propostas de obtenção de ' $M_{ti}$ ', e (iii) análise conforme especificações da EN 15512:2009, comparação ilustrada na Figura 3-29. Roure *et al.* (2016) afirmam que os resultados vindos da primeira alternativa de definição de ' $M_{ti}$ ', i.e., a partir dos máximos esforços resistentes observados na curva M-θ experimental, são mais razoáveis, visto que comportam os efeitos de segunda ordem do experimento. A partir da definição dos máximos esforços, o momento fletor de projeto ( $M_{Rd}$ ) é obtido multiplicando os dados experimentais por um fator de segurança de 0,5, ponto que diferencia a segunda proposta de análise de Roure *et al.* (2016) e a especificada na norma europeia.

Figura 3-29 – Análise dos dados experimentais de Roure *et al.* (2016)



Fonte: Roure *et al.* (2016)

Conforme observado graficamente pela Figura 3-29, a segunda forma de definição do máximo momento fletor apresenta um valor menor de momento resistente de projeto, todavia,

maiores rigidezes rotacionais elásticas. Por fim, diante das análises experimentais e comparativas, Roure *et al.* (2016) propõem um fator de segurança igual a 0,6 para determinação dos parâmetros de projeto a partir da primeira proposta de análise, diretriz que explica a Equação (47) da ANSI/RMI MH16.1:2021.

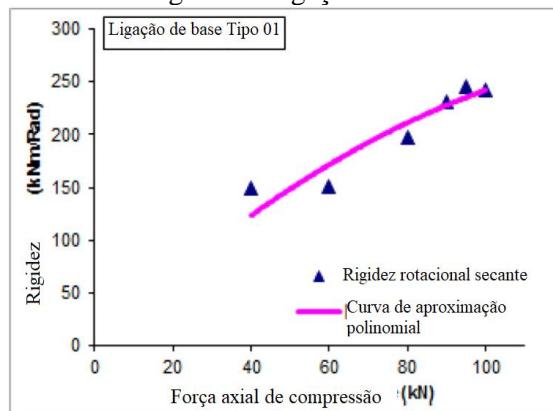
A norma australiana AS 4084:2012, também traz esclarecimentos sobre formas de analisar os resultados experimentais do ensaio de ligações de base de colunas rack. Nesse sentido, a AS 4084:2012 especifica o mesmo procedimento proposto pela EN 15512:2009 para o cálculo do momento fletor característico ( $M_k$ ) do grupo de amostras, indicando inclusive os mesmos valores de coeficiente de confiabilidade ( $k_s$ ), diretrizes apresentadas nas Equações (40) à (42). O documento australiano sugere a Equação (49) para obtenção do momento fletor de projeto ( $M_{Rd}$ ), na qual ‘ $\emptyset$ ’ é o fator de capacidade, avaliado em 0,9 para ligações de base.

$$M_{Rd} = \emptyset M_k \quad (49)$$

De forma similar, os documentos normativos internacionais trazem especificações para definição dos esforços fletores resistentes e rigidez rotacional, os quais são definidos em termos dos seus respectivos valores de força de compressão ( $F_1$ ) no arranjo estrutural de base. Todavia, fica a critério do projetista em como incorporar tais informações nas análises estruturais do pórtico na direção do corredor.

Por fim, outra similaridade presente nas especificações normativas é a recomendação da plotagem dos resultados experimentais em forma de curva de esforços axiais por rigidez desempenhada pela ligação, conforme ilustrado na Figura 3-30.

Figura 3-30 – Comportamento da rigidez da ligação de base de Firouzianhaij *et al.* (2022)



Fonte: Adaptado de Firouzianhaij *et al.* (2022)

A ANSI/RMI MH16.1:2021 e AS 4084:2012 recomendam a definição da rigidez da ligação de base a partir da determinação da capacidade máxima em momento da ligação. Nesse sentido, Gilbert e Rasmussen (2009) apontam para possíveis dificuldades na leitura dos

resultados das amostras que apresentam falha por rótulas plásticas na placa de base, as quais, não raras as vezes, não apresentam um pico de capacidade resistente aos esforços fletores.

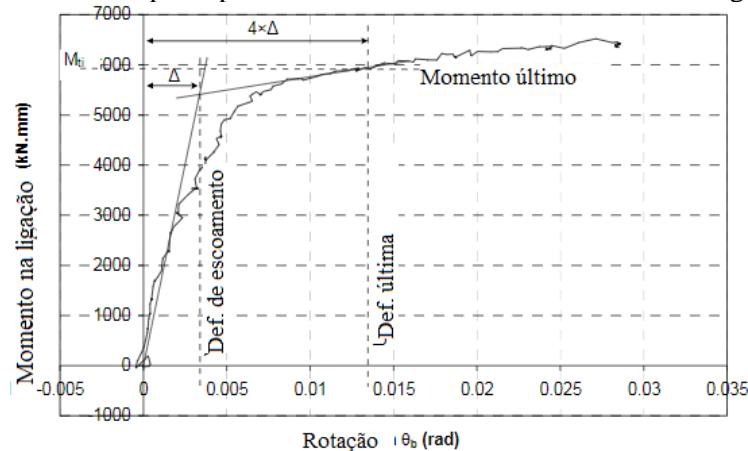
Como identificado na Figura 3-24 (b), as ligações que apresentam grandes rotações em ensaio possuem como característica o aparecimento de rótulas plásticas na placa de base. Por isso, é possível correlacionar o fenômeno de plastificação da ligação com valores limites de rotação da estrutura ensaiada. Nesse sentido, a partir da experimentação de 137 amostras de ligações, Yura *et al.* (1980) concluíram que as deformações características da máxima capacidade resistente de ligações metálicas correspondem a aproximadamente 4 vezes a deformação de escoamento do aço que compõe a estrutura. Este parâmetro foi determinado pelos autores com o intuito de caracterizar o comportamento inelástico das ligações no momento em que estas ainda resistem às deformações plásticas.

Em virtude do exposto, Gilbert e Rasmussen (2009) propuseram um método alternativo para determinação da capacidade máxima de momento fletor ( $M_{ti}$ ), o qual se baseia em limites pré-estabelecidos de rotação da ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos.

Diante das especificações de Yura *et al.* (1980), Gilbert e Rasmussen (2009) recomendam o limite de 4 vezes a deformação de escoamento como critério para determinação da capacidade última de momento fletor ( $M_{ti}$ ) da ligação de base de colunas porta-paletes. O gráfico da Figura 3-31 ilustra a proposta de análise experimental de Gilbert e Rasmussen (2009) para os casos em que não é possível extrair o momento fletor máximo resistido pela amostra. Faz-se relevante mencionar que ‘ $\Delta$ ’ refere-se à deformação de escoamento. Sendo assim, a deformação de escoamento é definida pelo limite entre a fase elástica da ligação e a fase plástica, i.e., conforme definição da ANSI/RMI MH16.1:2021, é o ponto em que o material apresenta limitações e desvios na relação linear constitutiva.

Nesse cenário, de forma similar às especificações de ensaio do Método Alternativo 02, a AS 4084:2012 também adotou as orientações para análise dos dados experimentais indicadas por Gilbert e Rasmussen (2009), as quais complementaram as especificações normativas australianas para definição da rigidez rotacional secante da ligação de base de colunas rack. O método de análise de Gilbert e Rasmussen (2009) é indicado na AS 4084:2012 apenas para casos em que não é possível definir os esforços pela curva  $M-\theta$  experimental. A princípio o documento australiano propõem o mesmo processo de análise da relação bilinear da norma europeia, Figura 3-27.

Figura 3-31 – Proposta para cálculo do momento fletor último da ligação



Fonte: Gilbert e Rasmussen (2009)

Em conclusão, a AS 4084:2012 indica que os parâmetros estruturais da ligação de base de colunas rack devem atender a Equação (44) e Equação (46) da EN 15512:2009, as quais representam a inequação para avaliação do comportamento não linear e determinação da rigidez rotacional de projeto ( $k_d$ ), respectivamente.

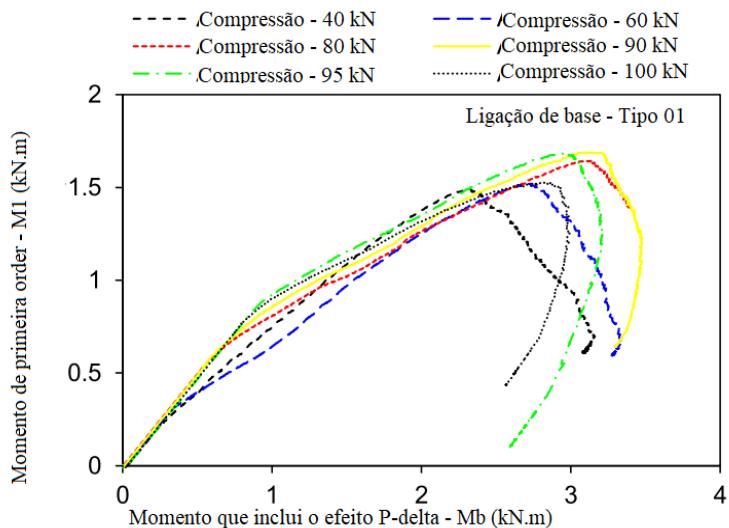
Gilbert e Rasmussen (2009) afirmam que, não raras as vezes, o comportamento de falha da ligação de base de porta-paletes é decorrente da amplificação do momento fletor na ligação em resposta aos efeitos de segunda ordem do arranjo estrutural, o qual caracteriza o comportamento não linear da curva  $M-\theta$  experimental. Diversos estudos experimentais e teóricos da literatura procuram formas alternativas de analisar o comportamento mecânico não linear das ligações de base de colunas de porta-paletes seletivos, com o objetivo de elaborar propostas para a definição de parâmetros de projeto seguros e otimizados.

Os efeitos de segunda ordem, determinantes na capacidade máxima em momento fletor no colapso do arranjo estrutural de base, explicam a imprecisão em se adotar simplificações de projeto para as condições de contorno da base do porta-paleta seletivo, e.g. ligações rotuladas, ou engastadas. Nesse sentido, Gilbert e Rasmussen (2009) apontam ser crucial para a investigação do comportamento mecânico de ligações de base mensurar a magnitude da influência da não linearidade geométrica na falha do componente.

No cenário de amplificações dos momentos fletores devido aos efeitos de não linearidade geométrica do arranjo estrutural da base de porta-paletes, Firouzianhaij *et al.* (2022) observaram um aumento na capacidade resistente de momento do arranjo experimental, mesmo após o decrescimento da força  $F_2$ . Segundo os autores, tal comportamento indica o efeito de segunda ordem  $P-\Delta$  (Figura 2-3) em ensaio. Para tanto, Firouzianhaij *et al.* (2022) propõem o

traçado do gráfico da Figura 3-32, a fim de observar a típica não linearidade geométrica das ligações de base de porta-paletes.

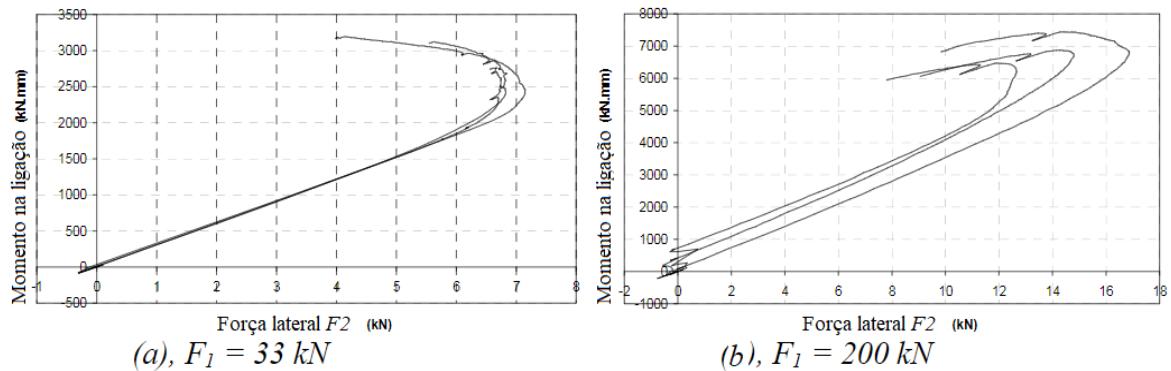
Figura 3-32 – Gráfico  $M_b \times M_1$  – Tipo 01



Fonte: Adaptado de Firouzianhaj et al. (2022)

Com base no exposto, Gilbert e Rasmussen (2009) propõem a plotagem da curva ilustrada na Figura 3-33, a qual expõe a relação entre  $F_2$  e os momentos resistentes do arranjo estrutural ensaiado. Com base na Figura 3-33, comprehende-se que mesmo após *peak load* da força  $F_2$ , os valores de momento fletor resistidos pela ligação crescem, evidenciando a presença dos efeitos de segunda ordem  $P-\Delta$ . Os autores apontam que os ensaios sob compressão de maior magnitude apresentam uma falha mais repentina da ligação de base, sendo o momento fletor decorrente de  $F_2$  apenas 5% a 10% menor que o momento máximo experimentado pelo arranjo estrutural de base.

Figura 3-33 – Curva Momento e força lateral  $F_2$  – Método Alternativo 02 (a) Força  $F_1$  de 33 kN (b) Força  $F_1$  de 200 kN



Fonte: Adaptado de Gilbert e Rasmussen (2009)

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo exibiu as principais características das ligações de base de porta-paletes seletivos. Nesse sentido, apresentou-se o estado da arte referente aos estudos e especificações normativas voltadas ao elemento que ancora o rack ao piso, tanto no âmbito de métodos teóricos quanto métodos experimentais. De forma geral, observa-se um cenário de especificações generalistas e o caráter ainda investigativo dos estudos, os quais procuram compreender os fenômenos envolvidos no comportamento estrutural das ligações de base.

Primeiramente, se contextualizou os típicos comportamentos mecânicos das ligações de base de colunas porta-paletes, os quais fazem com que seu dimensionamento e análise apresente pouca similaridade com ligações que ancoram outras estruturas metálicas à fundação. Nesse cenário, comprehende-se que a deslocabilidade decorrente da semirrigidez das ligações de base geram tensões adicionais na estrutura porta-paleta, as quais resultam em efeitos não negligenciáveis à estabilidade do porta-paleta na direção do corredor.

Sendo assim, foram apresentadas as considerações sobre ligações de base de colunas porta-paletes presentes na norma brasileira, normas internacionais e em trabalhos da literatura. No âmbito analítico, as propostas para avaliação da rigidez rotacional e resistência das ligações de base envolvem diferentes hipóteses simplificadoras, porém se assemelham na tentativa de viabilizar a inclusão do efeito da ligação de base em projetos de estruturas porta-paletes.

Nota-se que, de forma geral, as especificações normativas são generalistas ou muitas vezes nulas, cenário que corrobora com brechas para dimensionamentos de porta-paletes seletivos ineficientes ou até mesmo contra-segurança. Isso pois, de conhecimento dos componentes característicos da rotação da ligação entre coluna rack e piso, comprehende-se que simplificações na análise estrutural, e.g. ligações rotuladas ou engastadas, são insuficientes para representar o comportamento mecânico das ligações de base e seus efeitos na estabilidade global do rack.

Por isso, as recomendações normativas e da literatura se assemelham na ênfase dada à importância de programas experimentais para se obter a caracterização da rigidez rotacional e comportamento mecânico dos arranjos estruturais de base de porta-paletes seletivos. Inserido neste contexto, o presente capítulo apresentou os diferentes modelos experimentais existentes na literatura, os quais seguem as premissas do *Design by testing* especificada na norma europeia. O *Design by testing* define que as investigações experimentais acerca do arranjo

estrutural de base dos porta-paletes são conduzidas com o princípio de simular as condições de contorno e carregamento reais do componente da estrutura de armazenamento, para assim gerar especificações de projeto representativas.

Diante do exposto no presente capítulo, observa-se a complexidade presente nas campanhas experimentais de ligação de base de porta-paletes, tanto em modelos normativos quanto em métodos alternativos de ensaio propostos pela literatura. As limitações para investigações experimentais se resumem ao âmbito (i) dos aparatos experimentais necessários, (ii) do sistema estático previsto *versus* esforços parasitas, (iii) dos detalhes pertinentes ao procedimento de ensaio, (vi) do número de amostras necessário para o estudo e (v) das condições de contorno exigidas para os aparatos experimentais.

Por fim, comprehende-se que, para a investigação dos comportamentos típicos de ligações de base, faz-se necessário realizar análises para além da curva M- $\theta$  da amostra. Sendo assim, as propostas de análise experimental procuram elucidar formas de (i) definir a rigidez rotacional da ligação, (ii) considerar os diferentes modos de falha observados em ensaio, e (iii) analisar de forma qualitativa e quantitativa a não linearidade geométrica das ligações de base.

Diante do exposto, a partir do estado da arte apresentado no Capítulo 3, comprehende-se pontos cruciais para o estudo experimental sobre o comportamento mecânico de ligações de base de colunas porta-paletes seletivos. Por conseguinte, diante das constatações feitas, o capítulo subsequente apresenta os detalhes do modelo de ensaio projetado para a campanha experimental do presente trabalho.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A importância de uma estruturação detalhada da campanha experimental, de seus objetivos e dos comportamentos mecânicos previstos, é crucial para a obtenção de resultados experimentais confiáveis (Gilbert *et al.*, 2022). Nesse cenário, nota-se a relevância dos pontos elucidados nos capítulos anteriores, e.g. comportamentos mecânicos típicos das colunas rack e o estado da arte referente às ligações de base de porta-paletes, visando contemplar a preparação de uma análise experimental consistente.

Além disso, como já mencionado, a presente pesquisa mantém a consideração das estruturas porta-paletes seletivos como composição de dois pórticos independentes, dispostos paralelo e perpendicular ao corredor. Essa consideração é fundamental para compreender a limitação do programa experimental em avaliar o comportamento das ligações de base de colunas porta-paletes como componentes do pórtico paralelo ao corredor.

A presente campanha experimental foi desenvolvida no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP. Nesse sentido, em função dos aparatos experimentais necessários para os modelos de ensaio apresentados no tópico 3.2, foi observada a necessidade do desenvolvimento de um método alternativo de ensaio, a fim de adaptar o estudo aos equipamentos disponíveis no LE.

Diante do exposto e da compreensão da complexidade inerente ao programa experimental para avaliação do comportamento mecânico de ligações de base de porta-paletes seletivos, o Capítulo 4 expõe os esforços empregados em projetar e planejar a campanha experimental realizada.

### 4.1 MODELO ALTERNATIVO DE ENSAIO

Em vista das diferentes propostas de modelos experimentais apresentadas no tópico 3.2, nota-se que, de forma geral, todas possuem pontos críticos na execução e/ou análises experimentais. Nesse sentido, os principais fatores limitantes à realização do ensaio são: a disponibilidade dos aparatos experimentais necessários no LE, local onde a campanha experimental ocorre, e a obtenção de um número suficiente de amostras para compor uma base de dados representativa. Diante disso, a Tabela 4-1 expõe uma análise comparativa entre os modelos de ensaios para ligações de base de porta-paletes seletivos.

Tabela 4-1 – Comparação entre os ensaios apresentados para ligação de base de colunas porta-paletes

ENSAIO	APARATO EXPERIMENTAL NECESSÁRIO	CONSIDERAÇÕES SOBRE Nº DE AMOSTRAS
<b>EN 15512:2009</b>	Macaco nº1	Número mínimo de 6 ensaios por modelo de ligação, sendo no mínimo 3 amostras por valor de $F1$ . Em geral, não é possível aproveitar os resultados das 2 amostras simétricas.
	Macaco nº2	
	Rótula para topo da coluna rack	
	Aparato para apoio do bloco	
<b>AS 4084:2012 / Método alternativo 02</b>	Macaco nº1	Número mínimo de 6 ensaios por modelo de ligação, não mencionando o número mínimo de amostras por valor de $F1$ . De forma recorrente, é possível utilizar os dados das 2 amostras simétricas ensaiadas.
	Macaco nº2	
	Rótula para topo da coluna rack	
	Aparato para apoio do bloco	
	Placa rígida junto ao macaco nº2	
<b>ANSI/RMI MH16-1:2021</b>	Macaco nº1	Número mínimo de 3 ensaios por amostras submetidas ao mesmo valor de $F1$ . Os resultados não podem variar mais que 15% entre si.
	Macaco nº2	
	Rótula para base do macaco nº1	
	Apoio para bloco de fundação	
	Aparato para topo da coluna	
<b>Método alternativo 01</b>	Macaco nº1	Não há recomendações sobre o número mínimo de amostras. Em geral, não é possível aproveitar os resultados das amostras simétricas
	Macaco nº2	
	Rótula para topo da coluna rack	
	Apoio para bloco de fundação	
<b>Método alternativo 03</b>	Macaco nº1	Os autores ensaiaram 6 amostras por modelo de ligação de base, sendo 1 amostra por valor de $F1$ .
	Macaco nº2	
	Sistema de reação de 4 barras	
	Apoio para bloco de fundação	

**Legenda:**

: não disponível no LE

: disponível no LE

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se pela Tabela 4-1 que os equipamentos necessários para replicar os modelos de ensaio são pouco convencionais, confirmando a complexidade do programa experimental de ligações de base de porta-paletes. Diante do exposto e pela falta de especificações detalhadas dos aparelhos de ensaio empregados na literatura, a presente pesquisa observou a necessidade de propor um modelo alternativo às metodologias de ensaio apresentadas na Tabela 4-1.

O modelo alternativo de ensaio projetado para o presente programa experimental segue as premissas definidas pelo *Design by testing*, prescrito na norma europeia, EN 15512:2009, e

descrita no Capítulo 3. Por isso, manteve-se a proposta de garantir um sistema estático no qual as amostras de ligações de base são submetidas a esforços de flexo-compressão. Além disso, o modelo de ensaio projetado foi concebido visando solucionar também as falhas e dificuldades atreladas aos modelos já existentes. Portanto, na sequência, serão descritas as principais premissas que delinearam a concepção do modelo alternativo de ensaio.

Os primeiros aspectos que delinearam o modelo de ensaio projetado foram o número de amostras disponível para o estudo e a necessidade de criar estratégias para evitar a rotação do bloco de fundação em torno do seu eixo vertical, comportamento que gera esforços fletores parasitas em ensaio. Nesse sentido, conforme apontado na Tabela 4-1, no âmbito do número de amostras necessárias para o estudo, observam-se vantagens em se ensaiar apenas uma amostra de ligação por experimento. Tais vantagens se justificam pelo fato de, não raras as vezes, nos modelos de ensaio com amostras simétricas, serem descartados os resultados de uma das ligações ensaiadas, penalizando a amostragem final necessária para estudo.

Além disso, com relação aos esforços parasitas em ensaio, conforme detalhado no Capítulo 3, a rotação da amostra de bloco em torno do seu eixo vertical é inevitável aos modelos de ensaio com amostras simétricas e amplifica indevidamente os efeitos de segunda ordem no arranjo estrutural ensaiado. Nesse âmbito, uma das grandes contribuições do Método alternativo 02 de Gilbert e Rasmussen (2009) se baseia na consideração do esforço fletor advindo dessa rotação indesejada, identificado como ' $M_r$ ' pelos autores, na curva  $M-\theta$  experimental.

Todavia, apesar do momento fletor ' $M_r$ ' impactar o comportamento da curva  $M-\theta$  experimental e, consequentemente, necessitar ser devidamente incluso nas análises dos resultados, comprehende-se que é consequência de um comportamento mecânico indesejado do modelo de ensaio com amostras paralelas. Portanto, ao compreender que ' $M_r$ ' não representa um esforço característico dos porta-paletes seletivos na direção do corredor, verifica-se que seu efeito no comportamento mecânico do arranjo estrutural ensaiado é inconsistente com as premissas do *Design by testing*.

Nesse sentido, Firouzianhaij *et al.* (2022) afirmam que, pelo fato do Método Alternativo 03 projetado pelos autores, não aderir à simetria das amostras, reduziram-se significativamente os efeitos indesejados de rotação do bloco de concreto em torno de seu eixo vertical. Por conseguinte, devido às vantagens no aproveitamento das amostras e no comportamento mecânico observado em ensaio, o modelo experimental projetado no presente trabalho aderiu o estudo de apenas uma amostra por experimento.

Dando sequência aos pontos relevantes da concepção do programa experimental, Gilbert *et al.* (2022) mencionam a importância da previsão dos deslocamentos de ensaio a fim de manter o sistema estático esperado para o estudo. Isso se deve ao fato de que, não raras vezes, grandes deslocamentos e/ou deformações podem alterar o equilíbrio entre a amostra e os aparelhos experimentais. Nesse cenário, a Figura 4-1 exemplifica os alertas apontados por Gilbert *et al.* (2022) no contexto dos ensaios de ligações da base de porta-paletes.

Figura 4-1 – Aparatos experimentais projetados para garantir o sistema de forças e deslocamentos

Trilho monodirecional para suporte do Macaco nº2, o qual garante a atuação de  $F_2$  no centro do bloco



Zhao *et al.* (2019) e Huang *et al.* (2021)

Manta Teflon para translação do bloco e rótula entre Macaco nº2 e amostra, a qual permite a atuação de  $F_2$  no centro do bloco



Baldassino e Zandonini (2008)

Trilho bidirecional conectado ao sistema rotulado no topo da coluna, os quais garantem a atuação centralizada de  $F_1$



Roure *et al.* (2016)

Trilhos e roletes para suporte do bloco



Firouzianhaij *et al.* (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor

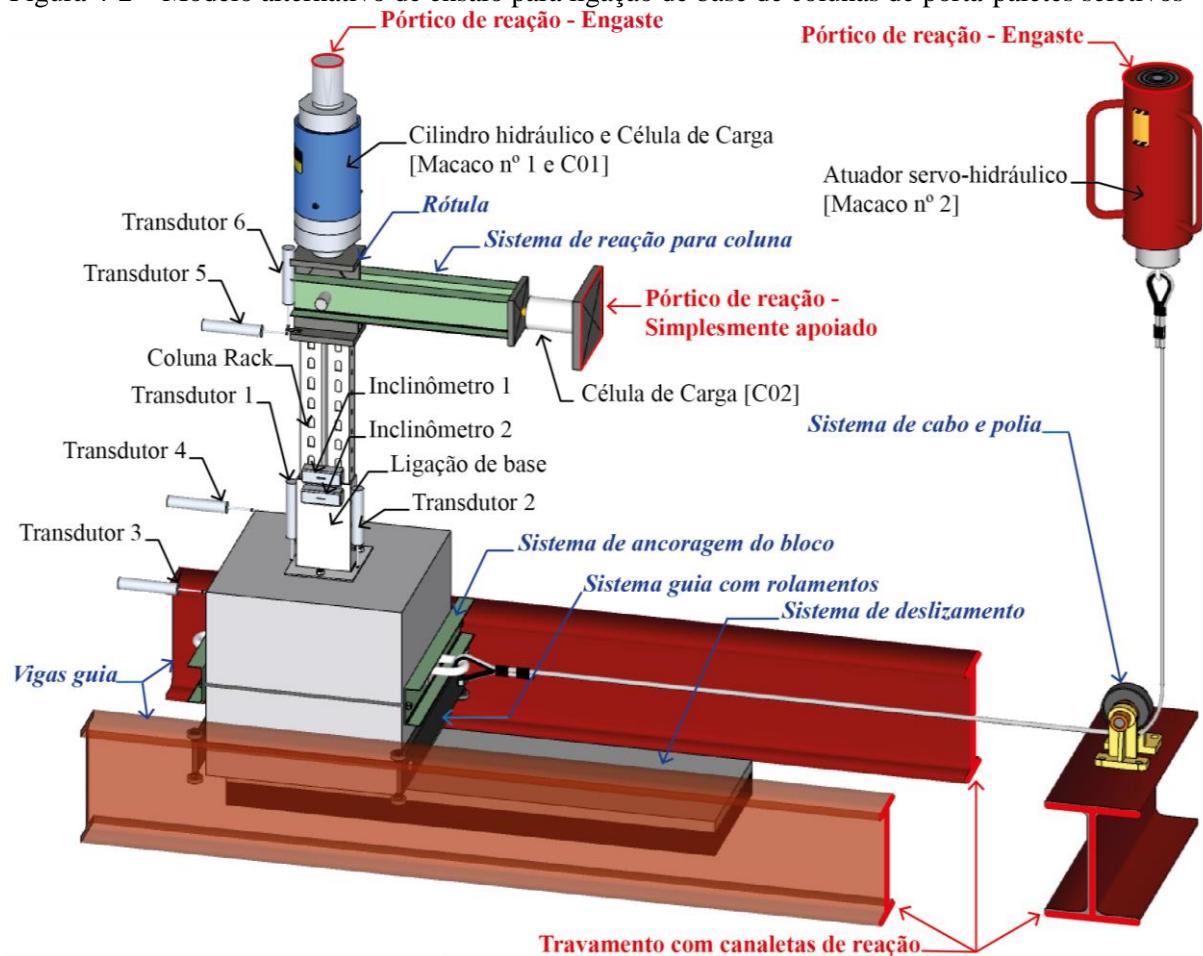
Nota-se que, tirando os aparelhos experimentais para garantia das condições de contorno do bloco de fundação, as complexidades se restringem ao âmbito das exigências no posicionamento dos Macacos nº1 e nº2, os quais precisam aplicar a força  $F_1$  no centro geométrico da coluna rack e  $F_2$  no centro geométrico do bloco, respectivamente. Nesse sentido, ciente da complexidade de se projetar um suporte com graus de liberdade de translação para os atuadores hidráulicos, o presente estudo seguiu com a concepção de um modelo alternativo de ensaio no qual os atuadores são conectados a um sistema de reação estático.

Por fim, conforme identificado na Tabela 4-1, nenhum dos modelos de ensaio apresenta conformidade com os equipamentos disponíveis no LE para o Macaco nº 2. Isso ocorre porque a máquina disponível com pistão atuador servo-controlado, que viabiliza o controle por taxa de

deslocamento, não foi projetada para ser utilizada na horizontal. Nesse cenário, a fim de garantir a aplicação de  $F_2$  por taxa de deslocamento, o modelo alternativo de ensaio restringiu-se à necessidade de posicionar verticalmente o atuador servo-controlado.

Diante do exposto, o presente estudo elaborou o modelo de ensaio ilustrado na Figura 4-2. Conforme identificado na Figura 4-2, as regiões com descrição em vermelho negrito detalham as condições de contorno dos aparatos experimentais, as quais são garantidas por pórticos e canaletas de reação. Além disso, as peças com descrição em azul itálico são os aparelhos experimentais projetados para o modelo alternativo de ensaio, os quais serão devidamente descritos em tópicos subsequentes.

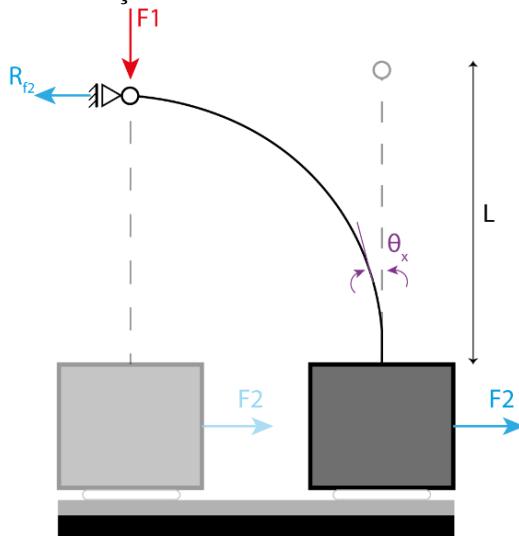
Figura 4-2 – Modelo alternativo de ensaio para ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme ilustrado na Figura 4-2, foi desenvolvido um sistema de cabo e polia, o qual conecta o atuador servo-hidráulico, posicionado na vertical, ao arranjo experimental por meio do sistema de ancoragem. Nesse sentido, a Figura 4-3 ilustra o esquema de forças e deslocamentos idealizado para o modelo alternativo de ensaio do presente trabalho.

Figura 4-3 – Sistema de forças e deslocamentos do modelo alternativo de ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do sistema de forças e deslocamentos idealizado para o ensaio (Figura 4-3), as Equações (50) à (52) detalham as formulações para obtenção da rotação da ligação e dos momentos fletores atuantes no arranjo estrutural de base, respectivamente. Os equipamentos de medição ‘ $\delta_i$ ’ e ‘ $\theta_1$ ’ são, nesta ordem, os transdutores de deslocamentos ‘i’, sendo ( $i=3,4,6$ ), e o inclinômetro 1, identificados na Figura 4-2. Por fim, ‘ $L$ ’ é a altura indeformada entre o topo da reação  $F2$  e a placa de base da ligação.

$$\theta_b = \theta_1 \quad (50)$$

$$M_1 = F_2(L - \delta_6) \quad (51)$$

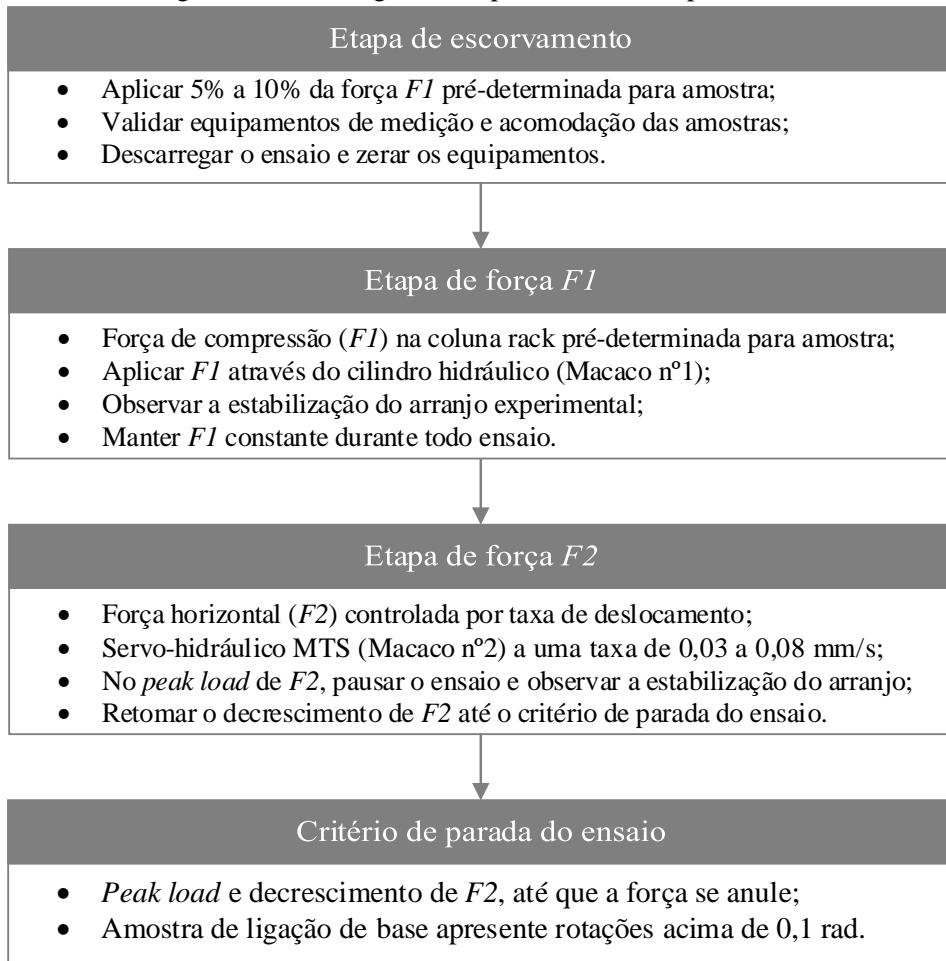
$$M_b = M_1 + F_1 \frac{\delta_3 + \delta_4}{2} \quad (52)$$

Sendo assim, o fluxograma da Figura 4-4 detalha o procedimento experimental adotado no presente trabalho, o qual é similar às etapas de ensaio especificadas pela EN 15512:2009. Nesse âmbito, a primeira etapa de ensaio consiste no processo de escorvamento, o qual consta com a aplicação de uma porcentagem da força  $F1$  prevista para o grupo de ensaio, entre 5% a 10% dessa força. O escorvamento é essencial para verificação dos aparelhos experimentais e acomodação das peças ensaiadas, principalmente por se tratar de amostras conectadas por parafusos, os quais geram folgas entre as peças. Após a realização da etapa de escorvamento, o arranjo experimental é descarregado e todos os equipamentos de medição zerados.

Em sequência, o ensaio se inicia com a compressão da amostra de coluna rack pelo cilindro hidráulico (Macaco nº1). A força de compressão ( $F1$ ) tem por finalidade simular os esforços axiais transmitidos da coluna porta-palete ao piso de concreto. Conforme mencionado

em capítulos anteriores, o esforço axial advindo da coluna rack possui influência direta no comportamento mecânico da ligação de base dos porta-paletes. Nesse sentido, parte dos esforços empregados no planejamento experimental consistiu em determinar a força  $F1$  atribuída a cada grupo de amostras, planejamento que será detalhado em itens subsequentes.

Figura 4-4 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme descrito na Figura 4-4, a atuação de  $F1$  foi feita através de um cilindro hidráulico (Macaco nº1) e, após atingir o valor pré-determinado de compressão para a amostra, foi observado a estabilização do arranjo experimental. Faz-se relevante mencionar que o critério de estabilização da amostra frente à compressão  $F1$  na coluna rack permite observar e mensurar eventuais rotações na ligação de base devido aos esforços de segunda ordem. Por fim, é primordial para o experimento que a força  $F1$  se mantenha constante durante todo o ensaio. Para tanto, foi utilizado um cilindro hidráulico de capacidade 250 kN.

Em sequência, a segunda etapa do experimento consiste na atuação da força  $F2$ , através do servo-hidráulico (Macaco nº2). O carregamento  $F2$ , aliado ao braço de alavanca composto pela coluna, tem por intuito gerar momento fletor na amostra de ligação de base. Assim sendo,

os ensaios foram realizados com controle de deslocamento do pistão do atuador servo-hidráulico MTS de capacidade de 500 kN a uma taxa de 0,03 a 0,08 mm/s.

Nesta etapa, também será aplicado a estratégia proposta por Gilbert e Rasmussen (2009), os quais pausam os incrementos do Macaco nº2 a partir do momento em que  $F2$  atinge seu valor máximo. Com isso, o arranjo estrutural se estabiliza frente aos esforços de flexo-compressão e os efeitos de segunda ordem são mais bem observados na curva  $M-\theta$  experimental. Por fim,  $F2$  decresce até o critério de parada do ensaio, o qual representa a última etapa do experimento, conforme fluxograma da Figura 4-4.

Os critérios de parada do ensaio são definidos a partir dos apontamentos feitos por Gilbert e Rasmussen (2009) e Roure *et al.* (2016). Nesse âmbito, a continuação do ensaio é limitada por duas condições: (i) *peak load* e decrescimento de  $F2$ , até que a força se anule, (ii) ou que a amostra de ligação de base apresente rotações que deixem de ser representativas da estrutura porta-paleta. No contexto de poucas especificações sobre a magnitude das rotações para critério de parada do ensaio, foi adotado o valor limite de 0,1 rad, especificado nos trabalhos de Gilbert e Rasmussen (2009), Godley (2007) e Roure *et al.* (2016), os quais ensaiaram ligações com geometria similar à do presente estudo.

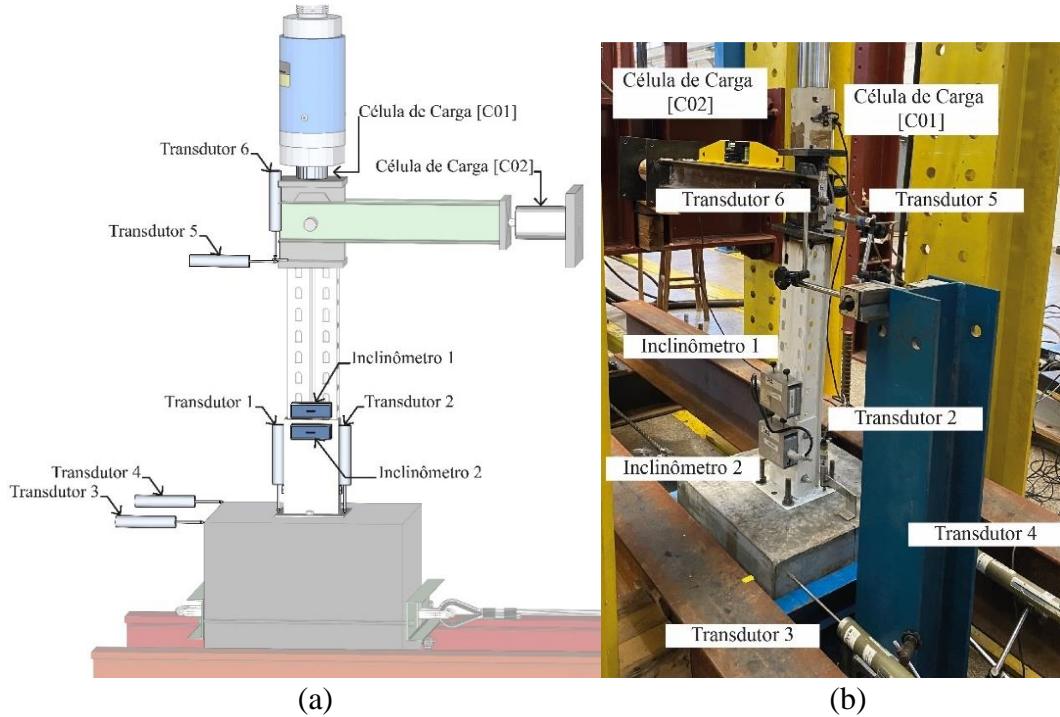
Dando sequência no detalhamento de aspectos pertinentes do programa experimental, a Figura 4-5 ilustra maiores detalhes com relação aos equipamentos de medição empregados no modelo alternativo de ensaio. Nesse âmbito, a célula de carga ‘C01’, calibrada para 100 kN, é acoplada ao cilindro hidráulico e, consequentemente, mensura a força  $F1$  do experimento. Já a célula de carga ‘C02’, calibrada para 25 kN, é conectada ao sistema de reação horizontal no topo da coluna e, por isso, afere a força  $F2$  de ensaio.

Conforme indicado na Figura 4-5, no total foram utilizados 6 transdutores de deslocamento linear. O transdutor 6 apresenta um curso de 25 mm e precisão de três casas decimais, ele afere o deslocamento vertical do topo da coluna, o qual ocorre em função da aplicação da carga de compressão  $F1$ . Assim sendo, a medida do transdutor 6 é contabilizada no braço de alavanca que, aliado à reação da força  $F2$ , gera o esforço fletor na ligação de base.

O transdutor 5, também com curso de 25 mm e três casas decimais de precisão, foi posicionado na horizontal, conforme Figura 4-5. Nesse cenário, a medida do transdutor 5 foi utilizada para conferência da efetividade do sistema de reação no topo da coluna. Conforme descrito na Figura 4-2, o topo do arranjo experimental deve permanecer indeslocável na direção

horizontal, sendo assim, é esperado que o transdutor 5 confirme o sistema estático idealizado para o ensaio.

Figura 4-5 – Equipamentos de medição do modelo alternativo de ensaio (a) Esquema da instrumentação (b) Registro da instrumentação no ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda no âmbito dos transdutores de deslocamentos ilustrados na Figura 4-5, observa-se o posicionamento dos equipamentos 3 e 4 nos vértices do bloco de concreto, os quais possuem curso de 100 mm e precisão de 2 casas decimais. Os deslocamentos horizontais aferidos pelos equipamentos compõem o cálculo dos esforços fletores devido aos efeitos de segunda ordem. Além disso, conforme recomendações dos trabalhos de Baldassino e Zandonini (2011) e Zhao *et al.* (2019), a disposição em ensaio dos transdutores 3 e 4 também serve como parâmetro para mensurar se houve, ou não, rotação do bloco de concreto em torno do seu eixo vertical. Nesse sentido, é esperado que a medição desses transdutores não apresente grande variabilidade entre si, i.e., que o bloco apresente apenas translação horizontal.

Por fim, os pares de transdutores 1 e 2 são posicionados verticalmente na placa de base da amostra de ligação, ambos equipamentos possuem curso de 25 mm e três casas decimais de precisão. O espaçamento entre esses transdutores é medido para cada amostra ensaiada, sendo assim é possível obter uma relação entre os deslocamentos lineares e a rotação da placa de base.

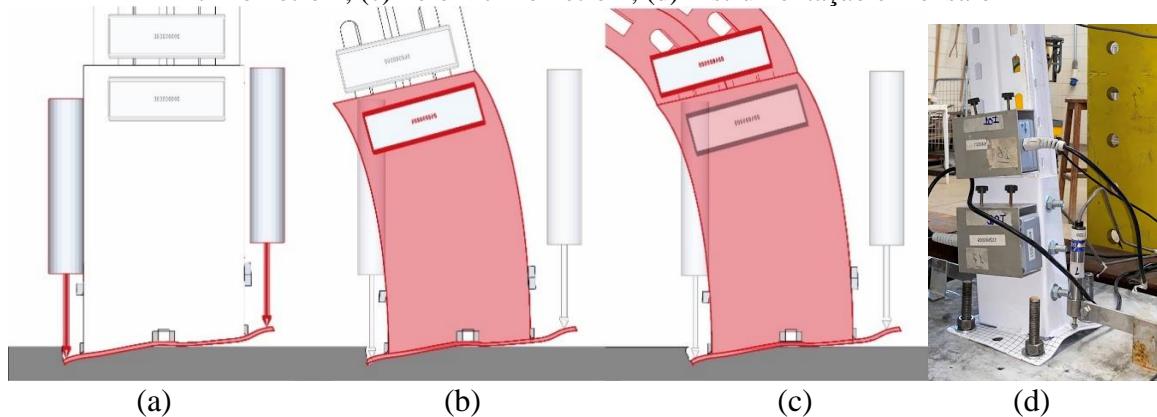
Observa-se pela Figura 4-5 que o presente modelo alternativo de ensaio propõe, além dos transdutores 1 e 2, também o aparelhamento da amostra de ligação com dois inclinômetros.

Essa estratégia foi pensada a fim de mensurar as diferentes rotações descritas no trabalho de Gilbert e Rasmussen (2011), as quais serão brevemente retomadas.

Inserido no cenário das investigações sobre o comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes, o estudo experimental de Gilbert e Rasmussen (2011) descreve a rotação dessa ligação pela composição de 4 parcelas, conforme ilustrado na Figura 3-4, as quais são: (i) rotação por deformação do piso de concreto, (ii) rotação por flexão do *bracket*, (iii) rotação e deformações locais da coluna e (iv) rotação da placa de base por formação de rótulas plásticas.

Diante do exposto, a Figura 4-6 ilustra as rotações aferidas por cada equipamento de medição. Além disso, na Figura 4-6 (d) é possível observar a disposição dos equipamentos de medição em ensaio. Sendo assim, conforme Figura 4-6 (a), os transdutores de deslocamentos 1 e 2 mensuram as rotações por deformações no bloco de concreto e formação de rótulas plásticas na placa de base. Já o inclinômetro 2, Figura 4-6 (b), afere as mesmas rotações dos transdutores 1 e 2, acrescido da flexão no *bracket*. Por fim, o inclinômetro 1, Figura 4-6 (c), mede a rotação de todo o arranjo estrutural de base, visto que aborda todos os comportamentos descrito por Gilbert e Rasmussen (2011). Faz-se relevante mencionar que o inclinômetro 1 foi posicionado imediatamente acima do *bracket* da ligação de base, conforme especificação da AS 4084:2012, ilustrada na Figura 3-14.

Figura 4-6 – Parcelas da rotação da ligação de base aferida (a) Pelos transdutores 1 e 2, (b) Pelo inclinômetro 1, (c) Pelo inclinômetro 2, (d) Instrumentação em ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, observa-se na Figura 4-2 que alguns aparelhos experimentais foram projetados para o modelo alternativo de ensaio, os quais estão sinalizados em azul itálico. Tais equipamentos foram concebidos a fim de obter o esquema de forças e deslocamentos idealizado na Figura 4-3 e visando também solucionar as complexidades típicas do programa experimental de ligações de base de porta-paletes. Sendo assim, os itens subsequentes detalham os aparelhos projetados para atender o presente estudo experimental.

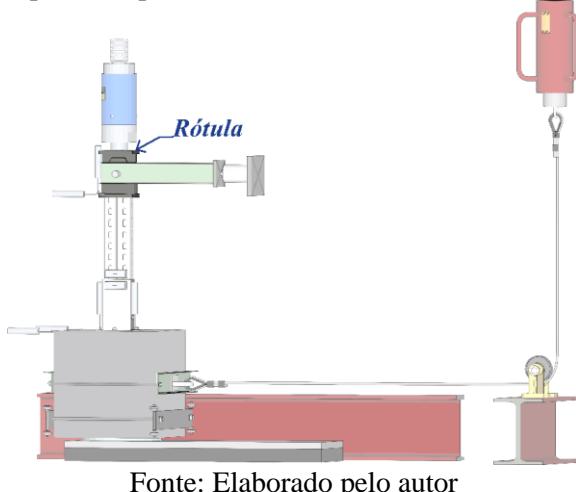
## 4.2 APARATOS EXPERIMENTAIS

O modelo alternativo de ensaio ilustrado na Figura 4-2 foi concebido levando em conta os objetivos do presente estudo experimental e as limitações dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE). Nesse contexto, foi observado a necessidade de se projetar aparatos experimentais específicos para a presente campanha experimental. Assim sendo, os subitens em sequência descrevem os equipamentos experimentais projetados para o presente estudo.

### 4.2.1 Rótula

No modelo de ensaio projetado no presente estudo, observa-se que a coluna porta-palete, submetida a compressão constante  $F_1$ , apresenta seu topo conectado a um aparato descrito como ‘rótula’. Este aparato experimental garante a condição de contorno idealizada para o topo da coluna na Figura 4-3, i.e., livre rotação e translação vertical impedida, como um apoio de primeiro gênero. Nesse cenário foi projetado o aparato destacado na Figura 4-7.

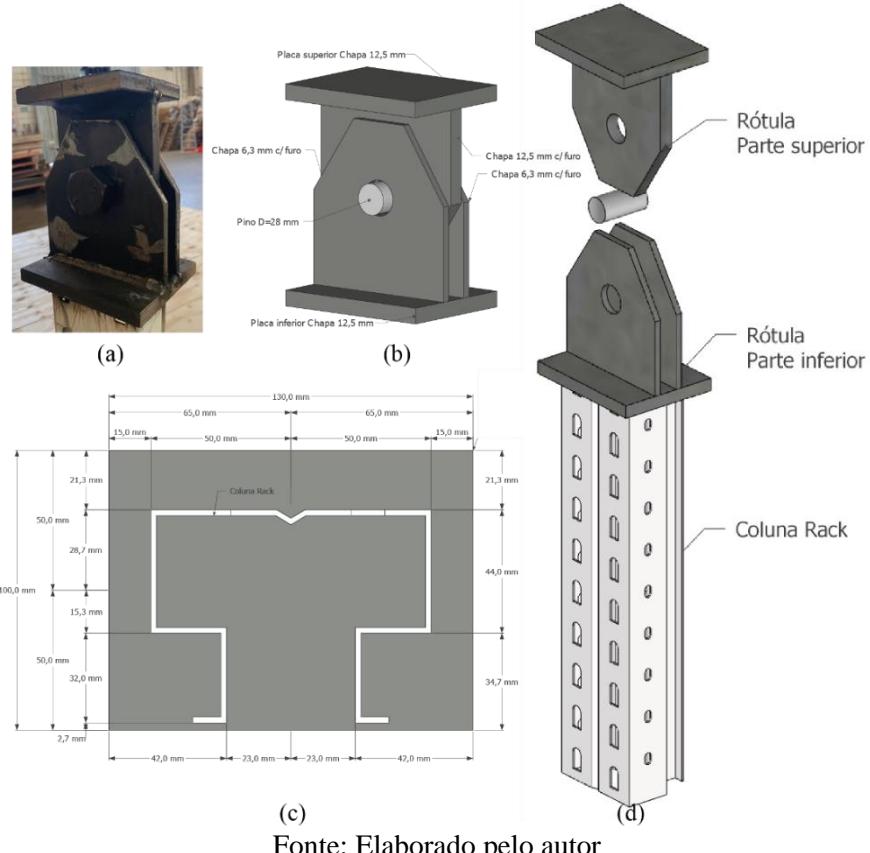
Figura 4-7 – Aparato experimental Rótula no modelo alternativo de ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se pela Figura 4-7 que o sistema rotulado possui interface direta com o cilindro hidráulico (Macaco nº1) e, consequentemente, transfere o esforço axial  $F_1$  à amostra de coluna rack. Sendo assim, as espessuras das chapas componentes da rótula foram devidamente dimensionadas a fim de resistir aos esforços de compressão  $F_1$  previstos para ensaio. Nesse sentido a perspectiva ilustrada na Figura 4-8 detalha a espessura adotada para cada chapa componente da rótula e o diâmetro do pino que une as partes integrantes do aparato.

Figura 4-8 – Aparato experimental - Rótula (a) Modelo real, (b) Vista em perspectiva, (c) Localização da coluna na placa inferior, (d) Perspectiva do arranjo experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

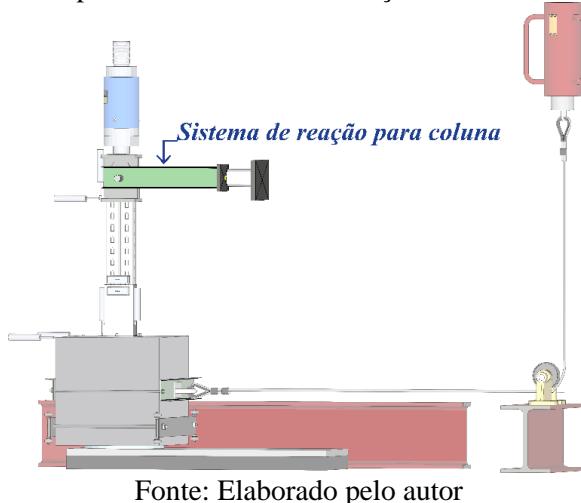
As chapas componentes da parte superior e inferior da rótula (Figura 4-8 (d)) são conectadas por cordões de soldas de arco elétrico com eletrodo revestido. Além disso, a coluna rack foi soldada junto a parte inferior da rótula por meio de cordões de solda de arco elétrico com proteção gasosa (MIG/MAG). Verificado a resistência aos esforços atuantes, a diferença nos metais de adição das soldas se justifica pela diferença de espessura dos componentes base.

A geometria da rótula foi concebida a fim de garantir a livre rotação relativa entre as chapas que a compõem. Além disso, para atestar a atuação de  $F1$  no centro geométrico da coluna rack, a amostra foi posicionada de forma a alinhar seu centro geométrico ao centro geométrico da placa inferior, conforme esquematizado na Figura 4-8 (c). Por fim, a Figura 4-8 (a) ilustra a amostra de rótula projetada para o presente estudo experimental.

#### 4.2.2 Sistema de reação para coluna

Dando sequência no detalhamento dos aparelhos experimentais, de conhecimento do sistema estático da Figura 4-3, observa-se a necessidade de restringir as translações horizontais do topo do arranjo estrutural de base ensaiado. Para tanto, o modelo alternativo de ensaio do presente trabalho concebeu um sistema de reação, o qual é destacado na Figura 4-9.

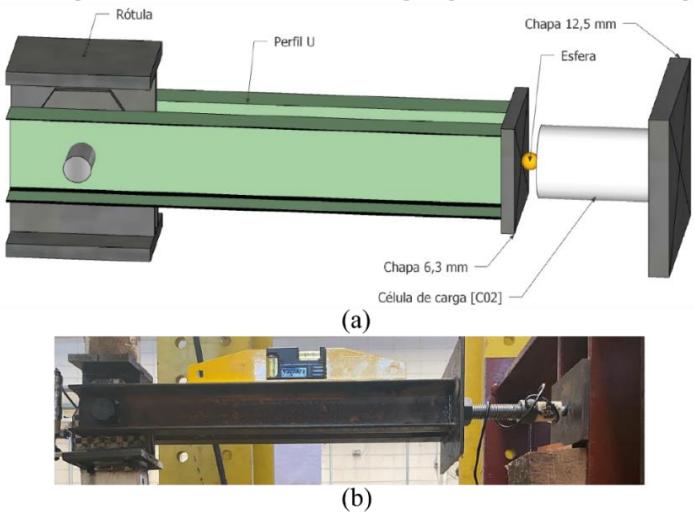
Figura 4-9 – Aparato experimental Sistema de reação no modelo alternativo de ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse âmbito, conforme ilustrado na Figura 4-9 e detalhado na Figura 4-10, o aparato horizontal conectado à rótula, ao passo que é simplesmente apoiado no pórtico de reação, confere a restrição às translações horizontais do topo da amostra de coluna. Nesse sentido, como ilustrado na Figura 4-10 (a), o par de perfis U laminados são soldados à uma chapa por cordões de soldas de arco elétrico com eletrodo revestido.

Figura 4-10 – Aparato experimental – Sistema de reação para coluna (a) Perspectiva, (b) Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

De conhecimento da relevância em se aferir o esforço  $F2$  em ensaio, foi observado a necessidade de se instalar uma célula de carga conectada ao conjunto de reação horizontal, a qual é denominada ‘C02’. A célula ‘C02’ afere apenas esforços axiais ao seu eixo longitudinal. Por isso, conforme ilustrado na Figura 4-10 (a), utilizou-se uma esfera rígida para conectar o conjunto de reação ao aparato de medição. Dessa forma, se garante que ‘C02’ não é exposta a eventuais esforços de flexo-compressão, condição que invalida suas medições.

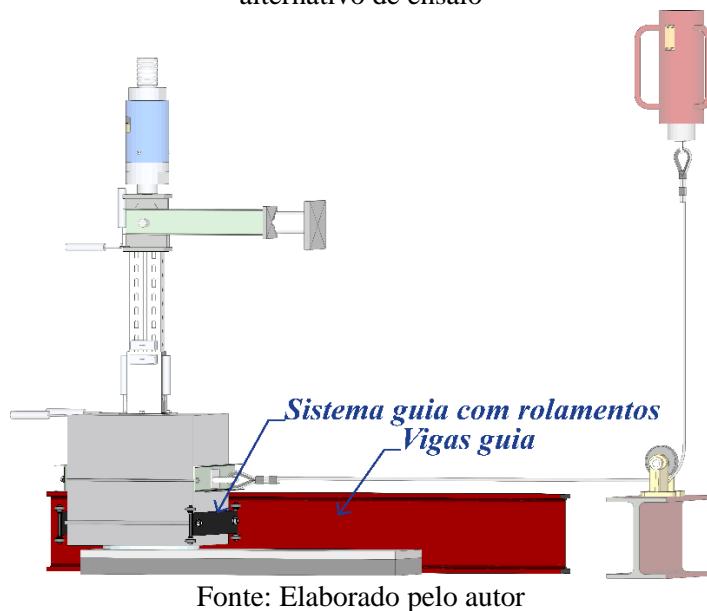
Ainda no âmbito das medições de  $F_2$  pela célula ‘C02’, conforme discutido no presente capítulo, um dos pontos críticos ao programa experimental são eventuais deslocamentos que alteram o equilíbrio estrutural estabelecido no início do ensaio. Para tanto, além do emprego de uma esfera rígida entre as peças, a retilineidade entre os arranjos experimentais foi monitorada em ensaio através de um equipamento de nível com bolha, conforme Figura 4-10 (b). Assim sendo, notam-se os esforços empregados para garantir a confiabilidade das medições de ‘C02’ ao longo do experimento.

#### 4.2.3 Sistema guia com rolamentos e Vigas guia

Conforme apontado em itens anteriores do presente trabalho, um dos pontos críticos para o bom funcionamento do modelo de ensaio é a garantia das condições de contorno do bloco. Nesse sentido, o bloco de concreto deve se deslocar livremente na direção de aplicação de  $F_2$ .

Todavia, em função de comportamentos mecânicos típicos do arranjo estrutural ensaiado e do modelo de ensaio, a translação idealizada, não raras as vezes, ocorre concomitante à rotação do bloco em torno do seu eixo vertical, efeito considerado parasita no programa experimental de ligações de base de porta-paletes. Nesse cenário, a fim de impedir comportamentos indesejados em ensaio, foi projetado o sistema guia com rolamentos e vigas guia, os quais estão destacados na Figura 4-11.

Figura 4-11 – Aparato experimental Sistema guia com rolamentos e Vigas guia no modelo alternativo de ensaio



A Figura 4-12 ilustra detalhes do aparato experimental fixado entorno da amostra de bloco de concreto. Nesse âmbito, observa-se que o sistema guia é composto por 8 rolamentos

(Figura 4-12 (c)), os quais são caracterizados pelo seu giro sem gerar atritos significativos ou deslizamento entre as peças.

As vigas guias são fixadas nas canaletas de reação e o aparato experimental funciona através do contato entre os rolamentos e a alma das vigas guias, conforme observado na Figura 4-12 (d). Nesse contexto, fica evidente que o conjunto de dispositivos guias atua ao limitar o movimento do arranjo experimental, restringindo-o essencialmente à translação horizontal.

Figura 4-12 – Aparato experimental – Sistema guia com rolamentos (a) Perspectiva, (b) Amostra, (c) Rolamento, (d) Interface viga guia e rolamento



Fonte: Elaborado pelo autor

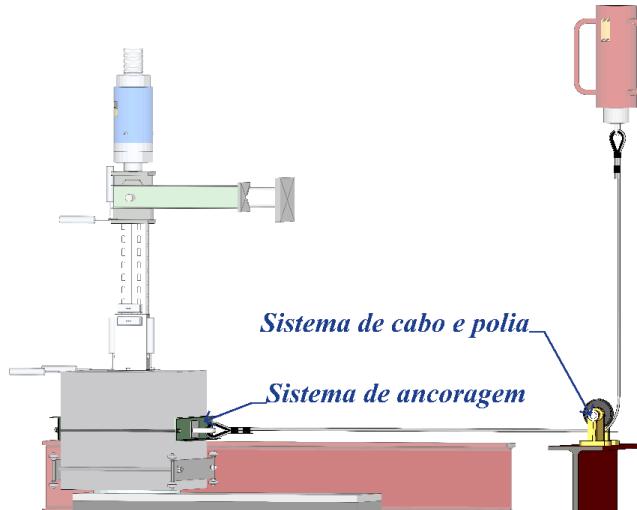
Por fim, é compreensível que, devido à função de evitar a rotação do bloco de concreto em torno do eixo vertical, os dispositivos guias não estão sujeitos a esforços mecânicos significativos. Assim, a seleção das peças que o compõem foi feita considerando exclusivamente a geometria e a minimização de possíveis atritos entre os aparelhos.

#### 4.2.4 Sistema de ancoragem do bloco e Sistema de cabo e polia

No intuito de atender a recomendação referente ao controle da aplicação da força  $F_2$  por taxa de deslocamento do pistão atuador, foi necessário desenvolver um dispositivo que permitisse a utilização do equipamento servo-hidráulico. Este equipamento foi originalmente projetado para operar exclusivamente na posição vertical e, por essa razão, os aparelhos destacados na Figura 4-13 foram necessários.

Diante dos aparatos experimentais projetados, observa-se que o conjunto polia, cabo e sistema de ancoragem atuam puxando a amostra de bloco de concreto e, consequentemente, aplicando a força  $F_2$  no arranjo estrutural de base ensaiado.

Figura 4-13 – Aparato experimental Sistema guia com rolamentos e Vigas guia no modelo alternativo de ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse cenário, para não expor o bloco de concreto à tração, o sistema de ancoragem foi projetado para se fixar em faces paralelas do bloco, i.e., confinando a amostra entre dois perfis. Além disso, o sistema de ancoragem possui um gancho fixado no centro da face do perfil que o compõe, conectando-se ao sistema de cabo e polia através desse gancho.

Um dos pontos críticos ao programa experimental de ligações de base de porta-paletes seletivos é garantir a atuação de  $F_2$  no centro geométrico do bloco, condição que eleva a complexidade dos programas experimentais, conforme observado na Figura 4-1. Nesse âmbito, o presente trabalho tomou o cuidado de alinhar o centro geométrico da face do bloco de concreto com o centro do sistema de ancoragem, para que assim a força  $F_2$  atue corretamente no arranjo experimental.

Além disso, trabalhos da literatura alertam para possíveis atritos entre o atuador do Macaco n°2 e o bloco, efeito que resulta em cisalhamentos no ensaio e, consequentemente, na amplificação da tendência de rotação do bloco em torno do seu eixo vertical. Sendo assim, da maneira como o sistema de ancoragem do presente trabalho foi projetado, não são observados empecilhos com relação à esforços cisalhantes entre o bloco e o aparato experimental.

O sistema de cabo e polia permite conectar o arranjo estrutural ao atuador servo-hidráulico. O cabo utilizado é composto por fibras de aço e a polia por um eixo ligado a um

mancal de rolamento, o qual garante o giro sem atrito significativo entre as peças da polia. Nesse cenário, o sistema de polia é devidamente fixado nas canaletas de reação da laje.

Faz-se relevante mencionar que todo o aparato experimental foi verificado quanto a sua resistência mecânica aos esforços previstos para ensaio. Além disso, sua geometria foi cuidadosamente projetada para que o eixo do cabo se mantenha alinhado ao centro do sistema de ancoragem. A partir de tal estratégia, é possível garantir a atuação centralizada de  $F_2$  durante todo o ensaio e, consequentemente, reduzir eventuais rotações indesejadas do bloco de concreto em torno do seu eixo vertical. Por fim, a Figura 4-14 ilustra o sistema de ancoragem e o sistema de cabo e polia utilizados no presente programa experimental.

Figura 4-14 – Aparato experimental – Sistema de ancoragem do bloco e Sistema de cabo e polia



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.5 Sistema de deslizamento

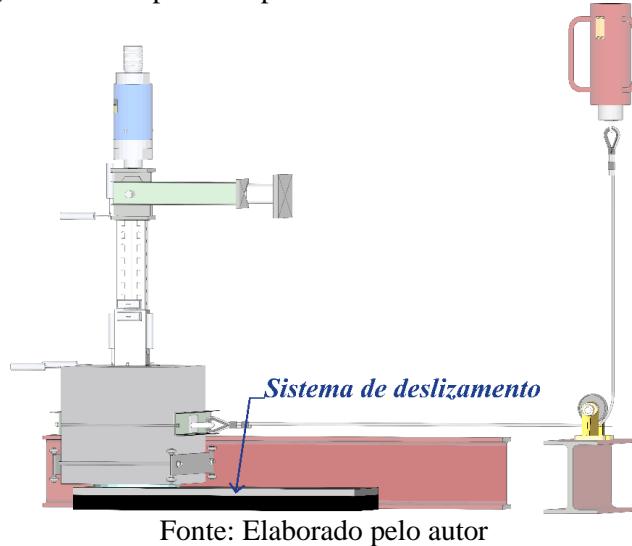
Similar ao modelo alternativo de ensaio proposto no presente estudo, Firouzianhaj *et al.* (2022) também propuseram um modelo experimental no qual os arranjos estruturais são posicionados na vertical, i.e., perpendiculares à laje de reação. Nesse cenário, Firouzianhaj *et al.* (2022) enfatizam os esforços necessários em se evitar interferências decorrentes das forças de atrito entre o bloco e a laje de reação do ensaio.

O efeito indesejado do atrito nos resultados dos programas experimentais de ligações de base de porta-paletes já foi alvo de alertas de outros trabalhos da literatura - e.g. Baldassino e Zandonini (2011), Zhao *et al.* (2019) e Gilbert e Rasmussen (2011) -, bem como também mencionado nas recomendações da norma australiana. Todavia, compreende-se ser um ponto

ainda mais crítico para modelos de ensaio em que o plano de interface entre bloco e laje de reação se encontra ortogonal aos esforços axiais de compressão ( $F_1$ ).

Nesse âmbito, o presente estudo projetou o sistema de deslizamento identificado na Figura 4-15 como estratégia para reduzir o atrito entre o bloco de concreto e o seu contorno. Sendo assim, o sistema de deslizamento é composto por chapas de aço devidamente polidas e retificadas, as quais são apoiadas na laje de reação.

Figura 4-15 – Aparato experimental Sistema de deslizamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que, mesmo após o processo de polimento e retificação, a interface entre a chapa de aço e o bloco de concreto (tipicamente poroso) pode apresentar atritos significativos para o ensaio. Diante disso, foi concebido um dispositivo para deslizamento, o qual faz a interface entre o bloco e a chapa de aço, ilustrado na Figura 4-16.

Figura 4-16 – Aparato experimental – Componentes do sistema de deslizamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Faz-se relevante mencionar que a geometria côncica do dispositivo de encaixe no bloco de concreto foi pensada a fim de facilitar a concretagem e posterior retirada do molde,

procedimento necessário para deixar o vazio no bloco de concreto que viabiliza o seu encaixe no dispositivo de deslizamento. Maiores detalhes sobre o encaixe do dispositivo no bloco de concreto serão apresentados no item 4.3.2, tópico destinado à descrição da amostra.

Na concepção do dispositivo de deslizamento ilustrado na Figura 4-16, procurou-se adotar um material de baixo coeficiente de atrito. Além disso, também foi necessário escolher um material que resistisse aos esforços atuantes no aparato, i.e., à força de compressão. Diante de tais exigências, foi adotado um dispositivo composto por PEAD (polietileno de alta densidade), material que é tipicamente caracterizado por baixo coeficiente de atrito e boa resistência mecânica. Segundo dados do fabricante, o coeficiente de atrito do PEAD, quando em contato com aços retificados e polidos, é igual a 0,29, enquanto sua tensão de ruptura à compressão é de 20 MPa. Além disso, a fim de garantir a baixa interferência do atrito entre os aparelhos experimentais, a interface entre a chapa de aço e a placa de PEAD foi lubrificada com graxa.

## 4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Prosseguindo com os detalhes pertinente do programa experimental, a seção 4.3 reúne os principais dados referentes aos materiais utilizados no estudo. Além da descrição dos materiais, também serão apresentados os principais resultados experimentais atrelados às escolhas das amostras, os quais delinearam parâmetros importantes para a análise experimental das ligações de base de colunas porta-paletes.

### 4.3.1 Arranjo estrutural de base

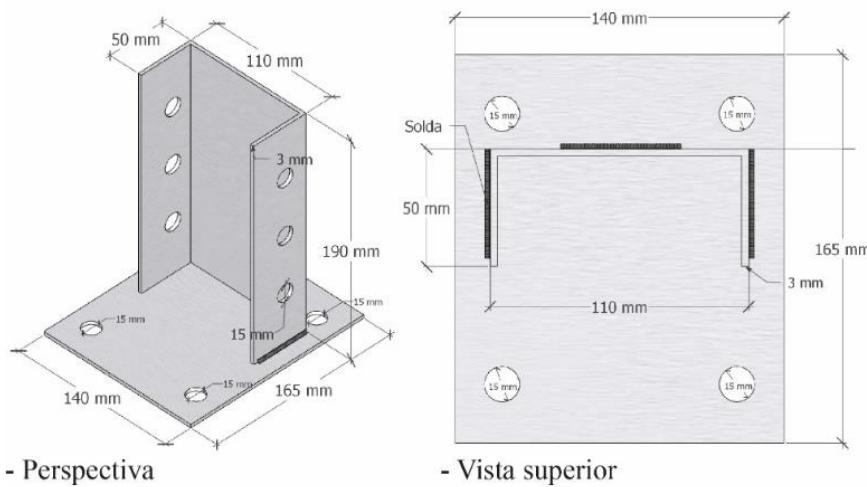
Os arranjos estruturais de base, compostos pela ligação de base parafusada na coluna porta-paleta, utilizados na presente campanha experimental, foram doados pela empresa NSF Tecnologia em Instalações Comerciais.

Nesse âmbito, a Figura 4-17 ilustra os modelos de ligações de base utilizados no presente estudo, os quais serão identificados como modelo de ligação Tipo 1 (T1) e Tipo 2 (T2), apresentados na Figura 4-17 (a) e Figura 4-17 (b), respectivamente.

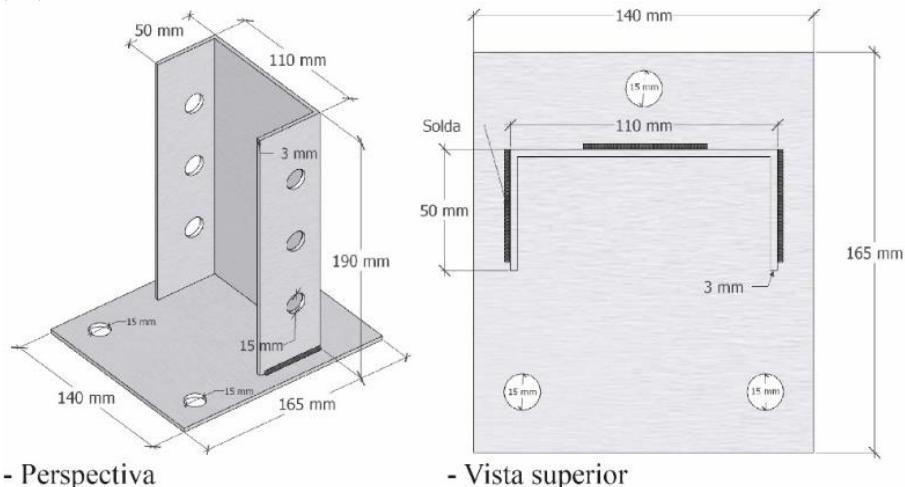
As amostras T2 apresentam 3 parafusos de ancoragem em sua placa de base, esse modelo representa a ligação usualmente comercializada pela empresa fornecedora. Na vista superior da Figura 4-17 (b), nota-se que, na disposição prevista para a ancoragem da ligação Tipo 2, um dos parafusos é posicionado no eixo de flexão do arranjo estrutural de base. Nesse cenário, é possível observar um aproveitamento estrutural ineficiente da ancoragem, uma vez que um parafuso é posicionado na linha neutra dos esforços fletores.

Figura 4-17 – Ligação de base (a) Modelo Tipo 1, (b) Modelo Tipo 2

**(a) TIPO 1 (T1)**



**(b) TIPO 2 (T2)**



Fonte: Elaborado pelo autor

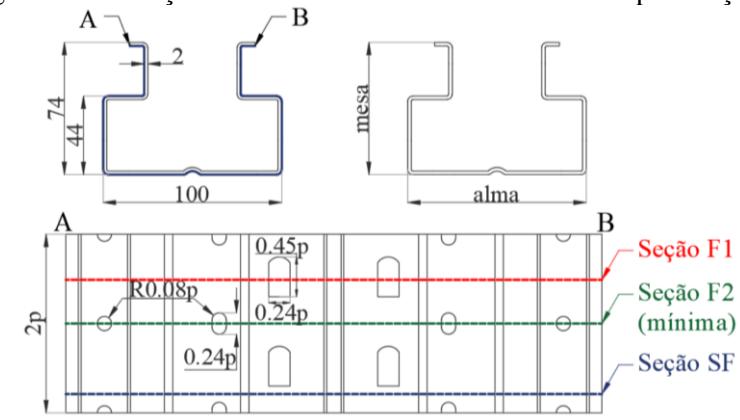
Diante do exposto, o presente trabalho propôs o modelo de ligação de base do Tipo 1, o qual apresenta a configuração de ancoragem diferente do modelo comercial. Sendo assim, a amostra T1, ilustrada na Figura 4-17 (a), possui 4 parafusos de ancoragem na sua placa de base e representa o arranjo estrutural padrão a ser analisado na presente campanha experimental.

De acordo com as conclusões do estudo de Firouzianhaij *et al.* (2022), espera-se que a variação na disposição de ancoragem das ligações de base tenha um impacto significativo no

comportamento mecânico do elemento estrutural. Isso ocorre devido à modificação no número de parafusos que constituem o braço de alavanca mobilizado pelos esforços fletores na ligação de base. Portanto, a partir do modelo de ligação de base proposto no presente trabalho - Tipo 1 - será possível fazer uma análise comparativa da influência das formas de ancoragem no comportamento mecânico das ligações de base de colunas porta-palete.

Ainda no âmbito do arranjo estrutural de base, a Figura 4-18 apresenta a seção transversal da coluna utilizada na análise experimental do presente estudo. Além disso, observa-se pela Figura 4-18 o padrão de perfurações da coluna porta-palete, o qual exibe 3 seções transversais distintas, sendo essas identificadas como ‘Seção F1’, ‘Seção F2’ e ‘Seção SF’.

Figura 4-18 – Seção transversal da coluna e detalhes das perfurações



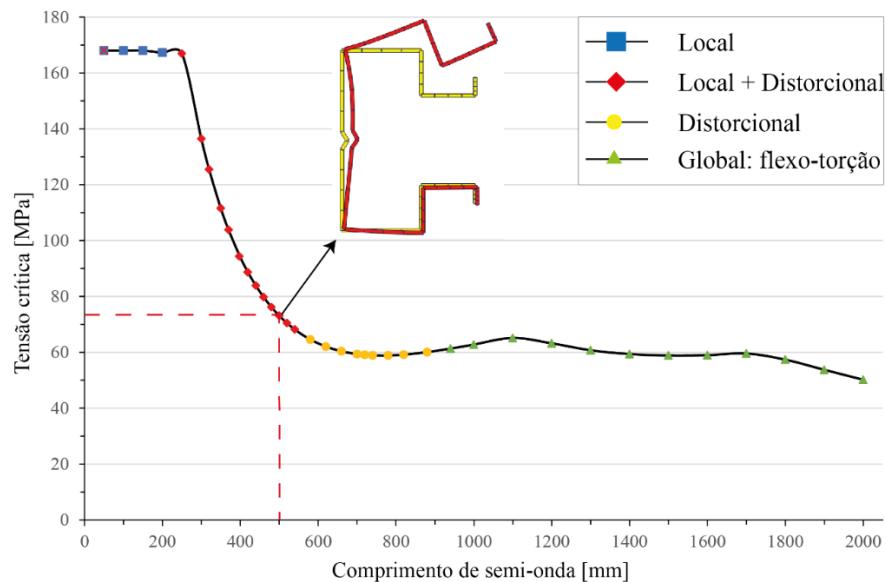
Fonte: Branquinho (2021)

A norma australiana e europeia, AS 4084:2012 e EN 15512:2009, respectivamente, especificam que o comprimento da amostra de coluna rack deve ser suficientemente curto para evitar instabilidades globais, todavia, suficientemente longo para minimizar os efeitos cortantes nas extremidades da peça. Nesse âmbito, de forma similar, as normas internacionais recomendam que o comprimento da coluna ensaiada seja de no mínimo 4 vezes o comprimento da alma da seção transversal do elemento, i.e., para o presente trabalho, um comprimento mínimo de 400 mm, conforme Figura 4-18. Além disso, considerando o foco do estudo em determinar a rigidez rotacional e comportamento da ligação de base, Baldassino e Zandonini (2008) destacam que o comprimento da amostra de coluna deve ser definido de maneira a evitar instabilidades prematuras no arranjo estrutural de base ensaiado.

À vista do exposto, no intuito de investigar os modos de instabilidades característicos da amostra de seção rack ilustrada na Figura 4-18, foi realizado uma análise de estabilidade elástica com base no método das faixas finitas (MFF) por meio do software CUFSM. Na análise em faixas finitas, foi adotado uma extremidade simplesmente apoiada e a outra engastada, com

a seção exposta à flexo-compressão, simplificação que procura simular as condições de ensaio. Sendo assim, a Figura 4-19 ilustra os resultados da análise de estabilidade.

Figura 4-19 – Análise de estabilidade elástica da coluna sem perfuração



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que o modelo em faixas finitas desconsidera o padrão de perfurações, i.e., representa o estudo da seção SF identificada na Figura 4-18. Conforme as conclusões do trabalho de Baldassino e Bernuzzi (2000), a redução na área resistente da seção rack pelo padrão de perfurações não interfere significativamente nos modos de instabilidade do elemento, o que torna a análise em faixas finitas uma boa forma de estimar o comportamento da coluna porta-palete em termos de estabilidade.

Nesse âmbito, Branquinho (2021), a fim de investigar os modos de instabilidade característicos da seção transversal ilustrada na Figura 4-18, analisou experimentalmente 12 amostras de colunas porta-paletes sob compressão centrada e extremidades engastadas. A autora conclui que os elementos com comprimento de 300 mm falham por modo de instabilidade local e capacidade resistente média de 163,34 kN, já as amostras de 600 mm demonstraram a interação entre os modos de falha local e distorcional com capacidade resistente média de 153,34 kN.

Diante do exposto, em concordância com o estudo de Baldassino e Bernuzzi (2000), observa-se a similaridade entre os modos de instabilidade obtidos na análise em MFF e os descritos na campanha experimental de Branquinho (2021). Por conseguinte, ponderando as recomendações normativas e da literatura, optou-se por prosseguir o programa experimental utilizando amostras de coluna porta-paletes com 500 mm de comprimento. No gráfico da Figura

4-19 é destacado o comprimento de semi-onda de 500 mm, o qual apresenta a interação entre os modos de instabilidade locais e distorcionais.

#### 4.3.2 Bloco de concreto

O programa experimental de ligações de base de porta-paletes seletivos prevê o uso de uma amostra de bloco de fundação, o qual deve simular a reação promovida pelo piso em que o rack é instalado. Nesse sentido, de conhecimento do impacto direto que o piso promove na rigidez rotacional da ligação, é conveniente que o material do bloco seja de concreto, visto sua grande aplicabilidade para pisos de galpões de armazenamento.

Portanto, para definição da amostra de bloco de concreto, algumas recomendações normativas foram seguidas. Em resumo, a EN 15512:2009 e AS 4084:2012 definem a resistência mínima do concreto de 20/25 MPa e para a geometria do bloco essas normas estipulam uma folga mínima de 50 mm ao redor de toda a placa de base. Já a ANSI/RMI MH16-1:2021 define uma resistência mínima de 26,6 MPa e especifica que as dimensões mínimas do bloco e a distância mínima entre face do bloco e borda da placa de base sejam de 30,5 cm e 16,5 cm, respectivamente. Além disso, é consenso entre as normas que a amostra deve exibir fases paralelas. Portanto, com relação à geometria do bloco, definiu-se uma amostra cúbica de 400x400x400mm.

O histórico de programas experimentais de ligações de base de porta-paletes, e.g. Baldassino e Zandonini (2011) e Firouzianhaij *et al.* (2022), não identificaram danificações estruturais nas amostras de bloco de concreto utilizadas nos ensaios. Visto isso, o presente estudo decidiu por reutilizar as amostras de bloco de concreto nos ensaios dos respectivos modelos de ligações avaliados.

Em sequência, foi desenvolvido um traço de concreto de 35 MPa, por meio do Método IPT-EPUSP, utilizando o diagrama de dosagem empregado em estudos experimentais desenvolvidos no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP. O estudo de dosagem do LMCC, avaliou concretos constituído por cimento Portland composto com escória (CPII E32), areia média e dois tipos de agregados graúdos. Nesse cenário, um teor ideal de argamassa seca para o estudo de dosagem utilizado é de 53%. Faz-se relevante mencionar que o agregado utilizado no presente estudo foi brita 1 de 19 mm.

Diante do exposto, obteve-se o traço 1:1,15:1,55:0,41 com consumo de 569 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Sendo assim, duas amostras de bloco de 400x400x400 mm foram concretadas, sendo uma para cada tipo de ligação de base ilustrada na Figura 4-17. A Tabela 4-2 expõe o controle tecnológico feito para cada concretagem, sendo que as amostras identificadas como “B1” e “B2”, foram usadas para os ensaios dos arranjos estruturais de base T1 e T2, respectivamente.

Os ensaios e modelagens dos corpos de prova de concreto atendem as especificações da ABNT NBR 5739:2018 "Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos". Portanto, conforme recomendações dessa norma, a Tabela 4-2 também consta com a avaliação estatística de desempenho do ensaio de resistência à compressão.

Tabela 4-2 – Controle tecnológico do concreto

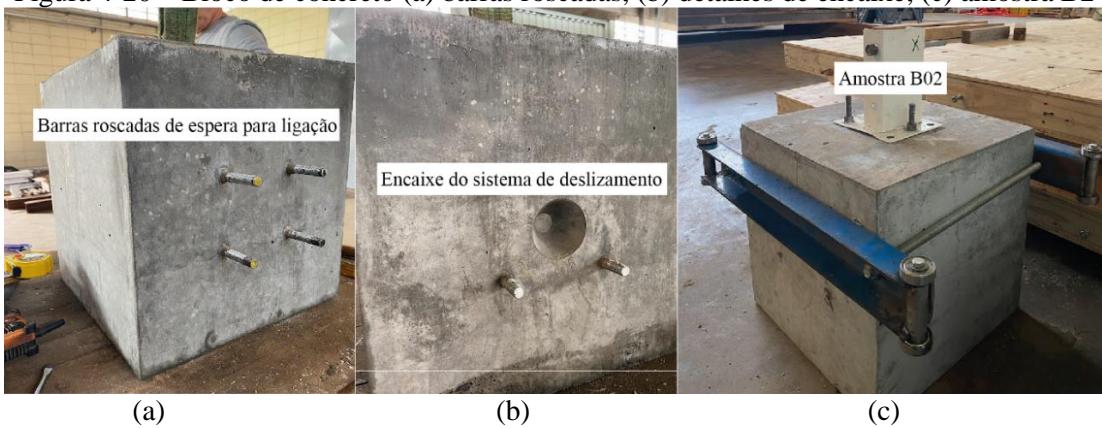
AMOSTRA	DIAS	RESIST. MECÂNICA MÉDIA [MPa]	COEF. DE VARIAÇÃO [%]	NÍVEL
<b>B1</b>	28	38,52	1,66	1 (Excelente)
<b>B2</b>	28	45,26	1,88	1 (Excelente)

Fonte: Elaborado pelo autor

Continuando a descrição das amostras de bloco de concreto utilizadas no presente estudo, é crucial destacar que, embora o aparato de ancoragem assegure que o bloco não seja exposto a esforços de tração, é importante considerar a presença dos esforços de compressão atuantes no ensaio. Para tanto, considerando a magnitude dos esforços previstos para ensaio e o espraiamento das tensões similar às sapatas rígidas isoladas, foram dimensionadas armaduras principais e de fendilhamento para o bloco de concreto conforme especificações da ABNT NBR 6118:2014 "Projeto de estruturas de concreto - Procedimento".

Por fim, também foram previstos o posicionamento de barras roscadas na amostra de bloco de concreto, a fim de facilitar o encaixe dos respectivos modelos de ligação de base. Portanto, comprehende-se que a amostra “B1” foi concretada com 4 esperas de barras roscadas, já a amostra “B2” com apenas 3 barras roscadas. A Figura 4-20 ilustra detalhes do bloco de concreto, sendo que as esperas que recebem a amostra de ligação de base são identificadas na Figura 4-20 (a). Já na Figura 4-20 (b) é ilustrado o orifício de encaixe do Sistema de deslizamento (descrito no tópico 4.2.5).

Figura 4-20 – Bloco de concreto (a) barras roscadas, (b) detalhes de encaixe, (c) amostra B2



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3.3 Graxa de Lítio e Grafite

Conforme mencionado em seções anteriores do presente trabalho, um aspecto crucial para o modelo alternativo de ensaio desenvolvido diz respeito ao atrito gerado entre os aparelhos experimentais. Por esse motivo, além dos esforços empregados em conceber o sistema de deslizamento detalhado no item 4.2.5, o presente trabalho também procurou estratégias para a lubrificação adequada das superfícies e peças.

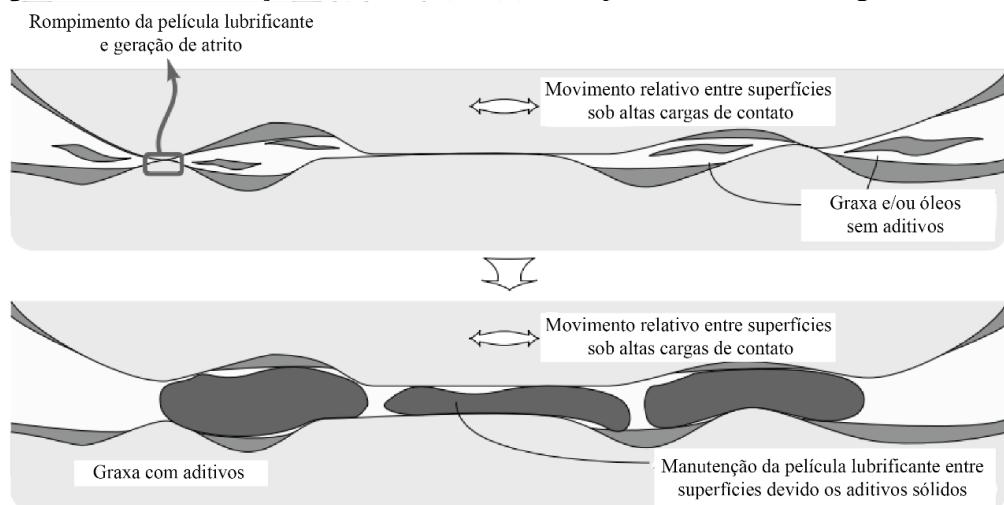
Stachowiak e Batchelor (2014) explicam que o regime de lubrificação de um óleo é uma função não linear proporcional à viscosidade e à velocidade do lubrificante, todavia, inversamente proporcional à carga de contato entre as superfícies. Nesse cenário, os autores apontam para a eventual ineficácia de óleos e graxas convencionais na lubrificação de superfícies sob elevadas pressões de contato.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), superfícies submetidas a condições extremas de pressão mecânica podem provocar a quebra da película do material lubrificante, fazendo com que o mesmo perca sua função de reduzir o atrito e o desgaste entre as partes. Nesse cenário, os autores apontam para eficácia em se empregar aditivos sólidos à composição do lubrificante, e.g. grafite, o qual confere maior estabilidade e resistência mecânica. A Figura 4-21 ilustra o fenômeno descrito.

Os apontamentos de Stachowiak e Batchelor (2014) podem ser observados nos resultados experimentais de Gomes (2021), o qual, dentre outras análises, avaliou o desempenho mecânico de graxas de lítio e cálcio, ambas sem aditivos. Gomes (2021) conclui que, apesar do melhor desempenho da graxa de lítio, ambos os materiais apresentam quedas

significativas em suas propriedades lubrificantes quando expostos a altas pressões de contato, cerca de 0,31 MPa.

**Figura 4-21 – Lubrificação com e sem aditivos de superfícies sob altas cargas de contato**



Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2014)

Diante do exposto, conforme recomendações da literatura, o presente estudo optou pelo uso de graxa de lítio com aditivos sólidos para lubrificação dos aparelhos experimentais. Tal estratégia foi adotada principalmente com o objetivo de reduzir o atrito entre as peças do sistema de deslizamento (ilustrado na Figura 4-16), que são expostas a tensões em torno de 1,5 MPa entre a chapa de aço e o dispositivo de PEAD.

Nesse âmbito, os estudos experimentais de Antony *et al.* (1994) e Nagare e Kudal (2018) avaliaram as propriedades mecânicas de graxas de lítio compostas por diferentes porcentagens de grafite como aditivo sólido. Nagare e Kudal (2018) apontam que a porcentagem ótima de grafite por graxa de lítio é de 5%, valor que concorda com as conclusões das análises de Antony *et al.* (1994), os quais demonstram uma faixa ótima de aditivo entre 2% e 8%.

Portanto, para a devida lubrificação, principalmente das regiões expostas a altas pressões mecânicas, o presente programa experimental utilizou graxa de lítio com adição de 5% de grafite, composição que, segundo resultados de Nagare e Kudal (2018), atende as exigências do presente estudo experimental. Por fim, para a produção da graxa de lítio com aditivo sólido, foram seguidas as recomendações de preparo e manuseio especificadas no trabalho de Stachowiak e Batchelor (2014).

#### 4.4 GRUPOS DE AMOSTRAS

As análises experimentais e a representatividade dos dados obtidos em ensaio são diretamente influenciadas pela escolha dos parâmetros que irão definir os grupos de amostra ensaiados. Nesse âmbito, para o presente programa experimental de ligações de base de porta-paletes seletivos, os grupos de amostras são definidos pela disposição dos parafusos de ancoragem (Figura 4-17) e pelos valores de força axial de compressão  $F1$  na amostra de coluna porta-paleta.

Neste contexto, Baldassino e Bernuzzi (2000) destacam que a seleção da faixa de forças axiais  $F1$  deve ser cuidadosamente determinada para o estudo de ligações de base de porta-paletes seletivos. Isso requer a consideração não apenas da notável sensibilidade dos resultados experimentais de rigidez rotacional à magnitude de compressão na coluna, mas também da escolha de valores que sejam representativos das condições de carregamento da estrutura porta-paleta seletivo.

No âmbito normativo, de forma similar, as normas internacionais especificam a máxima compressão  $F1$  de ensaio como a máxima carga axial prevista em projeto para a coluna porta-paleta. Além disso, a ANSI/RMI MH16-1:2021 também especifica que a força de compressão mínima em ensaio seja 10% da capacidade resistente da área efetiva da seção rack (Equação (20)).

O programa experimental de ligações de base de porta-paletes presume a exposição do arranjo estrutural à flexo-compressão. Portanto, para estimar a rigidez rotacional do componente e observar seu comportamento mecânico em ensaio, faz-se necessário expor o arranjo estrutural de base à uma faixa de esforços fletores significativa ao longo do experimento. Tal afirmação é pertinente, haja visto seu impacto na definição dos esforços  $F1$ , os quais precisam ser estimados de forma a evitar colapsos prematuros em ensaio, i.e., instabilidades na coluna porta-paleta devido aos esforços de compressão axial.

Inicialmente, o presente estudo determinou a máxima solicitação axial de um porta-paleta seletivo com base nas análises numéricas do trabalho de Branquinho (2021). Nesse sentido, a autora realizou análises numéricas de racks de pequenas e grandes dimensões e, dentre outras hipóteses assumidas, admitiu a ligação de base de comportamento elástico linear conforme proposta analítica de Sarawit e Pekoz (2002), e não linearidade geométrica local e global nas colunas.

Para um rack de grande porte (4 níveis e 12 baias), os resultados de Branquinho (2021) apontam que o máximo carregamento solicitante nas longarinas é de 32,398 kN, o qual resulta em uma compressão de 129,59 kN na coluna porta-paleta mais solicitada da estrutura. Faz-se relevante mencionar que Branquinho (2021) admite colunas com alturas de 1200 cm por nível do porta-paleta.

Portanto, conforme especificações normativas e os resultados numéricos de Branquinho (2021), a força  $F_1$  máxima do presente programa experimental foi determinada inicialmente em 120 kN. Todavia, sob a magnitude de  $F_1$  mencionada, observaram-se instabilidades prematuras na coluna do arranjo estrutural de base, fenômeno que inviabilizou a continuação do ensaio.

Os resultados experimentais de capacidade resistente de colunas sob compressão centrada do estudo de Branquinho (2021) indicam forças superiores ao valor de 120 kN. Portanto, comprehende-se que as diferentes hipóteses de condição de contorno da base admitidas no modelo numérico de Branquinho (2021), em contrapartida às observadas no ensaio do presente trabalho, podem justificar o colapso prematuro do arranjo estrutural de base.

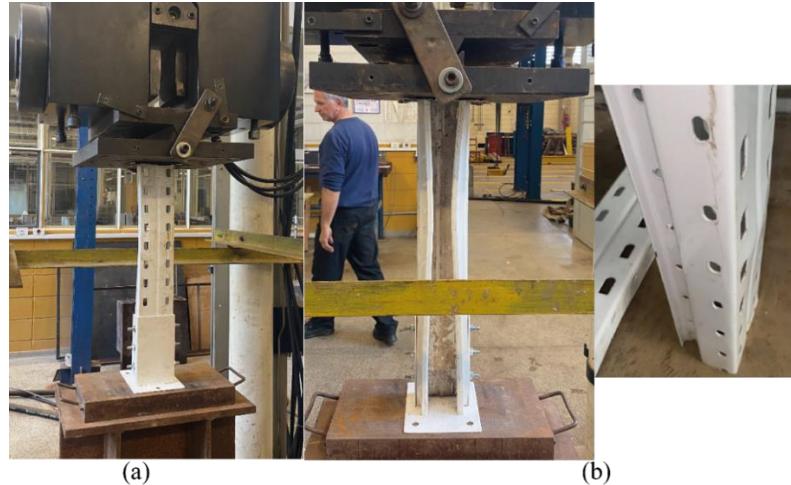
Além disso, Godley (2007) conclui que o método analítico de Sarawit e Pekoz (2002) resulta em previsões de rigidez rotacional elástica elevadas e similares à hipótese de uma ligação engastada, fato também observado por Branquinho (2021), e que corrobora com o comportamento de falha prematuro observado no presente estudo. Diante do exposto, fica evidente a relevância da ligação de base no comportamento da coluna porta-paleta e, consequentemente, na estabilidade da estrutura rack como um todo.

Portanto, devido à escassez de especificações normativas para fundamentar a definição de  $F_1$  e tendo em vista a sua relevância para o programa experimental, foram realizados ensaios de compressão centrada no arranjo estrutural de base. A fim de definir a força resistente do conjunto e guiar o programa experimental de ligações de base, as amostras de coluna foram cortadas no mesmo comprimento definido para o estudo da ligação, i.e., 500 mm.

O ensaio de compressão centrada do arranjo estrutural de base, ilustrado na Figura 4-22 (a), foi realizado no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas. No intuito de garantir que o carregamento seja uniformemente distribuído na coluna, a amostra foi centrada no eixo da máquina servo-controlada e suas extremidades devidamente alinhadas e retilíneas no processo de corte.

Conforme especificações da norma americana de PFF (ANSI/AISI S100), foram ensaiadas 3 amostras do arranjo estrutural de base. Este número mínimo de ensaios é definido sob a condição de que os resultados não desviam mais que 15% entre si.

Figura 4-22 – Arranjo estrutural de base sob compressão centrada (a) ensaio, (b) modos de instabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente, com base nos resultados experimentais de Branquinho (2021), uma força referente a 10% da força última prevista para colunas de 600 mm (153,34 kN) foi aplicada ao arranjo. Este processo de escorvamento foi feito visando garantir o contato entre todos os componentes da amostra, eliminando eventuais folgas. O ensaio foi feito na máquina servo-controlada INSTRON 8506 de capacidade 2500 kN e conduzido por controle de deslocamento a uma taxa de 0,005 mm/s.

A Figura 4-22 (b) mostra os modos de instabilidade tipicamente observados nas 3 amostras ensaiadas, i.e., interação entre o modo distorcional e local, resultado similar à previsão da análise de estabilidade da Figura 4-18. Por fim, a Tabela 4-3 reúne os resultados dos ensaios do arranjo estrutural de base sob compressão centrada e análise estatística dos dados.

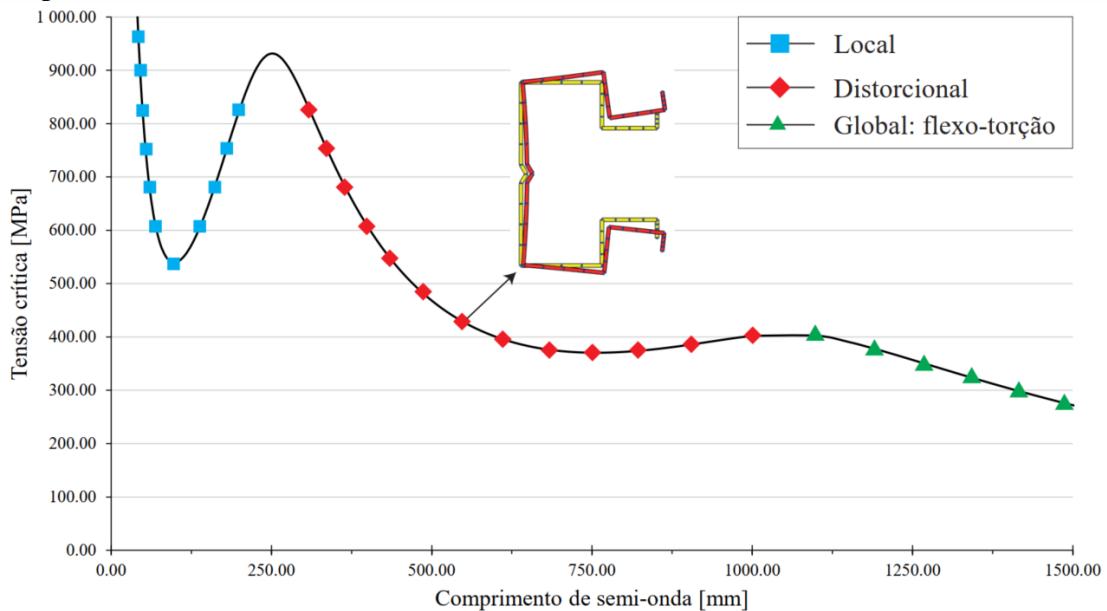
Diante dos resultados observados em ensaio e resumidos na Tabela 4-3, foi determinado que a força  $F_1$  máxima de compressão para o presente programa experimental de ligações de base é de 90 kN. A partir do esforço  $F_1$  máximo adotado, assegura-se que não ocorram eventuais colapsos prematuros no ensaio. Além disso, com base no estudo numérico de Branquinho (2021), é possível afirmar que a faixa de esforços de compressão avaliadas no presente estudo representa adequadamente a magnitude de carregamento de uma estrutura porta-paletes seletivo.

Na Tabela 4-3, também são descritos os modos de falha observados nos ensaios dos arranjos estruturais de base submetidos a compressão centrada. Os modos de falha foram identificados de forma visual quando as amostras perderam a capacidade de resistir aos esforços axiais. Nesse sentido, as observações experimentais corroboram com os modos de falha obtidos através de uma análise de estabilidade elástica da seção transversal da amostra de coluna, a qual é apresentada na nota da Tabela 4-3. A análise numérica foi realizada por meio do *software* CUFSM, e a seção transversal é exposta a compressão centrada e extremidades simplesmente apoiadas.

Tabela 4-3 – Arranjo estrutural de base sob compressão centrada

ENSAIO	F (kN)	MÉDIA (kN)	DESVIO PADRÃO (kN)	C.O.V. (%)	MODO DE FALHA
<b>C01</b>	127,72				Distorcional
<b>C02</b>	118,46	126,34	5,95	4,71%	Distorcional
<b>C03</b>	132,84				Distorcional

Nota: Análise de estabilidade elástica efetuada para coluna sem perfuração sob compressão centrada



Fonte: Elaborado pelo autor

A divisão dos grupos de ensaio e, consequentemente a nomenclatura adotada para as amostras é definida conforme o modelo de ligação de base (Figura 4-17) e a magnitude de força  $F_1$  de ensaio. Portanto, os grupos de amostra são definidos de acordo com o apresentado na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Grupos de ensaio de ligação de base de colunas de porta-paletes seletivos

<b>MODELO</b>	<b>AMOSTRA</b>	<b><i>F<sub>I</sub></i> (kN)</b>	<b>Nº DE AMOSTRAS</b>
<b>Tipo 1</b>	<b>T1-100</b>	30	2
	<b>T1-200</b>	45	3
	<b>T1-300</b>	60	4
	<b>T1-400</b>	75	2
	<b>T1-500</b>	90	2
<b>Tipo 2</b>	<b>T2-100</b>	30	2
	<b>T2-200</b>	45	2
	<b>T2-300</b>	60	2
	<b>T2-400</b>	75	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se um estudo mais minucioso acerca do comportamento mecânico das amostras de ligação do Tipo 1, a qual representa o arranjo estrutural padrão que o presente estudo pretende caracterizar. Além disso, para as amostras T1-200 e T1-300 foram feitos um número maior de ensaios devido a dispersão dos resultados experimentais observados nas primeiras amostras.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo detalha a concepção e o funcionamento do modelo alternativo de ensaio proposto pelo presente estudo. Nesse cenário, diferentes estratégias foram empregadas para efetivar a realização da campanha experimental no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP.

Dentre tais estratégias, destacam-se os esforços empregados (i) na adequação da infraestrutura do LE aos objetivos do presente programa experimental, (ii) na proposta de aparelhamento dos equipamentos de medição de acordo com os comportamentos mecânicos esperados, (iii) concepção de aparatos experimentais exclusivos para o modelo alternativo de ensaio, (iv) estudo e definição dos materiais, e.g. bloco de concreto e graxa, e (v) campanha experimental do arranjo estrutural de base sob compressão centrada para determinação dos grupos de amostras.

Desta forma, em função do caráter inovador do modelo de ensaio proposto (Figura 4-2) o presente capítulo detalhou o fluxograma das etapas que constituem o experimento (Figura 4-4) e descreveu o projeto e funcionamento dos aparatos experimentais concebidos visando

garantir o sistema de forças e deslocamentos idealizados para o programa experimental, ilustrado na Figura 4-3.

Em sequência, foram apresentados a coluna porta-paleta e os modelos de ligação de base que configuram os arranjos estruturais de base avaliados pela presente campanha experimental. Com relação aos dois tipos distintos de ancoragem das amostras de ligação T1 e T2, espera-se observar diferentes comportamentos mecânicos nos respectivos ensaios. Portanto, com base nos grupos de amostras previamente estabelecidos para a campanha experimental (Tabela 4-4), será possível conduzir uma análise comparativa dos efeitos das diferentes formas de ancoragem nos valores de rigidez rotacional da ligação e no comportamento mecânico do arranjo estrutural de base.

Por fim, compreendido os detalhes pertinentes do modelo alternativo de ensaio projetado para o presente trabalho, o capítulo subsequente reúne os principais resultados experimentais e as análises dos comportamentos mecânicos observados em ensaio.

## 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O Capítulo 5 reúne os principais resultados experimentais obtidos a partir do modelo alternativo de ensaio descrito no Capítulo 4. Nesse sentido, as análises experimentais se fundamentaram em proporcionar esclarecimentos quanto ao comportamento mecânico dos dois modelos de arranjo estrutural de base avaliados, i.e., arranjos T1 e T2 descritos na Tabela 4-4.

Primeiramente são apresentados os resultados das curvas momento-rotação ( $M-\theta$ ) experimental, bem como descrito os modos de falha e comportamentos das vinte e uma amostras ensaiadas. Em seguida, são apresentados os parâmetros de rigidez rotacional e momento fletor resistente característicos dos arranjos estruturais de base, os quais são obtidos a partir de especificações normativas e metodologias propostas na literatura.

Nesse cenário, as análises experimentais do Capítulo 5 também investigam (i) a influência dos efeitos de segunda ordem no arranjo estrutural de base, (ii) o impacto da força axial  $F_1$  na resposta estrutural das amostras de ligação e (iii) as diferentes parcelas de rotação que compõem o comportamento mecânico do arranjo estrutural de base. Por conseguinte, o presente capítulo apresenta uma análise comparativa dos modelos de ligação de base avaliados, estudo que procura fundamentar as diferenças observadas no comportamento das amostras ao longo do programa experimental.

Conforme descrito no Capítulo 4, apesar das estratégias encontradas para viabilizar o estudo, o modelo alternativo de ensaio projetado pelo presente trabalho apresenta aparatos experimentais e funcionamentos complexos. Desta forma, em função do caráter inovador do modelo de ensaio ilustrado na Figura 4-2 e das incertezas quanto à eficiência dos aparatos experimentais, o início do presente programa experimental foi marcado pela realização de 3 ensaios pilotos. Nesse sentido, os ensaios pilotos foram essenciais para validar a proposta alternativa de ensaio descrita no Capítulo 4 e identificar aprimoramentos necessários.

Além dos esforços empregados na etapa dos ensaios pilotos, todo o programa experimental ocorreu sob monitoramento dos equipamentos de medição destinados a inspecionar a qualidade de execução do ensaio. Nesse cenário, a fim de assegurar que o bloco de concreto não apresentasse rotações em torno do seu eixo vertical, as medições dos transdutores 3 e 4 foram inspecionadas durante todos os experimentos. Além disso, foram monitorados também os valores do transdutor 5, cuja função é aferir se o topo do arranjo estrutural de base permanece indeslocável.

Nesse âmbito, a maior diferença observada entre os transdutores 3 e 4 foi de 1,21 mm para o arranjo estrutural de base T1 e de 2,08 mm para o arranjo T2, valores que representam uma rotação do bloco de 3,01 mRad e 5,19 mRad, respectivamente. Os valores máximos de rotação do bloco de concreto ocorreram próximos ao encerramento do ensaio, i.e., após o colapso da amostra. Sendo assim, o presente trabalho constata a bem-sucedida restrição das rotações do bloco em torno do seu eixo vertical ao longo dos experimentos realizados.

Portanto, diante dos valores insignificantes de rotação do bloco e das medições do transdutor 5 próximas de zero, conclui-se o bom funcionamento do modelo alternativo de ensaio proposto pela presente pesquisa. Por fim, não foram verificadas danificações estruturais e/ou deformações nas amostras de bloco de concreto, assim como nas barras que ancoram a ligação de base ao bloco. A integridade estrutural desses elementos é relevante para atestar a repetição dos blocos B1 e B2 (Tabela 4-2) ao longo do programa experimental.

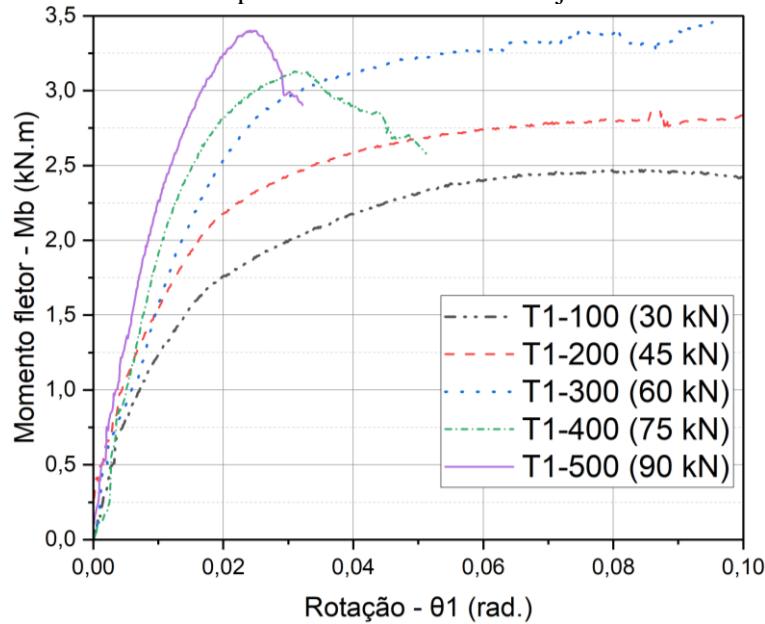
## 5.1 CURVA M-θ EXPERIMENTAL E COMPORTAMENTOS MECÂNICOS

Posterior à validação do funcionamento do modelo alternativo de ensaio, o programa experimental conduziu 13 ensaios com amostras do arranjo estrutural de base Tipo 1 (T1) e 8 ensaios do arranjo estrutural Tipo 2 (T2), conforme apresentado nos grupos da Tabela 4-4.

Nesse contexto, a Figura 5-1 e Figura 5-2 ilustram a média dos resultados das curvas momento e rotação ( $M-\theta$ ) experimentais dos arranjos estruturais de base T1 e T2, respectivamente. Além disso, no APÊNDICE A, são apresentadas as curvas  $M-\theta$  experimentais de cada amostra ensaiada, juntamente com a média dos resultados. A nomenclatura adotada segue o descrito na Tabela 4-4 e a magnitude de força de compressão ( $F_I$ ) no arranjo estrutural de base é indicada na legenda dos gráficos.

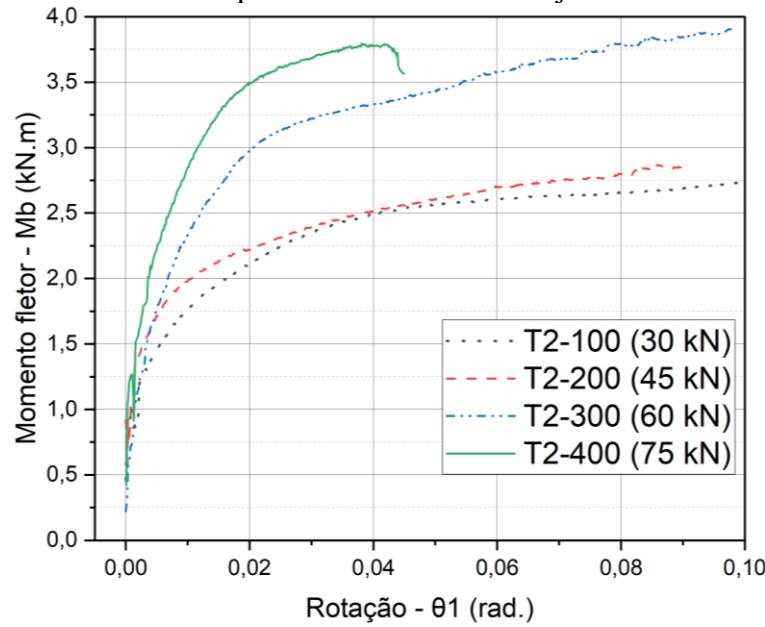
Conforme descrito no Capítulo 4, a curva  $M-\theta$  consta com os valores de momento fletor ' $M_b$ ' das amostras no eixo das ordenadas – obtidos pela Equação (52), na qual ' $M_b = F_2(L - \delta_6) + F_1(\delta_3 + \delta_4)/2$ ' – e as respectivas rotações aferidas pelo inclinômetro 1 ( $\theta_1$ ) no eixo das abscissas. Sendo assim, com base nos resultados experimentais apresentados na Figura 5-1 e Figura 5-2, é possível observar padrões no traçado da curva  $M-\theta$  das amostras, os quais se correlacionam com os comportamentos mecânicos identificados durante o programa experimental.

Figura 5-1 – Curva M- $\theta$  experimental média dos arranjos estruturais de base T1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5-2 – Curva M- $\theta$  experimental média dos arranjos estruturais de base T2



Fonte: Elaborado pelo autor

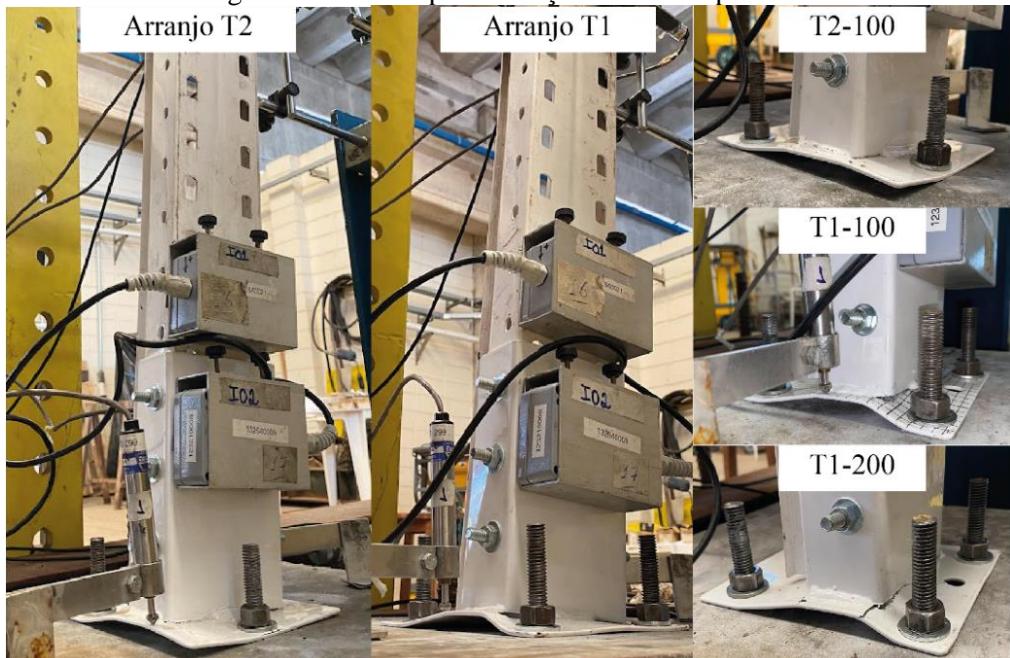
De forma geral, os arranjos estruturais de base exibem um comportamento linear durante os estágios iniciais de carregamento. Em sequência, após a etapa elástica da amostra, a curva M- $\theta$  apresenta um comportamento não linear em seu traçado, típico de ligações semirrígidas. Além disso, observa-se diferenciações no trecho elástico e inelástico das amostras à medida que a força de compressão  $F1$  aumenta.

Pelo traçado das curvas M- $\theta$  experimentais da Figura 5-1 e Figura 5-2, observa-se que, de fato, a rigidez e o comportamento constitutivo do arranjo estrutural de base são determinados pela magnitude de compressão  $F1$  na coluna porta-palete. Nesse sentido, a divisão dos grupos

de ensaio por magnitude de compressão na coluna possibilitou constatar a correlação entre os diferentes comportamentos da curva M- $\theta$  experimental e os modos de falha característicos do arranjo estrutural de base. Portanto, a seguir, serão apresentadas as análises dos comportamentos mecânicos observados nos ensaios de ambos os arranjos estruturais de base avaliados.

De forma semelhante, os arranjos estruturais de base, tanto do modelo T1 quanto do modelo T2, sob compressões  $F_1$  de 30 kN e 45 kN, apresentaram falhas devido à formação de rótulas plásticas na placa de base, colapso ilustrado na Figura 5-3. Nesses ensaios, não foram observadas instabilidades nas amostras de coluna. A falha por formação de rótulas plásticas na placa de base resultou em elevadas magnitudes de rotação no arranjo estrutural de base, critério que configurou a parada desses ensaios.

Figura 5-3 – Falha por formação de rótulas plásticas

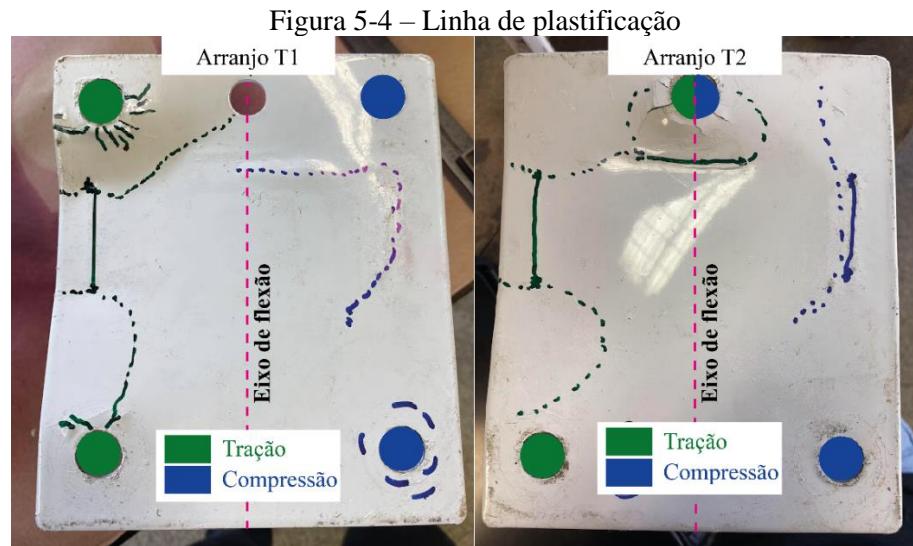


Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, a linha de plastificação formada nas amostras e, consequentemente, o formato da deformação da placa de base foram similares para amostras do mesmo modelo de ligação. Exemplos do padrão de deformação de ambos os arranjos podem ser observados na Figura 5-3. O comportamento da linha de plastificação da placa de base se tornou evidente devido a magnitude das deformações da peça, nesse sentido, a Figura 5-4 ilustra os padrões observados nas linhas de plastificação do arranjo estrutural de base T1 e T2.

Sendo assim, na Figura 5-4, são identificadas com cores distintas o eixo de flexão da ligação e as deformações por tração e compressão na placa de base. Notam-se os diferentes

traçados entre os modelos, principalmente para a linha de tração. Faz-se relevante mencionar que o comportamento da linha de plastificação configura um parâmetro fundamental para validação de futuros modelos numéricos da ligação de base experimentada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ademais, através da Figura 5-4, torna-se evidente o comportamento de plastificação da placa de base das diferentes ancoragens avaliadas. Nesse sentido, a transmissão de esforços fletores pela ancoragem simétrica do arranjo T1 mobiliza um braço de alavanca composto por duas barras, igualmente posicionadas em cada extremidade da placa de base. Já a ancoragem assimétrica do arranjo T2 promove um braço de alavanca composto por uma barra no canto inferior da placa de base e outra barra posicionada na linha do eixo de flexão da ligação. Faz-se relevante mencionar que a assimetria da ligação T2 se refere ao eixo perpendicular ao eixo de flexão.

Sendo assim, de conhecimento das diferentes linhas de plastificação (Figura 5-4), observa-se conformidade entre a região tracionada e comprimida do arranjo T1 e seu respectivo eixo de flexão. O mesmo não ocorre para o arranjo T2, portanto, comprehende-se que a disposição das ancoragens altera o comportamento de plastificação da placa de base.

Os gráficos da Figura 5-1 e Figura 5-2 evidenciam que, devido à formação de rótulas plásticas na placa de base, não é possível identificar de forma clara o momento fletor máximo resistido pelas amostras submetidas a  $F_1$  igual a 30 kN e 45 kN. Isso ocorre porque, devido ao aparecimento de tensões residuais de membrana, típicas dos efeitos de plastificação no aço, os esforços fletores se mantêm crescentes sob regime de grandes deformações. Por esse motivo, observa-se a similaridade no comportamento das curvas M-θ das amostras T1-100, T1-200, T2-100 e T2-200, as quais apresentam um aumento dos esforços de flexão mesmo sob grandes

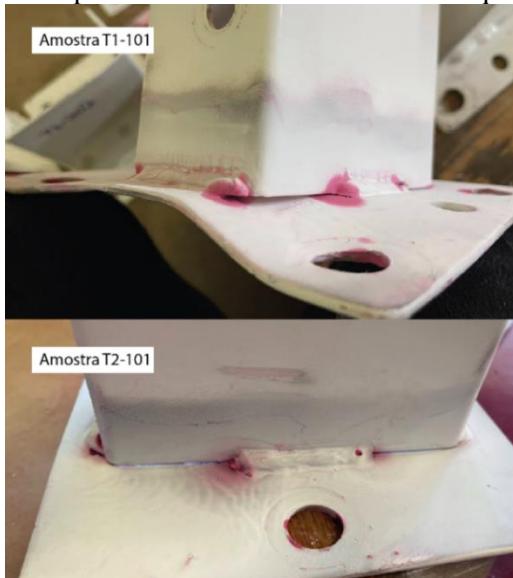
magnitudes de rotação (0,08 a 0,1 rad.). Esse padrão também é observado nas amostras T1-300 e T2-300, no entanto, estas requerem uma análise individual, que será apresentada em sequência.

Além disso, os gráficos da Figura 5-1 e Figura 5-2 também evidenciam que os arranjos estruturais T1 e T2, quando submetidos a força de compressão de 30 kN e 45 kN, exibem resistência mecânica e rigidez rotacional inferiores em comparação com o restante do programa experimental. Sendo assim, evidencia-se a influência direta da compressão na coluna portapalete na resposta estrutural da ligação de base.

Diante do exposto, além da formação das rótulas plásticas na placa de base, observou-se que as soldas que unem a placa de base ao *bracket* também foram solicitadas na transmissão dos esforços fletores. Nesse contexto, notou-se o descolamento das extremidades do filete de solda próximas às ancoragens tracionadas. À vista disso, para verificar possíveis fissurações na região soldada e compreender a sua influência na falha da ligação de base, o presente trabalho realizou o ensaio de líquido penetrante.

Os ensaios de líquido penetrante verificam a integridade estrutural dos filetes de solda, por isso, foram realizados apenas nas amostras que apresentaram formação de rótulas plásticas na placa de base. Conforme exemplificado na Figura 5-5, os pontos destacados pelo ensaio não destrutivo revelam as regiões mais solicitados da solda, assim como falhas de fabricação da peça. De forma geral, os resultados não indicaram fissuras ao longo do comprimento do filete de solda, apenas nas extremidades das mesmas.

Figura 5-5 – Exemplos dos resultados do ensaio de líquido penetrante



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, conforme ilustrado na Figura 5-5, o ensaio de líquido penetrante evidenciou maiores fissurações nas extremidades das soldas das ligações T1 em comparação com os modelos T2, resultados que revelam os diferentes comportamentos mecânicos em função da ancoragem das amostras. Portanto, nota-se a influência da conexão soldada entre *bracket* e placa de base no comportamento de plastificação da placa e base, visto que as soldas se tornam pontos de concentração de tensões. Consequentemente ao exposto, destaca-se o papel da conexão soldada do *bracket* na transmissão de esforços entre a coluna porta-paleta e a placa de base.

Outra diferença importante observada entre os ensaios dos arranjos estruturais T1 e T2, submetidos a menores compressões, foi a tendência à torção constatada para as ligações com ancoragem assimétrica, i.e., amostras do arranjo estrutural de base T2. Nesse contexto, observou-se que, para as amostras T2-100 e T2-200, eventuais folgas entre o Sistema guia e as Vigas guias – aparelhos descritos no item 4.2.3 – foram retiradas ao longo do experimento, fato que evidencia a presença de esforços torreiros e a consequente tendência de rotação do bloco de concreto.

Faz-se relevante mencionar que as folgas existentes entre o Sistema guia com rolamentos e Vigas guias foram mínimas e, consequentemente, não interferiram no bom funcionamento do programa experimental. Por isso, conforme mencionado na introdução do presente capítulo, a restrição da rotação do bloco de concreto em torno de seu eixo vertical ocorreu de forma satisfatória.

Além disso, outro indicativo da tendência à torção das amostras T2-100 e T2-200 foi a maior dificuldade em manter a força  $F1$  de compressão constante ao longo do ensaio. Nesse âmbito, a presente pesquisa observou que, devido à tendência à torção na coluna, ocorreu o início do empenamento da seção na extremidade em contato com a placa de base. Por essa razão, foram necessárias sucessivas correções na força de compressão  $F1$  para que a mesma se mantivesse constante ao longo do ensaio, procedimento que não foi necessário nos experimentos do arranjo T1.

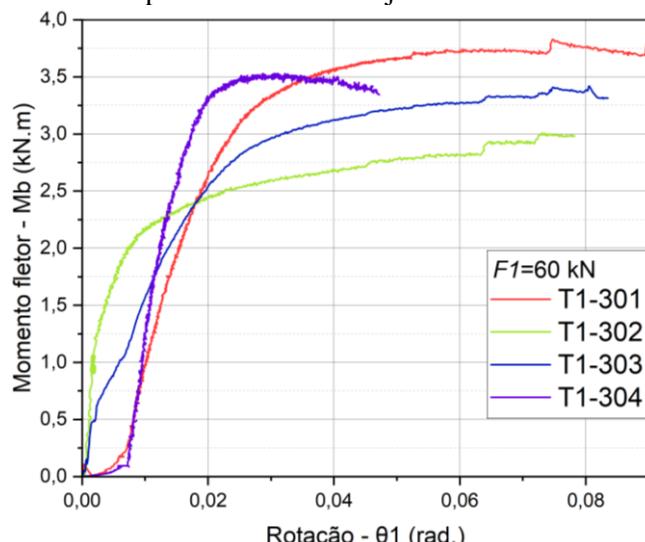
Por fim, a presença de torção nas amostras de ligação com ancoragem assimétrica concorda com o comportamento, também assimétrico, da linha de plastificação ilustrado na Figura 5-4. Nesse sentido, comprehende-se que a menor restrição formada pela ancoragem T2 resulta em excentricidades acidentais na transmissão dos esforços pela ligação, induzindo o aparecimento de torção no arranjo estrutural de base.

Dando continuidade às análises dos resultados experimentais, maiores precauções foram necessárias no estudo dos ensaios com força de compressão de 60 kN. Isso pois, observou-se que a falha das amostras T1-300 e T2-300 apresentou a interação entre a formação de rótulas plásticas na placa de base e instabilidades na coluna porta-paleta. Nesse cenário, enquanto as amostras do arranjo estrutural de base T1-300 apresentaram instabilidades distorcionais, as amostras T2-300 apresentaram o início de instabilidade global por flexo-torção.

No entanto, a predominância do modo de falha por formação de rótula plástica na ligação pode ser observada no comportamento das curvas T1-300 e T2-300, da Figura 5-1 e Figura 5-2, respectivamente, nas quais o momento fletor ' $M_b$ ' cresce mesmo sob grandes magnitudes de rotação do arranjo. Por isso, ensaios de líquido penetrante também foram realizados para as amostras T1-300 e T2-300, sendo que seus resultados foram similares às análises já apresentadas e exemplificadas pela Figura 5-5.

Diante do exposto, de conhecimento do complexo comportamento mecânico advindo da interação entre os modos de falha, o presente programa experimental ensaiou 4 amostras do arranjo estrutural padrão sob 60 kN de compressão, i.e., T1-300. Os resultados das amostras são ilustrados na Figura 5-6. Nesse contexto, devido problemas na célula de carga 'CO2', a qual afere os valores de  $F_2$ , os dados de T1-304 foram descartados. Todavia, o traçado da curva T1-304 se apresenta relevante para a presente análise do comportamento mecânico das amostras T1-300. Por isso, a curva T1-304 (Figura 5-6) foi plotada com os valores de força aferidos pelo servo-hidráulico, o qual perde precisão após o afrouxamento do cabo do sistema de ancoragem, razão pela qual a curva é interrompida em baixas rotações.

Figura 5-6 – Curva  $M-\theta$  experimental dos arranjos estruturais de base T1-300 (60 kN)



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse cenário, de forma similar, T1-301, T1-303 e T1-304 apresentaram falha pela interação entre a formação de rótulas plásticas na placa de base e instabilidades distorcionalis na coluna porta-paleta, similaridade que se reflete também na proximidade das curvas M-θ das respectivas amostras. Já a amostra T1-302 apresentou o colapso somente pelo aparecimento de rótulas plásticas na placa de base, comportamento que justifica a disparidade entre seus resultados e os das outras amostras T1-300. Portanto, em função do desvio no comportamento mecânico na falha da amostra e disparidades nos valores da curva M-θ experimental, os resultados de T1-302 foram descartados das análises experimentais do presente trabalho.

Ademais, conforme gráficos da Figura 5-1 e Figura 5-2, em comparação às amostras submetidas a forças  $F_1$  inferiores, os arranjos T1-300 e T2-300 demonstraram uma elevação expressiva da curva M-θ no sentido de resistência aos esforços fletores. À vista do exposto, comprehende-se que a elevação da força de compressão para 60 kN aumentou a interação entre a ligação de base e a coluna porta-paleta, comportamento que resulta na falha por rótulas plásticas na placa, aliada às instabilidades já mencionadas na coluna. A Figura 5-7 ilustra a interação entre os dois modos de falha observados nas amostras com  $F_1$  igual a 60 kN.

Figura 5-7 – Amostras sob  $F_1=60$  kN, interação entre falha por rótula plástica e instabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

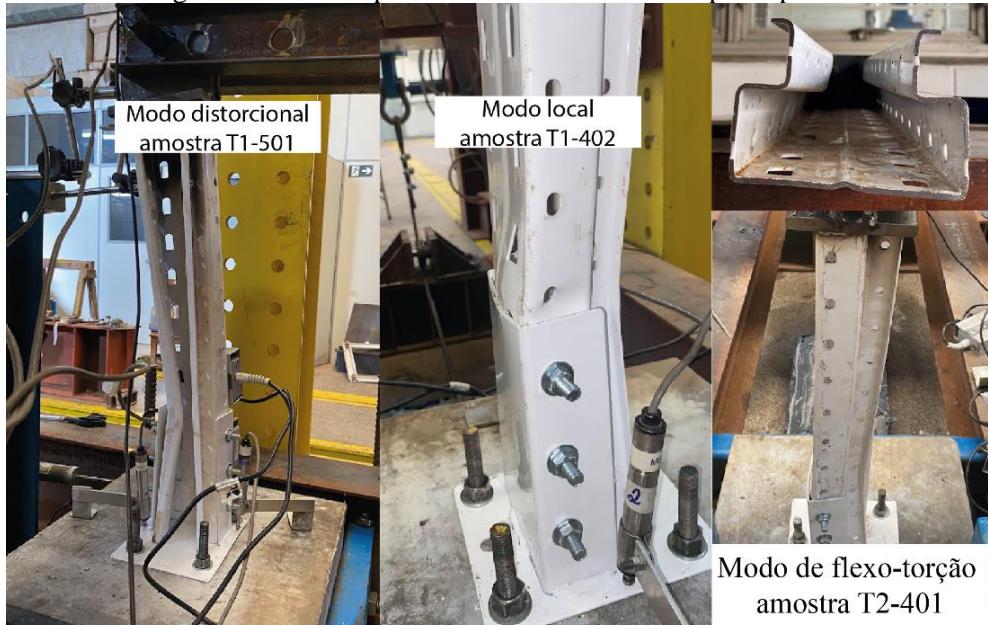
Por fim, o presente estudo experimental ensaiou amostras do arranjo T1 sob compressão de 75 kN e 90 kN – T1-400 e T1-500, respectivamente – e amostras T2 sob compressão de 75 kN, T2-400. Nesse sentido, os ensaios sob magnitudes de  $F_1$  elevadas demonstraram falha do arranjo estrutural de base por instabilidades na coluna porta-paleta, não sendo observada formação de rótulas plásticas na placa de base. Por conseguinte, para essas amostras, se observa

a viabilidade em definir o momento fletor resistente máximo do arranjo estrutural de base nos traçados das curvas M- $\theta$  experimentais da Figura 5-1 e Figura 5-2.

Portanto, comprehende-se que o pico de momento fletor ' $M_b$ ', seguido de uma curva descendente M- $\theta$ , caracteriza o comportamento das amostras que falham por instabilidade na coluna porta-paleta. Além disso, de forma geral, a curva M- $\theta$  experimental de amostras sob  $F_1$  elevado demonstram maior resistência mecânica e rigidez rotacional.

No âmbito dos modos de instabilidade observados em ensaio, ambos os arranjos estruturais T1-400 (75 kN) e T1-500 (90 kN) demonstraram a presença do modo distorcional na altura da coluna porta-paleta próxima à ligação de base. Além disso, para essas amostras, também foram identificados modos locais de instabilidade na alma da coluna e na mesa comprimida, igualmente em regiões próximas da ligação de base. Já para as amostras T2-400, observou-se a presença de instabilidades globais por flexo-torção, sendo que, os enrijecedores da coluna também indicaram a tendência por modos distorcionais de instabilidade. Sendo assim, a Figura 5-8 ilustra os comportamentos descritos.

Figura 5-8 – Falha por instabilidades na coluna porta-paleta



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme descrito, foi possível observar a presença de esforços torções nas colunas porta-paletes de todas as amostras do arranjo estrutural de base tipo 2, comportamento que se tornou crítico nas amostras T2-400, uma vez que o colapso ocorreu por flexo-torção do arranjo. Nesse âmbito, comprehende-se que a ancoragem assimétrica T2 altera a interação da coluna porta-paleta com a ligação de base, amplificado a tendência à torção do arranjo. Portanto, o

presente programa experimental observou que os diferentes modos de ancoragem das ligações influenciam na estabilidade do arranjo estrutural de base.

Ademais, trabalhos recentes da literatura, e.g. Huang *et al.* (2021) e Firouzianhaij *et al.* (2022), apontam para o papel fundamental do *bracket* na transmissão de esforços entre ligação de base e coluna porta-paleta. De fato, os comportamentos mecânicos observados no presente programa experimental indicam a influência direta do *bracket* na resposta estrutural das amostras.

Nesse cenário, comprehende-se que os *brackets* dos arranjos estruturais de base desempenharam três funções distintas, sendo elas: (i) transmissão dos esforços para a placa de base através da ligação soldada (Figura 5-5), (ii) definição da região em que as instabilidades na coluna porta-paleta ocorrem (Figura 5-8) e também (iii) transmissão dos esforços torções advindos da ancoragem assimétrica para a coluna. Portanto, em concordância com os trabalhos recentes da literatura, o presente programa experimental notou a relevância do *bracket* na interação entre ligação de base e coluna porta-paleta e, consequentemente, na definição dos comportamentos mecânicos e estabilidade do arranjo estrutural de base.

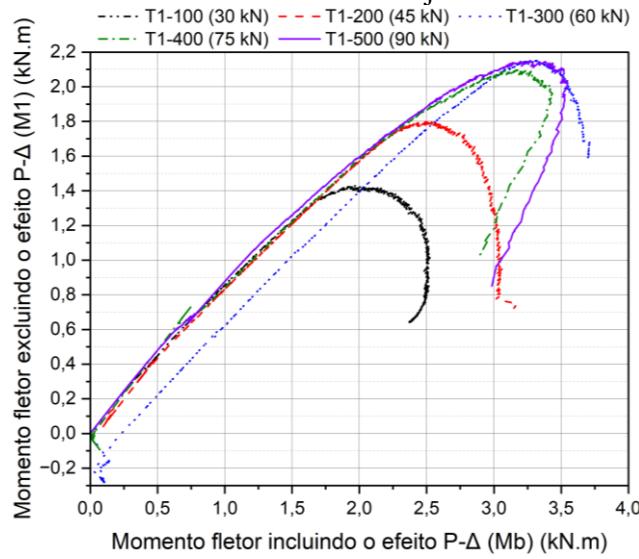
A semirrigidez característica dos arranjos estruturais de base de porta-paletes faz com que seja relevante a análise pormenorizada dos esforços de segunda ordem atuantes no experimento. Sendo assim, uma das formas de caracterizar o comportamento não linear da curva M- $\theta$  experimental é verificar a amplificação do momento fletor na ligação em resposta aos efeitos de segunda ordem no arranjo estrutural. Para tanto, na Figura 5-9 foram plotados os gráficos para o arranjo T1 da relação entre momento fletor total da ligação de base ( $M_b$ ) – que inclui o efeito P- $\Delta$  pela parcela ‘ $F_1(\delta_3+\delta_4)/2$ ’ – e momento fletor ‘ $M_I$ ’ – Equação (51), ‘ $M_I=F_2(L-\delta_6)$ ’ –, que não considera o efeito P- $\Delta$ .

O gráfico da Figura 5-9 indica a presença dos esforços fletores devido efeito P- $\Delta$  já no início dos experimentos do arranjo T1, fato que pode ser observado nos valores iniciais da curva  $M_I-M_b$  dos arranjos. Nesse sentido, importantes comportamentos podem ser observados na curva  $M_I-M_b$  após o pico de ‘ $M_I$ ’, i.e., após o *peak load* da força horizontal  $F_2$ .

Nesse cenário, conforme Figura 5-9, as amostras de ligação sob força de compressão até 60 kN apresentam a expressiva sobreposição, com relação aos esforços fletores ‘ $M_I$ ’, dos esforços que incluem os efeitos de segunda ordem. Isso pois, o momento fletor ‘ $M_b$ ’ cresce significativamente após o máximo valor de ‘ $M_I$ ’. Portanto, comprehende-se que as amostras T1-

100, T1-200 e T1-300 atingem a máxima resistência mecânica após o *peak load* de  $F_2$ , no momento em que a força horizontal decresce.

Figura 5-9 – Gráfico  $M_b$  vs.  $M_1$  - Arranjo estrutural de base T1



Fonte: Elaborado pelo autor

Atestado a influência do efeito  $P-\Delta$  nos ensaios T1-100, T1-200 e T1-300, e de conhecimento da plastificação que ocorre na placa de base das amostras, comprehende-se o traçado tipicamente não linear da curva  $M-\theta$  (Figura 5-1) que essas amostras apresentam. Além disso, o gráfico da Figura 5-9 ilustra uma perturbação nos valores iniciais de ' $M_1$ ' para o arranjo T1-300, o que faz com que a curva  $M_1-M_b$  dessa amostra se diferencie do comportamento do restante do programa experimental.

Nesse sentido, comprehende-se que os valores negativos iniciais dos esforços fletores de T1-300 são resultados da acomodação da amostra diante eventuais folgas do arranjo estrutural de base. Sendo assim, a perturbação observada no início da curva  $M_1-M_b$  pode estar atrelada à maior interação entre a ligação de base e a coluna porta-palete, visto que também é observada, em menor escala, para o arranjo T1-400. Nota-se que o aumento da força de compressão de 60 kN à 90kN foi suficiente para que o processo de escorvamento do ensaio retire as folgas que geram as perturbações na curva  $M_1-M_b$ , uma vez que a amostra T1-500 não apresenta tal comportamento.

Ademais, é possível notar pelos gráficos da Figura 5-9 que o efeito  $P-\Delta$  é determinante na falha dos arranjos estruturais de base T1 sob forças de compressão de maior magnitude. Isso pois, as curvas  $M_1-M_b$  das amostras T1-400 e T1-500 indicam um crescimento mínimo do esforço fletor após o pico de ' $M_1$ '. Ou seja, o colapso devido instabilidades na coluna porta-

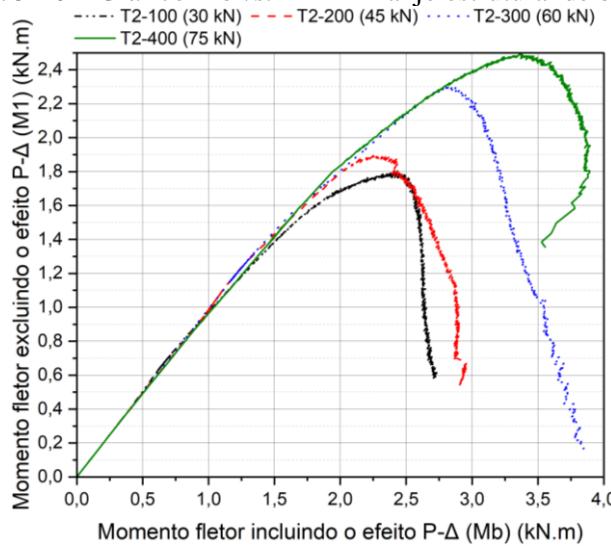
palete das amostras sob compressão de 75 kN e 90 kN é atrelado ao instante que os esforços de segunda ordem começam a se sobrepor aos esforços de primeira ordem.

Nesse âmbito, Firouzianhaij *et al.* (2022) observaram experimentalmente os mesmos comportamentos para as amostras submetidas a  $F_1$  elevado. Por isso, os autores concluem que é decorrente da atuação determinante dos esforços de segunda ordem que amostras submetidas a compressões elevadas apresentam o típico traçado da curva  $M-\theta$  apresentado na Figura 5-1 para as amostras T1-400 e T1-500.

Diante do exposto, nota-se que as análises do gráfico da Figura 5-9 apresentam um padrão claro na correlação entre (i) o comportamento da curva  $M_1-M_b$ , (ii) o comportamento da curva  $M-\theta$  experimental e (iii) os comportamentos mecânicos observados na falha das amostras do arranjo estrutural de base T1.

Em sequência, a fim de realizar a mesma análise para o arranjo estrutural de base T2, a Figura 5-10 ilustra as curvas  $M_1-M_b$  das amostras de ligação de base com ancoragem assimétrica. Sendo assim, diferentemente do arranjo T1, as curvas da Figura 5-10 não indicam a presença de efeitos de segunda ordem no início dos ensaios T2, visto que os trechos iniciais das curvas  $M_1-M_b$  possuem comportamento linear e valores similares entre esforços fletores ' $M_1$ ' e ' $M_b$ '.

Figura 5-10 – Gráfico  $M_b$  vs.  $M_1$  - Arranjo estrutural de base T2



Fonte: Elaborado pelo autor

O presente programa experimental notou que a atuação isolada de esforços ' $M_1$ ' no início dos gráficos da Figura 5-10 é justificada pela maior deslocabilidade resultante da estabilização inicial dos ensaios do arranjo T2. Isso pois, devido a menor restrição da ancoragem assimétrica, as amostras T2 apresentaram maiores folgas na acomodação do arranjo

experimental e, consequentemente, maiores deslocamentos na estabilização da estrutura perante os esforços de compressão  $F1$ .

Nesse contexto, a célula de carga ‘C02’ indicou valores de  $F2$  já na etapa de atuação da força de compressão na coluna, reação horizontal resultante da acomodação do arranjo estrutural T2. Consequentemente, os ensaios da ligação de base T2 indicam a presença de esforços fletores de primeira ordem ( $M_1$ ) que não são resultante da atuação do servo-hidráulico.

À vista disso, o fato do início dos ensaios do arranjo T2 ser marcado apenas pela presença de ‘ $M_1$ ’, justifica o comportamento inicial da curva M-θ dessas amostras (Figura 5-2), a qual indica um crescimento dos esforços fletores resistentes sem indícios de rotação na ligação. No item 5.2 do presente capítulo, será retomada a discussão sobre o comportamento inicial da curva M-θ do arranjo T2, decorrente da estabilização da amostra em ensaio, uma vez que impacta diretamente na definição da rigidez rotacional da ligação de base.

Além do mais, conforme Figura 5-10, observa-se que, de forma geral, todos os ensaios indicam a sobreposição significativa dos valores de ‘ $M_b$ ’ com relação aos valores de ‘ $M_1$ ’. Ou seja, todos os ensaios do arranjo estrutural T2 atingem a máxima resistência mecânica após o *peak load* de  $F2$ , no instante em que os esforços de segunda crescem progressivamente e superam os valores de ‘ $M_1$ ’. Portanto, diferente da análise feita para as amostras T1, o arranjo estrutural de base T2 não apresenta uma correlação clara entre os modos de falha observados experimentalmente e o traçado da curva  $M_1$ - $M_b$ .

Diante do exposto, comprehende-se que os diferentes comportamentos mecânicos observados nos ensaios do arranjo T2 e, consequentemente, os efeitos de segunda ordem atrelados à flexo-torção, resultam em um notável comportamento não linear da curva M-θ experimental para essas amostras. A não linearidade da curva M-θ da ligação, observada já nas primeiras rotações do arranjo estrutural de base T2, torna o trecho de comportamento elástico linear bastante reduzido quando comparado com os resultados do arranjo T1. Isso é observado principalmente na comparação dos traçados da curva M-θ das amostras T1-400 e T2-400, ambas sob compressão de 75 kN e falha por instabilidade na coluna porta-paletes.

Gilbert e Rasmussen (2011) e Firouzianhaij *et al.* (2022) alertam que a presença de esforços torcões no ensaio de ligação de base de porta-paletes tem o potencial de alterar significativamente o comportamento mecânico do arranjo estrutural. De fato, o presente programa experimental notou diferenças significativas na correlação entre (i) o traçado das

curvas M-θ experimentais do arranjo estrutural de base T2 (Figura 5-2), (ii) a atuação do efeito P-Δ em ensaio (Figura 5-10) e (iii) os comportamentos mecânicos observados na falha dessas ligações expostas à torção.

Ademais, a partir das análises dos efeitos de segunda ordem nos experimentos, feitas por meio dos gráficos da Figura 5-9 e Figura 5-10, conclui-se a efetividade de “pausar” o ensaio no momento em que se atinge o *peak load* de  $F_2$ , estratégia proposta por Gilbert e Rasmussen (2009). Nesse sentido, a pausa nos ensaios permitiu a estabilização do arranjo estrutural de base perante os momentos fletores ‘ $M_1$ ’ e, consequentemente, viabilizou a análise do comportamento do efeito P-Δ nos ensaios.

Por fim, diante das análises feitas no presente item, nota-se que o comportamento mecânico e estabilidade do arranjo estrutural de base é delineado por fatores não negligenciáveis à interação entre a coluna porta-paleta e a ligação de base, i.e., no caso do presente programa experimental, (i) a magnitude de compressão  $F_1$ , (ii) o modelo de ancoragem da placa de base e (iii) o *bracket* da ligação. Além do mais, observou-se que a presença de esforços torcões alterou significativamente a resposta estrutural da ligação de base.

## 5.2 RIGIDEZ ROTACIONAL E MOMENTO FLETOR RESISTENTE

Compreendido os comportamentos mecânicos observados em ensaio e a correlação deles com a curva M-θ experimental dos arranjos estruturais, o presente item expõe as análises dos parâmetros de rigidez rotacional e momento fletor resistente das amostras ensaiadas.

No Capítulo 3 são detalhadas algumas propostas de análise dos resultados de ensaios segundo a metodologia *Design by testing*. Nesse sentido, no item 3.2.3, são abordadas diferentes especificações normativas internacionais e métodos analíticos propostos pela literatura para obtenção de parâmetros de projeto das ligações de base de colunas porta-paleta.

Nesse contexto, a Tabela 5-1 e Tabela 5-2 resumem os resultados de rigidez rotacional e momento fletor de projeto dos arranjos estruturais de base T1 e T2, respectivamente, conforme as especificações da EN 15512:2009, da ANSI/RMI MH16.1:2021 e AS 4084:2012. Além disso, no APÊNDICE B são apresentadas as tabelas com os resultados individuais das 21 amostras ensaiadas. Nota-se que, para definição dos parâmetros normativos de projeto, se mantém a análise segmentada em magnitude de compressão  $F_1$  de ensaio.

Tabela 5-1 – Parâmetros normativos de projeto do arranjo estrutural de base T1

		T1-100	T1-200	T1-300	T1-400	T1-500
EN 15512:2009	<b>Mm [kN.m]</b>	1,92	2,11	3,06	2,67	3,16
	<b>C.V. [%]</b>	3,41%	6,17%	11,51%	6,51%	1,66%
	<b>Mrd [kN.m]</b>	1,55	1,61	1,70	1,89	2,71
AS 4084:2012	<b>kd [kN.m/rad]</b>	118,29 <sup>(1)</sup>	200,58 <sup>(1)</sup>	129,96	191,41	241,03
	<b>Mm [kN.m]</b>	2,49	2,73	3,59	3,18	3,42
	<b>C.V. [%]</b>	5,48%	11,47%	6,49%	5,81%	2,30%
ANSI/RMI MH16.1:2021	<b>Mrd [kN.m]</b>	2,09	2,11	2,55	1,77	2,53
	<b>kd [kN.m/rad]</b>	101,51	136,84 <sup>(1)</sup>	129,93	191,11	257,52
	<b>Mm [kN.m]</b>	2,49	2,73	3,59	3,18	3,42
<b>C.V. [%]</b>	<b>C.V. [%]</b>	2,30%	5,81%	6,49%	11,47%	5,48%
	<b>Mrd [kN.m]</b>	1,49	1,64	2,15	1,91	2,05
	<b>kd [kN.m/rad]</b>	107,10	154,44	136,31	189,56	260,87

**Mm:** Média dos momentos fletores resistentes do arranjo estrutural de base

**Mrd:** Momentos fletor resistente de projeto

**kd:** rigidez rotacional de projeto do arranjo estrutural de base

<sup>(1)</sup>: Rigidez limitada pela relação ‘1,15Mrd/θrdi’

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5-2 – Parâmetros normativos de projeto do arranjo estrutural de base T2

		T2-100	T2-200	T2-300	T2-400
EN 15512:2009	<b>Mm [kN.m]</b>	2,28	2,07	2,97	3,35
	<b>C.V. [%]</b>	6,37%	12,35%	6,79%	0,41%
	<b>Mrd [kN.m]</b>	1,62	1,10	2,08	3,01
AS 4084:2012	<b>kd [kN.m/rad]</b>	268,87 <sup>(1)</sup>	1402,12	388,77 <sup>(1)</sup>	304,75 <sup>(1)</sup>
	<b>Mm [kN.m]</b>	2,34	2,42	3,42	3,81
	<b>C.V. [%]</b>	1,12%	11,97%	4,04%	3,29%
ANSI/RMI MH16.1:2021	<b>Mrd [kN.m]</b>	2,05	1,31	2,69	3,08
	<b>kd [kN.m/rad]</b>	278,36	1170,37 <sup>(1)</sup>	395,75	478,54
	<b>Mm [kN.m]</b>	2,34	2,42	3,42	3,81
<b>C.V. [%]</b>	<b>C.V. [%]</b>	1,12%	11,97%	4,04%	3,29%
	<b>Mrd [kN.m]</b>	1,40	1,45	2,05	2,29
	<b>kd [kN.m/rad]</b>	343,14	662,65	333,23	444,44

**Mm:** Média dos momentos fletores resistentes do arranjo estrutural de base

**Mrd:** Momentos fletor resistente de projeto

**kd:** rigidez rotacional de projeto do arranjo estrutural de base

<sup>(1)</sup>: Rigidez limitada pela relação ‘1,15Mrd/θrdi’

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo as especificações da EN 15512:2009 e AS 4084:2012, a rigidez rotacional secante de projeto é definida com base em uma relação bilinear dos resultados experimentais da curva M-θ de cada amostra de ligação de base. Nesse cenário, primeiramente, um valor de momento fletor resistente ( $M_{ti}$ ) é definido conforme resultados experimentais.

Conseguinte, a rigidez rotacional secante ‘ $k_{n,i}$ ’ é obtida pela inclinação da reta que parte da origem e delimita duas áreas equivalentes ‘ $A_1$ ’ e ‘ $A_2$ ’, definidas entre a reta e os resultados

experimentais. O processo de obtenção da relação bilinear é ilustrado na Figura 3-27 e descrito no Capítulo 3. Baldassino e Zandonini (2008), de conhecimento da possível adversidade do processo iterativo de equivalência das áreas entre curvas, propõem a Equação (45) para definição de ' $k_{n,i}$ '. A Equação (45) consistem na obtenção da rigidez rotacional secante através do processo de integração da equação aproximativa da curva experimental, a qual deve ser no mínimo polinomial quadrática. Comparando os resultados de rigidez rotacional obtidos por meio do processo iterativo especificado pelas normas EN 15512:2009 e AS 4084:2012 com as rigidezes obtidas utilizando a Equação (45), o presente trabalho validou a proposta de Baldassino e Zandonini (2008).

Sendo assim, para a determinação da rigidez do arranjo estrutural de base ( $k_{n,i}$ ), aproximaram-se as curvas M-θ experimentais por uma relação polinomial de sexto grau, a qual delineou satisfatoriamente o comportamento da curva obtida em ensaio. Consequentemente, foi calculado a integral definida entre 0 e a rotação de projeto da amostra ( $\theta_{rdi}$ ), conforme Equação (45). Dessa forma, foram obtidos os dados de rigidez rotacional secante apresentados na Tabela 5-1 e Tabela 5-2.

Apesar das especificações normativas da EN 15512:2009 e AS 4084:2012 serem similares, há uma importante diferença na determinação do momento fletor resistente do arranjo estrutural de base ensaiado ( $M_{ti}$ ). A norma europeia especifica que ' $M_{ti}$ ' é determinado pelo *peak load* de  $F2$  ou pelo limite de rotação determinado para o arranjo. Já a norma australiana, fundamentada pelo trabalho de Gilbert e Rasmussen (2009), define ' $M_{ti}$ ' como o máximo momento fletor da curva M-θ experimental ou o esforço fletor obtido em uma rotação limite. A diferença nas especificações da EN 15512:2009 e AS 4084:2012 pode ser observada nos valores resultantes de momento fletor resistente médio ( $M_m$ ) da Tabela 5-1 e Tabela 5-2.

Em sequência, tanto para EN 15512:2009 quanto para AS 4084:2012, a partir da determinação de ' $M_m$ ', o momento fletor de projeto ( $M_{rd}$ ) da ligação de base é obtido penalizando o resultado experimental por coeficientes de confiabilidade e fatores de segurança, conforme Equação (43). Por fim, a rigidez rotacional de projeto ( $k_d$ ) é a média das rigidez rotacional ' $k_{n,i}$ ' das amostras. Para ambas as normas internacionais, ' $k_d$ ' possui como limite superior a relação ' $1,15 M_{rd}/\theta_{rdi}$ ' - desigualdade da Equação (44) -, a qual Baldassino e Zandonini (2008) afirmam ponderar o comportamento não linear da amostra ensaiada. Nesse cenário, na Tabela 5-1 e Tabela 5-2 são indicadas as amostras que apresentaram a rigidez rotacional limitada pela desigualdade da Equação (44).

A ANSI/RMI MH16.1:2021, fundamentada pelo trabalho de Roure *et al.* (2016), especifica o mesmo procedimento que a norma australiana para definição de ' $M_{ti}$ '. No entanto, ' $M_{rd}$ ' é definido como 60% do valor do esforço fletor experimental ( $M_{ti}$ ), dado pela Equação (47), e ' $k_d$ ' é a relação entre ' $M_{rd}$ ' e a sua respectiva rotação, conforme Equação (48).

Como observado nas curvas M- $\theta$  da Figura 5-1 e Figura 5-2, não raras as vezes, não é possível definir um valor máximo de momento fletor resistente ( $M_{ti}$ ) do experimento, cenário recorrente em amostras que falham por rótulas plásticas na placa de base. Para esses casos, Gilbert e Rasmussen (2009) indicam que ' $M_{ti}$ ' pode ser determinado como sendo o momento fletor correspondente a quatro vezes a deformação de escoamento da ligação de base, procedimento ilustrado na Figura 3-31. Portanto, para a definição de ' $M_{ti}$ ' das amostras T1-100, T1-200, T1-300, T2-100, T2-200 e T2-300 o presente trabalho adotou o procedimento recomendado por Gilbert e Rasmussen (2009).

Além dos parâmetros normativos de projeto, a Tabela 5-1 e Tabela 5-2 apresentam os coeficientes de variação (C.V.) dos resultados de ' $M_{ti}$ ' para cada grupo de arranjo estrutural de base. Nesse cenário, os arranjos estruturais de base T1 apresentaram um coeficiente de variação máximo de 11,51% e mínimo de 1,66%. Já o arranjo estrutural de base T2 apresentou um C.V. máximo de 12,35% e mínimo de 0,41%.

Nota-se que, para o arranjo T1, a maior dispersão dos valores de momento ocorreu nas amostras submetidas à compressão de 60 kN, as quais apresentaram a interação entre falha por rótula plástica na placa de base e instabilidade na coluna porta-paleta, conforme descrito no item 5.1. Portanto, observa-se que os complexos comportamentos mecânicos presenciados na falha dos arranjos T1-300 resultaram na maior dispersão dos valores resultantes de momento fletor resistente. O mesmo não ocorre para o arranjo T2, que apresentou maior C.V. para os resultados das amostras submetidas à compressão de 45 kN.

Nesse âmbito, através da análise estatística, é possível constatar a eficiência do modelo alternativo de ensaio projetado pela presente pesquisa, o qual resultou não só em padrões consistentes de comportamento mecânico de amostras similares, como também gerou dados de esforços fletores compatíveis entre os arranjos estruturais de base.

Apesar da baixa dispersão dos valores de momento fletor resistente, o mesmo não foi observado para a rigidez rotacional secante ( $k_{n,i}$ ), as quais são apresentadas no APÊNDICE B. Nesse sentido, para o arranjo T1 observou-se um C.V. máximo de 53,8% e mínimo de 1,88%

entre as rigidezes rotacionais das amostras similares. Já para o arranjo T2 observou-se um C.V. máximo de 67,16% e mínimo de 19,34%.

A mesma magnitude de dispersão entre os valores de rigidez rotacional dos arranjos estruturais também foi observada nos trabalhos de Huang *et al.* (2021), Zhao *et al.* (2019) e Firouzianhaij *et al.* (2022). Nesse contexto, Huang *et al.* (2021) destacam que a dispersão dos resultados de rigidez secante já é esperada para modelos de ligação de base de colunas porta-paletes, visto que é característico desses arranjos as folgas de encaixe entre as peças e eventuais deslizes das ligações parafusadas.

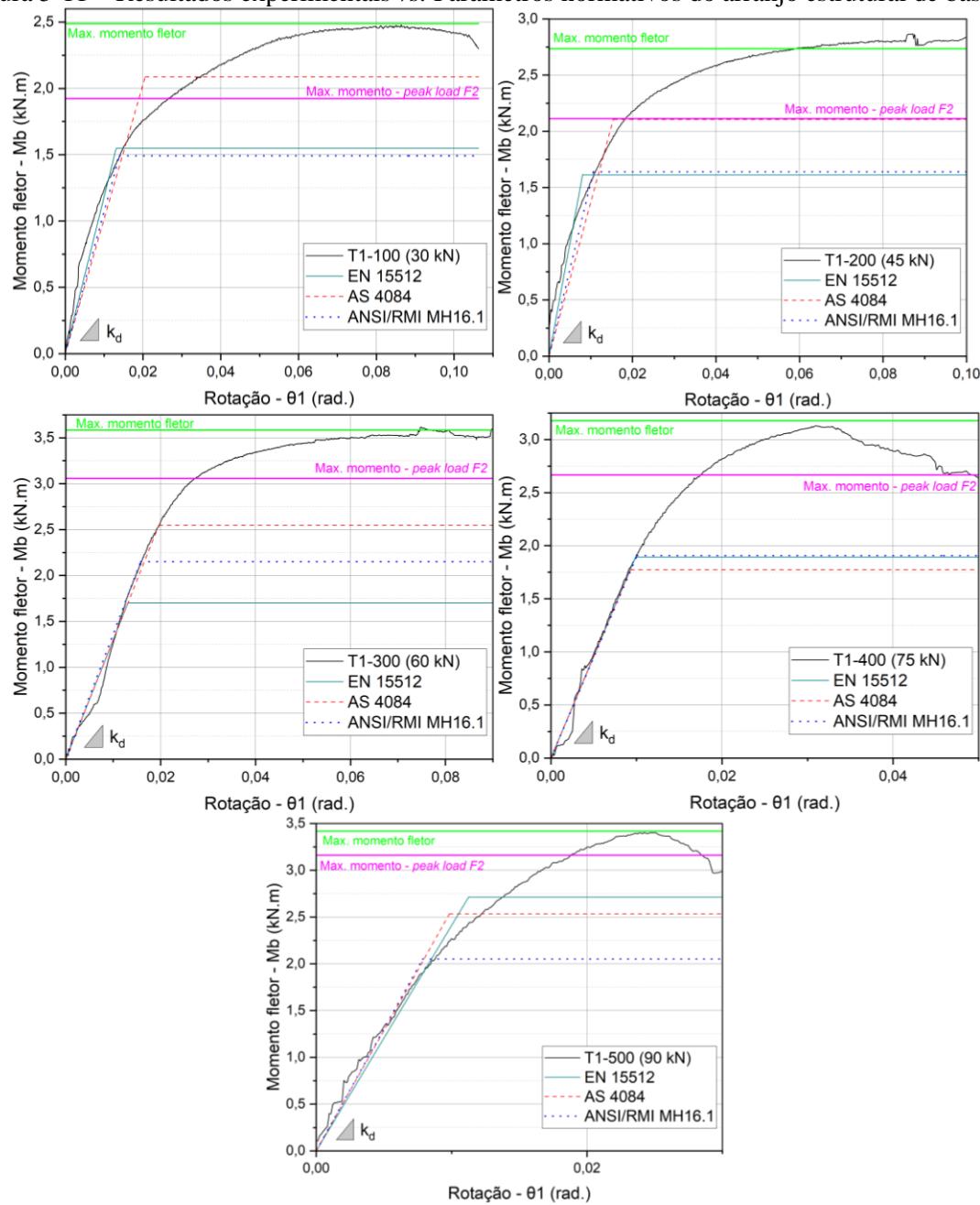
Compreendido a obtenção dos parâmetros normativos de projeto, faz-se relevante avaliar a conformidade dos mesmo com relação aos resultados experimentais. Sendo assim, nos gráficos da Figura 5-11 são apresentados (i) as curvas M-θ experimentais dos arranjos estruturais de base T1, (ii) os parâmetros de projeto segundo as especificações normativas internacionais dadas na Tabela 5-1 e (iii) os valores de momento fletor resistente ' $M_m$ ' segundo os diferentes critérios, i.e., *peak load* de  $F2$  (especificado pela EN 15512:2009) e o máximo momento fletor observado experimentalmente (especificado pela AS 4084:2012).

Conforme ilustrado nos gráficos da Figura 5-11 e resumido na Figura 5-12, os máximos momentos fletores resistentes observados nos ensaios (linha verde dos gráficos) crescem até os resultados do arranjo T1-300, ficando em torno do patamar de 3,3 kN.m para as amostras submetidas a compressões maiores. Nota-se que a partir da força  $F1$  de compressão de 60 kN, as amostram falham por instabilidade na coluna porta-paleta. Portanto, comprehende-se que a resistência do arranjo estrutural de base é diretamente influenciada pela estabilidade da coluna.

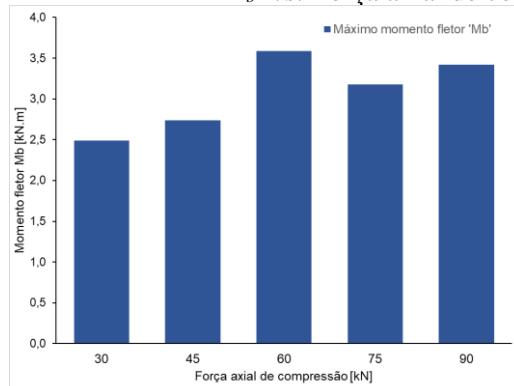
O mesmo comportamento também foi observado no programa experimental de Firouzianhaij *et al.* (2022), os quais afirmam que a tendência do arranjo estrutural de base é reduzir a resistência aos esforços fletores quando a força de compressão gera instabilidades na coluna porta-paleta. À vista disso, os autores afirmam ser essencial para a investigação das ligações de base a compreensão dos fenômenos atrelados à estabilidade da coluna rack, fundamentação abordada no item 2.1 do presente trabalho.

No âmbito dos valores de rigidez rotacional secante da ligação de base T1, de forma geral, com o aumento da força de compressão na amostra houve um aumento da sua rigidez. Todavia, apesar de maiores magnitudes de rigidez e resistência mecânica, as amostras sob força de compressão elevadas entram em colapso com rotações significativamente menores.

Figura 5-11 – Resultados experimentais vs. Parâmetros normativos do arranjo estrutural de base T1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5-12 – Máximo momento fletor ‘ $M_b$ ’ vs. Força axial de compressão – Arranjo T1

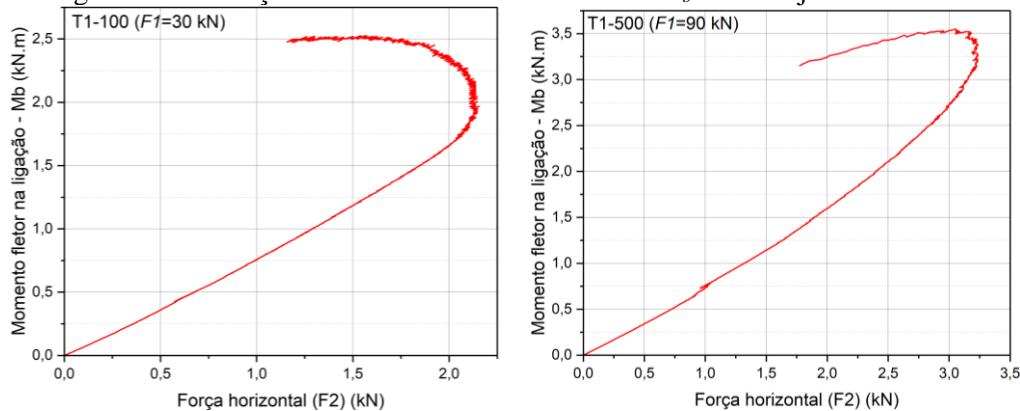
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5-11, é possível observar que entre as amostras sob compressão de 30 kN e 90 kN, a magnitude de rotação na falha reduziu em torno de duas a três vezes. A falha na base perante pequenas rotações representa um alerta para a segurança das estruturas porta-paletes carregadas próximas à capacidade resistente da coluna, visto que essa situação se assemelha às amostras T1-500 (90 kN).

Os gráficos da Figura 5-11 evidenciam os efeitos nos parâmetros de projeto decorrentes dos diferentes critérios de definição dos máximos esforços resistentes de ensaio. Nesse sentido, em concordância com as conclusões de Baldassino e Zandonini (2008), observa-se que o critério da EN 15512:2009, que estabelece o esforço fletor resistente pelo *peak load* de  $F_2$ , torna o momento fletor de projeto demasiadamente conservador frente aos resultados experimentais. Esse conservadorismo pode ser observado principalmente para os resultados dos arranjos T1-100, T1-200 e T1-300.

Portanto, no intuito de compreender as consequências das diferentes especificações normativas na definição de ' $M_{ti}$ ', a Figura 5-13 ilustra os gráficos dos resultados da força horizontal ( $F_2$ ) *versus* o momento fletor nas ligações T1-100 e T1-500, as quais se mostram representativas dos comportamentos observados no restante do programa experimental.

Figura 5-13 – Força horizontal *vs.* Momento fletor ' $M_b$ ' – Arranjo estrutural T1



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse âmbito, a falha das ligações T1-400 e T1-500, ocorrem sob momentos em torno de apenas 5,2% a 14,7% maiores que os momentos fletores no *peak load* de  $F_2$ , comportamento que pode ser observado na Figura 5-13 para a amostra T1-500. Já para ligações sob menores compressões, i.e., T1-100, T1-200 e T1-300, o colapso ocorre sob esforços fletores em torno de 32,5% a 21,7% superiores aos respectivos resultados no *peak load* de  $F_2$ , comportamento exemplificado na Figura 5-13 para a amostra T1-100.

Diante do exposto, em concordância com as análises feitas para a curva  $M_1-M_b$  da Figura 5-9, o comportamento ilustrado na Figura 5-13 indica os limites do desempenho estrutural das ligações que falham por instabilidade na coluna próximos ao *peak load* de  $F2$ . Ou seja, os efeitos de segunda ordem nessas amostras atuam de forma significativa ainda na etapa de comportamento elástico do arranjo estrutural de base, tendo papel decisivo na sua estabilidade e resistência mecânica.

Além disso, conforme ilustrado na Figura 5-13, as amostras T1-100, T1-200 e T1-300 indicam a atuação expressiva do efeito  $P-\Delta$  na etapa inelástica dessas ligações de base. Por isso, conforme conclusões feitas para a curva  $M_1-M_b$  da Figura 5-9, comprehende-se que a curva  $M-\theta$  experimental de amostras sob menores magnitudes de compressão possuem um típico comportamento não linear em seu traçado.

Conforme mencionado no item 3.2, Gilbert e Rasmussen (2011), Roure *et al.* (2016), dentre outros trabalhos da literatura, apontam para as inconsistências em seguir as especificações da EN 15512:2009 para definição do máximo esforço fletor resistente pelo *peak load* de  $F2$ . De fato, o presente programa experimental observou importantes comportamentos mecânicos após o *peak load* de  $F2$ , dentre eles (i) a máxima capacidade resistente aos esforços fletores de todas as amostras de ligação de base, (ii) formação de rótulas plásticas na placa de base, (iii) instabilidades na coluna porta-paleta e (iv) atuação de efeitos de segunda ordem típicos dos porta-paletes na direção do corredor.

Portanto, comprehende-se que as especificações da EN 15512:2009 prejudicam a análise experimental efetiva dos comportamentos característicos da não linearidade física e geométrica das ligações de base de colunas porta-paletes. Esse prejuízo é evidenciado nos parâmetros normativos ilustrados na Figura 5-11 e no traçado dos gráficos da Figura 5-13. Sendo assim, constata-se que as especificações da AS 4084:2012 e ANSI/RMI MH16.1:2021 para definição dos máximos esforços fletores de ensaio trazem maiores benefícios às análises experimentais.

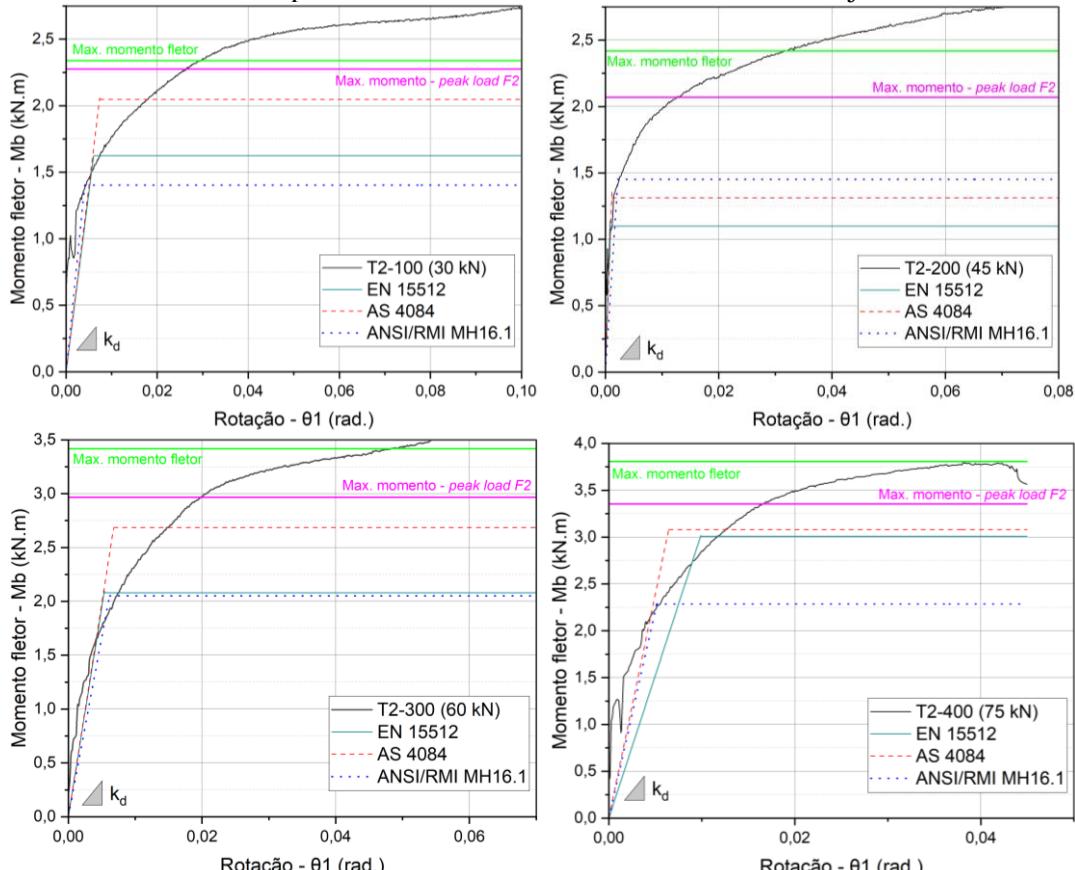
Ademais, observa-se nos gráficos da Figura 5-11 a melhor correlação entre a inclinação inicial da curva  $M-\theta$  experimental e a rigidez rotacional segundo especificações da AS 4084:2012, similaridade evidente principalmente para a amostra T1-500. Faz-se relevante mencionar que, para a AS 4084:2012, os esforços fletores experimentais são ponderados pelo desvio padrão e coeficientes de confiabilidade, por isso, para as amostras T1-400 e T1-500 os valores de ' $M_{rd}$ ' resultaram inferiores aos resultados da EN 15512:2009.

Nesse âmbito, a presente pesquisa notou uma considerável penalização dos momentos fletores de ensaio pelas especificações australianas. Portanto, de conhecimento da recorrente dispersão dos resultados experimentais de ligações de base de porta-paletes seletivos, comprehende-se que um número superior de amostras ensaiadas por arranjo estrutural de base traz melhorias relevantes às análises experimentais.

Por fim, os gráficos da Figura 5-11 também indicam a conformidade entre os dados experimentais e a rigidez rotacional obtida pelas especificações da ANSI/RMI MH16.1:2021, a qual se mostrou bastante similar aos resultados de rigidez da AS 4084:2012. Todavia, a norma americana especifica que os resultados experimentais de máximo esforço fletor devem ser penalizados em 60%, não indicando critérios de confiabilidade como feito pela AS 4084:2012 e EN 15512:2009. Sendo assim, nota-se que ' $M_{rd}$ ' pelas especificações da ANSI/RMI MH16.1:2021 se demonstrou conservador para alguns ensaios, e.g. T1-100, T1-200 e T1-500.

À vista do exposto, de forma similar às análises feitas para o arranjo estrutural de base T1, a Figura 5-14 ilustra os resultados dos parâmetros normativos de projeto para o arranjo estrutural de base T2, retirados das análises apresentadas na Tabela 5-2.

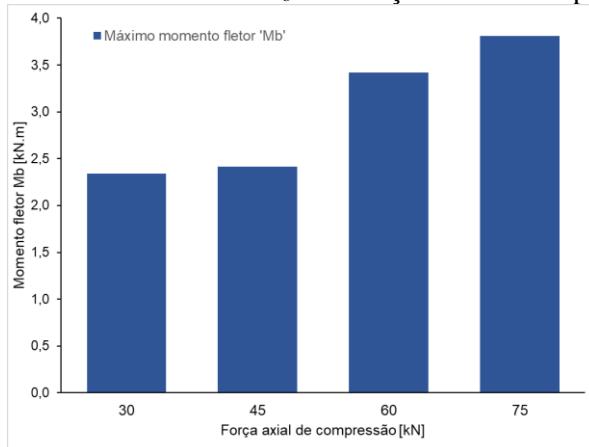
Figura 5-14 – Resultados experimentais vs. Parâmetros normativos do arranjo estrutural de base T2



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse sentido, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 5-14 e resumido na Figura 5-15, os valores máximos de momento fletor observados nas amostras crescem conforme o aumento de força de compressão na coluna. Diferentemente do arranjo estrutural de base T1, as amostras do arranjo T2 apresentaram um aumento na capacidade resistente da amostra T1-400, a qual apresentou falha por instabilidade global de flexo-torção na coluna porta-palete. Ou seja, para o arranjo estrutural de base T2, o colapso por perda de estabilidade não limitou a resistência mecânica observada nos experimentos, fato que ocorre para as amostras do arranjo T1 (Figura 5-12).

Figura 5-15 – Máximo momento fletor ' $M_b$ ' vs. Força axial de compressão – Arranjo T2



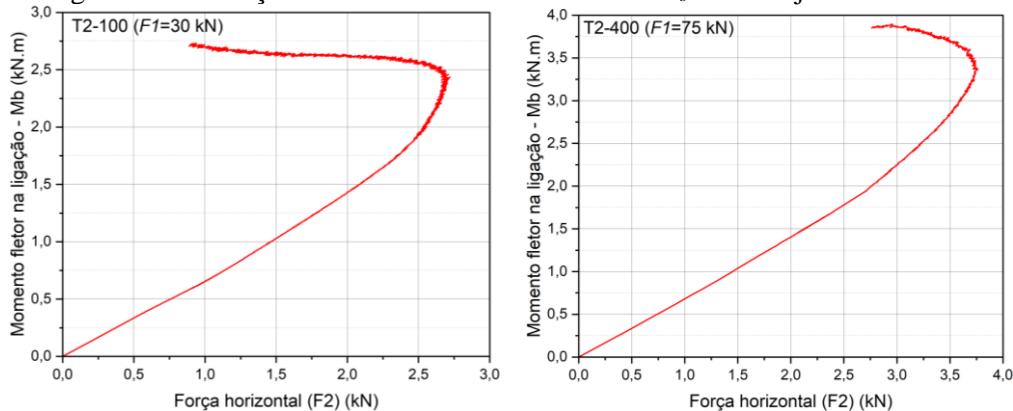
Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando os esforços resistentes experimentais das amostras T1 e T2, Figura 5-12 e Figura 5-15, respectivamente, observa-se a similaridade entre os máximos resultados de ' $M_b$ '. Nesse sentido, o arranjo T1 apresentou uma capacidade máxima de 3,58 kN.m para as amostras T1-300 e o arranjo T2 uma capacidade de 3,81 kN.m para as amostras T1-400.

Conforme mencionado, o arranjo estrutural T1 apresentou uma correlação clara entre (i) os valores de momento fletor máximo, (ii) momento fletor no *peak load* de  $F_2$  e (iii) os comportamentos mecânicos na falha do arranjo estrutural, análise apresentada a partir dos gráficos da Figura 5-13. Todavia, conforme gráficos da Figura 5-14, as mesmas conclusões não são válidas para o arranjo estrutural T2.

Nesse âmbito, os gráficos da Figura 5-16 ilustram os resultados da força horizontal ( $F_2$ ) versus os momentos fletores na ligação dos arranjos estruturais de base T2-100 e T2-400. De forma semelhante, os arranjos estruturais apresentaram um esforço fletor máximo em torno de 11,2% a 17,2% superiores aos esforços no *peak load* de  $F_2$ , sendo que o único arranjo estrutural que não se enquadra nessa faixa é o T2-100, o qual apresentou valor em torno de 6,8% superior.

Figura 5-16 – Força horizontal vs. Momento fletor ‘ $M_b$ ’ – Arranjo estrutural T2



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, em concordância com as conclusões obtidas pela análise da curva  $M_1-M_b$  da Figura 5-10, apesar dos diferentes comportamentos mecânicos na falha das amostras do arranjo estrutural de base T2, observa-se um padrão no comportamento do efeito P-Δ nas amostras. Sendo assim, comprehende-se que, no decrescimento de  $F_2$ , os esforços de segunda ordem superam os esforços fletores devido a força horizontal no topo da coluna, fenômeno que determina a capacidade resistente da ligação de base e confirma as inconsistências das especificações de ensaio da EN 15512:2009.

De forma similar ao arranjo estrutural de base T1, com o aumento da força axial de compressão nas colunas porta-paletes, o arranjo T2 demonstrou crescimento nos valores de rigidez rotacional ( $k_d$ ). No entanto, observa-se pelos gráficos da Figura 5-14 que a correlação entre os dados experimentais e parâmetros normativos não apresenta a similaridade constatada para o arranjo T1 (Figura 5-11).

Além disso, conforme dados da Tabela 5-2, os procedimentos normativos geraram resultados de rigidez rotacional para o arranjo estrutural de base T2 significativamente elevados, quando comparados com os resultados para o arranjo T1. Isso pode ser observado principalmente para os dados de ‘ $k_d$ ’ das amostras T2-200. Diante do exposto, compreendido o comportamento atípico dos arranjos estruturais de base que apresentam esforços torções, o presente trabalho procurou formas alternativas para a reavaliação da rigidez rotacional da ligação de base T2.

Nesse cenário, conforme análise apresentada no item 5.1, o início das curvas  $M-\theta$  experimentais dos arranjos estruturais de base T2 apresentam uma elevação expressiva de momento fletor ‘ $M_b$ ’ sem indicar rotações. Nesse cenário, compreendeu-se que esse comportamento ocorreu em resposta à estabilização das amostras perante os esforços de

compressão. Por esse motivo, o presente trabalho notou inconsistências entre os resultados de rigidez obtidos pela relação bilinear – proposta pela EN 15512:2009 e AS 4084:2012 – e comportamento mecânico do arranjo estrutural de base T2.

A rigidez rotacional é definida como a relação entre momentos fletores e rotações resultantes das deformações na ligação. Nesse sentido, de conhecimento do processo de relação de áreas definido pela curva bilinear, comprehende-se que o trecho inicial da curva M- $\theta$  experimental do arranjo T2 interfere de forma indevida na definição da rigidez rotacional da amostra. Isso pois, o trecho inicial verticalizado da curva M- $\theta$  é resultante do movimento de corpo rígido do arranjo no processo de acomodação e, por esse motivo, não resulta em rotações da amostra. Além disso, um trecho verticalizado da curva M- $\theta$  representa uma rigidez rotacional “infinita”, análogo a uma ligação engastada, comportamento contraditório ao observado nos experimentos do arranjo T2.

Em vista do exposto, comprehende-se que o trecho inicial da curva M- $\theta$  experimental do arranjo T2 não representa o comportamento mecânico das amostras. Por essa razão, os valores de rigidez rotacional dados na Tabela 5-2 e ilustrados na Figura 5-14 são inconsistentes ao desempenho estrutural da ligação de base T2.

Faz-se relevante mencionar que o processo de escorvamento dos ensaios possui como finalidade retirar eventuais folgas existentes no arranjo experimental. Contudo, novamente, a ligação com ancoragem assimétrica apresentou comportamento atípico quando comparada ao arranjo T1. Isso pois, para as amostras T1, o processo de escorvamento se mostrou efetivo, enquanto para o arranjo T2, conforme descrito, as amostras apresentaram notável acomodação das peças mesmo após o escorvamento.

Além disso, as campanhas experimentais da literatura indicam a plotagem da curva M- $\theta$  experimental a partir da aplicação da força de compressão  $F_1$  na amostra, uma vez que, já nessa etapa, o arranjo experimental pode apresentar rotações devido imperfeições geométricas típicas das colunas porta-paletes. Nesse sentido, o presente programa experimental constatou ressalvas para o traçado da curva M- $\theta$  das ligações de base de porta-paletes, uma vez que, conforme observado para o arranjo T2, eventuais folgas e acomodações características da estrutura podem interferir nos resultados iniciais, mesmo após o processo de escorvamento.

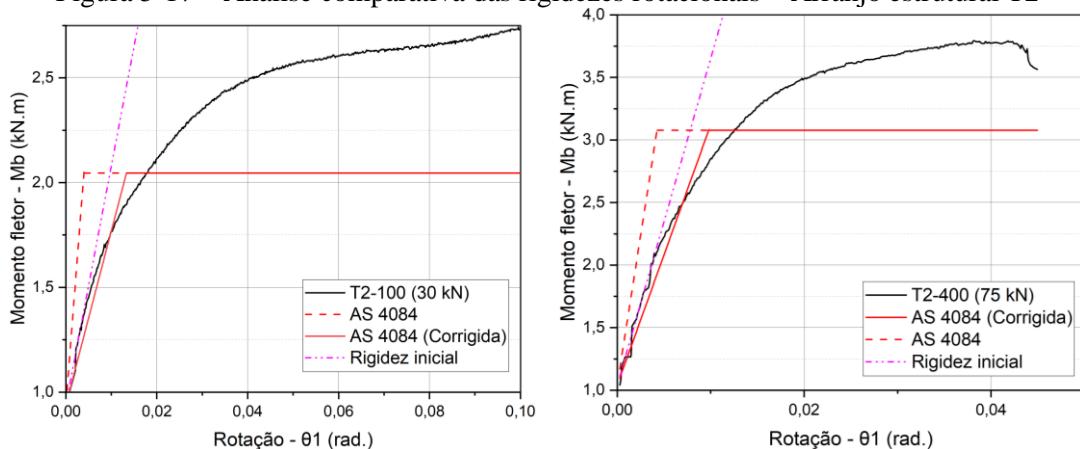
Diante do exposto, a fim de determinar a rigidez rotacional representativa do comportamento mecânico das ligações de base T2, o presente trabalho refez as análises desse

parâmetro desconsiderando o trecho de acomodação da amostra na curva M- $\theta$  experimental. De conhecimento da efetividade das especificações da AS 4084:2012 para obtenção dos parâmetros de projeto do arranjo estrutural de base T1 e das inconsistências das diretrizes da EN 15512:2009, a revisão da rigidez rotacional do arranjo T2 foi realizada apenas para as especificações da norma australiana.

Para tanto, a Figura 5-17 ilustra a forma alternativa apresentada para obtenção da rigidez rotacional dos arranjos T2-100 e T2-400, sendo que os resultados das outras amostras são apresentados no APÊNDICE C. Nota-se que o eixo das ordenadas das curvas M- $\theta$  não se iniciam no zero e os dados atuais de rigidez rotacional são identificados na legenda como ‘AS 4084 (Corrigida)’.

Além disso, de forma análoga ao trabalho de Huang *et al.* (2021), a presente pesquisa fez uma análise comparativa entre os resultados de rigidez rotacional secante segundo especificações da AS 4084:2012 e rigidez inicial determinada pelo traçado da curva M- $\theta$  experimental das amostras. Sendo assim, os gráficos da Figura 5-17 ilustram as análises comparativas das rigidezes para o arranjo T2 e a Tabela 5-3 apresenta a relação entre os resultados.

Figura 5-17 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T2



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5-3 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T2

	RIG. INICIAL [kN.m/rad.]	AS 4084:2012 [kN.m/rad.]	AS 4084:2012 (Corrigida) [kN.m/rad.]
<b>T2-100</b>	114,03	278,36	-59%
<b>T2-200</b>	134,05	1170,37	-89%
<b>T2-300</b>	203,38	395,75	-41%
<b>T2-400</b>	261,13	478,54	-45%

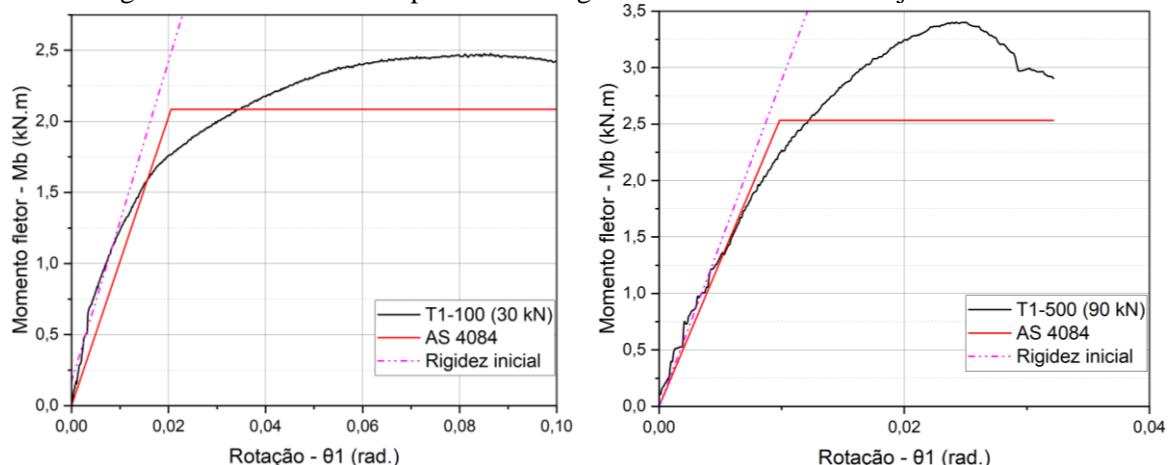
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que, sem as devidas correções feitas pela análise alternativa da curva M-θ experimental T2, exemplificada na Figura 5-17, os valores de rigidez rotacional segundo as especificações normativas da AS 4084:2012 são significativamente contra-segurança, reflexo do traçado verticalizado resultante da acomodação do arranjo T2.

Sendo assim, conforme resultados da Tabela 5-3, a partir das devidas correções na curva M-θ experimental, os resultados de rigidez rotacional de projeto do arranjo T2 se tornam condizentes com o comportamento experimental e a favor da segurança quando comparados com a rigidez inicial das amostras.

Por fim, a Figura 5-18 ilustra as análises comparativas das rigidezes de projeto e inicial para o arranjo T1 e a Tabela 5-4 apresenta a relação entre esses resultados. Nesse cenário, conforme Tabela 5-4 e gráficos da Figura 5-18, o arranjo estrutural de base T1, por não ter apresentado os comportamentos descritos para o arranjo T2, não necessitou de correções no traçado da curva M-θ experimental, uma vez que apresentou resultados de rigidez de projeto a favor da segurança e condizentes com os comportamentos observados em ensaio.

Figura 5-18 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T1



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5-4 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais, AS 4084:2012 – Arranjo estrutural T1

	RIG. INICIAL [kN.m/rad.]	AS 4084:2012 [kN.m/rad.]	
<b>T1-100</b>	112,67	101,51	11%
<b>T1-200</b>	148,13	136,84	8%
<b>T1-300</b>	137,45	129,93	6%
<b>T1-400</b>	202,37	191,11	6%
<b>T1-500</b>	288,94	257,52	12%

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma análoga à análise apresentada na Tabela 5-4, a Tabela 5-5 expõe a relação das rigidezes rotacionais de projeto segundo as normas europeia e americana e a rigidez rotacional inicial obtida dos dados experimentais. Sendo assim, diferentemente das rigidezes de projeto da AS 4084:2012 (Tabela 5-4), observam-se alguns resultados contra-segurança na proposta da EN 15512:2009 e ANSI/RMI MH16.1:2021.

**Tabela 5-5 – Análise comparativa das rigidezes rotacionais – Arranjo estrutural T1**

	<b>RIG. INICIAL [kN.m/rad.]</b>	<b>EN 15512:2009 [kN.m/rad.]</b>		<b>ANSI/RMI MH16.1:2021 [kN.m/rad.]</b>
<b>T1-100</b>	112,67	118,29	-5%	107,10
<b>T1-200</b>	148,13	200,58	-26%	154,44
<b>T1-300</b>	137,45	129,96	6%	136,31
<b>T1-400</b>	202,37	191,41	6%	189,56
<b>T1-500</b>	288,94	241,03	20%	260,87

Fonte: Elaborado pelo autor

No âmbito da norma europeia, a rigidez rotacional secante das amostras T1-100 e T1-200 se apresentaram contra-segurança quando comparadas com os resultados experimentais. Faz-se relevante mencionar que as amostras T1-100 e T1-200 foram limitadas pela desigualdade da Equação (44), conforme descrito na Tabela 5-1. Ou seja, a rigidez rotacional obtida pela relação bilinear especificada na EN 15512:2009 resultou superior à apresentada na Tabela 5-5, evidenciando as inconformidades em definir os parâmetros de projeto a partir do *peak load* de *F2*.

Por fim, observa-se pela Tabela 5-5, que a ANSI/RMI MH16.1:2021 também apresentou resultados contra-segurança para rigidez de projeto da amostra T1-200. Nesse sentido, de conhecimento da típica variação nas respostas estruturais dos diferentes modelos de ligação de base de porta-paletes, comprehende-se que o fator de segurança padronizado em 0,6 da norma americana pode não resultar em parâmetros seguros para alguns modelos de arranjo estrutural de base, como observado para amostra T1-200.

### 5.3 ROTAÇÕES LIMITES DA LIGAÇÃO DE BASE

Conforme descrito no Capítulo 2, a complexidade da análise estrutural de porta-paletes seletivos recai na investigação da estabilidade do pórtico paralelo ao corredor. Nesse sentido, de conhecimento da semirrigidez característica das ligações de base de colunas porta-paletes, comprehende-se que a magnitude de rotação dessa ligação é parâmetro fundamental para

determinação dos efeitos de segunda ordem e, consequentemente, análise da influência do arranjo estrutural de base na estabilidade global do porta-paletes seletivo.

De forma geral, as normas não especificam limites de rotação de projeto para a ligação de base. Isso pois, conforme elucidado no Capítulo 3, a variabilidade de modelos de ligação torna complexa a padronização de uma formulação para obtenção dos limites da resposta estrutural do elemento. Todavia, a ANSI/RMI MH16.1:2021 especifica a Equação (15) – ‘ $\theta_b = (C_d(1+\alpha_s)M_b)/k_d \leq \theta_{máx}$ ’ – para determinação do limite de rotação em serviço da ligação de base de colunas porta-paletes.

Nesse sentido, a Tabela 5-6 apresenta os resultados de limite de rotação em serviço para o pórtico na direção do corredor dos arranjos estruturais de base avaliados experimentalmente no presente trabalho. Faz-se relevante mencionar que os parâmetros de momento fletor resistente ( $M_b$ ) e rigidez rotacional ( $k_d$ ) foram retirados das análises experimentais obtidas pelo próprio procedimento normativo da ANSI/RMI MH16.1:2021, apresentados na Tabela 5-1 e Tabela 5-2.

Tabela 5-6 – Rotação limite pela ANSI/RMI MH16.1:2021

AMOSTRA	$\theta_b$ [rad.]	$\theta_c$ [rad.]	
<b>T1-100</b>	0,316	0,070	<b>350%</b>
<b>T1-200</b>	0,241	0,045	<b>431%</b>
<b>T1-300</b>	0,358	0,064	<b>460%</b>
<b>T1-400</b>	0,228	0,030	<b>649%</b>
<b>T1-500</b>	0,179	0,024	<b>656%</b>
<b>T2-100</b>	0,093	0,049	<b>89%</b>
<b>T2-200</b>	0,050	0,034	<b>48%</b>
<b>T2-300</b>	0,140	0,049	<b>186%</b>
<b>T2-400</b>	0,117	0,038	<b>207%</b>

**θ<sub>b</sub>:** Rotação limite de serviço segundo a ANSI/RMI MH16.1:2021

**θ<sub>c</sub>:** Rotação observada no colapso da ligação

Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, devido à falta de especificações por parte da norma americana, a determinação do fator de amplificação das cargas gravitacionais ( $\alpha_s$ ) foi feita com base nos resultados das análises numéricas de Branquinho (2021). Nesse âmbito, a autora avaliou, segundo as especificações da ANSI/AISI S100:2020, a deslocabilidade máxima de um porta-paleta seletivo irregular. Para tanto, Branquinho (2021) obteve o valor de 3,13 para a relação entre deslocamentos horizontais máximos resultantes de uma análise de primeira e segunda ordem do pórtico, valor que foi adotado para ‘ $\alpha_s$ ’ na presente pesquisa. Por fim, a Tabela 5-6

compara os valores de rotação limite obtidos pela especificação analítica da ANSI/RMI MH16.1:2021 e os dados experimentais observados no colapso do arranjo estrutural de base.

Observa-se pela análise da Tabela 5-6, que os resultados de rotação máxima admissíveis ( $\theta_b$ ) da proposta da norma americana resultaram contra-segurança quando comparados com os valores de rotação de colapso do arranjo estrutural de base, chegando a valores 656% superiores aos resultados experimentais.

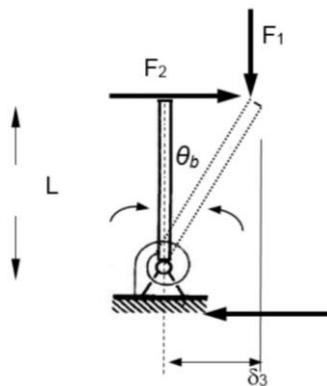
De conhecimento da diferença significativa entre os modelos de ligação de base de fabricantes norte americanos e as ligações avaliadas no presente trabalho, comprehende-se que uma das possíveis justificativas para os resultados contra-segurança de rotação admissível ' $\theta_b$ ' da Tabela 5-6 podem estar atrelados às típicas diferenças de fabricação do elemento.

No âmbito da estabilidade do pórtico na direção do corredor, Firouzianhaij *et al.* (2022) afirmam que uma forma de determinar um limite seguro de rotação da ligação de base é observar os resultados experimentais para o *peak load* de  $F_2$ . Os autores explicam que a rotação no máximo esforço fletor resistente de primeira ordem ( $M_1$ ) é um limite seguro para a resistência mecânica do arranjo estrutural de base e para a estabilidade do sistema momento resistente.

Nesse cenário, Firouzianhaij *et al.* (2022) propõem uma análise de estabilidade através do Princípio da Mínima Energia Potencial. Para tanto, a Equação (53) determina a energia potencial total do sistema estático ilustrado na Figura 5-19, o qual representa de forma simplificada o arranjo estrutural de base.

$$U_T = U_I + U_E = \frac{1}{2}M_B(\theta)\theta - F_1L(1 - \cos(\theta)) - \frac{1}{2}F_2\delta_3 \quad (53)$$

Figura 5-19 – Sistema estático da análise de estabilidade de Firouzianhaij *et al.* (2022)



Fonte: Firouzianhaij *et al.* (2022)

Na Equação (53) ' $U_I$ ' e ' $U_E$ ' indicam a energia interna e externa do sistema, respectivamente. Considerando a coluna como uma barra rígida, tem-se que ' $\delta_3 = \theta L$ '. Além

disso, conforme observado nos gráficos da curva M-θ experimentais (Figura 5-1 e Figura 5-2) as rotações dos arranjos estruturais de base são inferiores à 0,1 rad. Ou seja, por se tratar de um sistema submetido à pequenas deformações, a simplificação ‘ $\text{sen}(\theta) = \theta$ ’ é válida. Portanto, o equilíbrio estático é obtido respeitando a Equação (54).

$$\frac{\partial U_T}{\partial \theta} = 0 \quad (54)$$

Sendo assim, conforme Equação (53) e de conhecimento que ‘ $M_1 = F_1 L$ ’, obtém-se a Equação (55).

$$\frac{1}{2} (M_B(\theta) + M_B'(\theta)\theta) - \frac{1}{2} M_1 = F_1 L \text{sen}(\theta) \cong F_1 L \theta \quad (55)$$

Sendo assim, a rotação limite para a estabilidade do sistema ( $\theta_{ult}$ ) é obtida segundo a desigualdade da Equação (56).

$$\theta_{ult} \leq \frac{(M_B(\theta) - M_1) + M_B'(\theta)\theta}{2LF_1} \quad (56)$$

Além disso, sabendo que ‘ $M_B(\theta) - M_1 = F_1 \delta_3 \cong F_1 L \theta$ ’ a Equação (57) é então obtida.

$$M_B'(\theta) \geq F_1 L \quad (57)$$

Para exemplificar a formulação de ‘ $\theta_{ult}$ ’, a Equação (58) demonstra o cálculo para o arranjo estrutural de base T1-100. Nesse sentido, conforme gráfico da Figura 5-9, o máximo esforço fletor ‘ $M_1$ ’ é 1,43 kN.m, o qual corresponde à uma rotação de 0,026 radianos.

$$\theta_{ult} = 0,026 \leq \frac{(1,969 - 1,430)kN \cdot m + 25,390 \cdot 0,02604}{2 \cdot 30 \text{ kN} \cdot 0,665 \text{ m}} = 0,301 \quad (58)$$

Portando, conforme Equação (58), determinar um limite de rotação pelo *peak load* de  $F_2$  é uma forma segura, em termos de estabilidade, de estabelecer um critério de serviço para o arranjo estrutural de base.

Nesse cenário, a Tabela 5-7 apresenta os resultados de (i) rotação limite ( $\theta_{ult}$ ) obtidas pela análise de estabilidade proposta por Firouzianhaij *et al.* (2022), (ii) rotação no *peak load* de  $F_2$  ( $\theta_{F2}$ ) e (iii) rotação na falha das ligações ( $\theta_c$ ).

Sendo assim, observa-se que os resultados da análise de estabilidade proposta por Firouzianhaij *et al.* (2022) se encontram a favor da segurança quando comparados com os dados experimentais de ‘ $\theta_c$ ’. Além disso, os resultados de ‘ $\theta_{ult}$ ’ confirmam a hipótese dos autores de definir ‘ $\theta_{F2}$ ’ como um parâmetro limite de segurança para a avaliação da estabilidade do arranjo estrutural de base.

Tabela 5-7 – Rotações experimentais e pela análise de estabilidade

	<b>T1-100</b>	<b>T1-200</b>	<b>T1-300</b>	<b>T1-400</b>	<b>T1-500</b>
$\theta_{F2}$	0,026	0,023	0,029	0,021	0,016
$\theta_{ult}$	0,030	0,026	0,029	0,024	0,018
$\theta_c$	0,070	0,045	0,064	0,030	0,024
	<b>T2-100</b>	<b>T2-200</b>	<b>T2-300</b>	<b>T2-400</b>	
$\theta_{F2}$	0,028	0,011	0,012	0,015	
$\theta_{ult}$	0,029	0,011	0,013	0,017	
$\theta_c$	0,049	0,034	0,049	0,038	

$\theta_{F2}$ : Rotação no *peak load* de  $F2$ ;

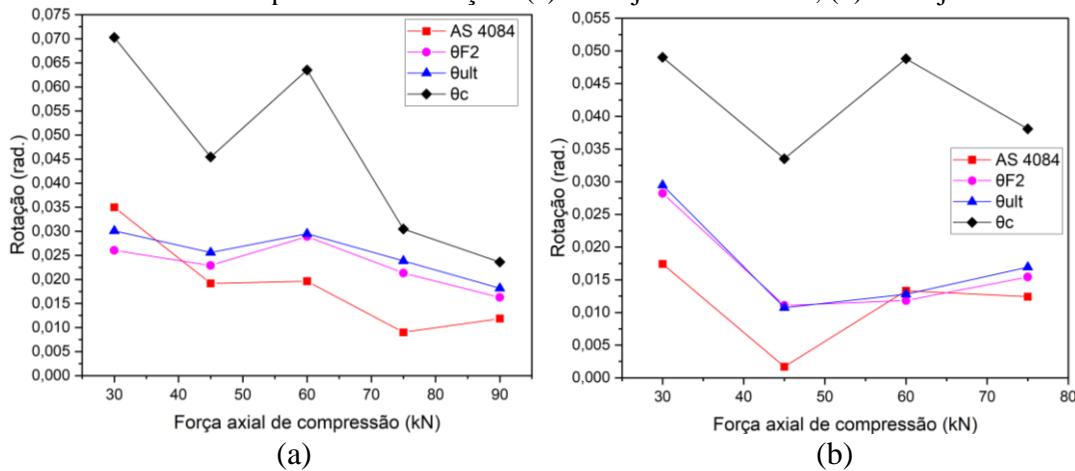
$\theta_{ult}$ : Rotação pela análise de estabilidade;

$\theta_c$ : Rotação no colapso do arranjo estrutural de base;

Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 5-20 ilustram a análise comparativa das rotações apresentadas na Tabela 5-7 e rotações referentes ao momento fletor de projeto resultantes das especificações da AS 4084:2012 para o arranjo T1 e T2, respectivamente.

Figura 5-20 – Análise comparativa das rotações (a) Arranjo estrutural T1; (b) Arranjo estrutural T2



Fonte: Elaborado pelo autor

Para ambos os arranjos estruturais de base, observam-se diferenças significativas entre os valores de rotação no colapso da ligação ( $\theta_c$ ) e as obtidas pela análise teórica de estabilidade ( $\theta_{ult}$ ). Portanto, conforme Figura 5-20, e de conhecimento das simplificações adotadas na análise do esquema estático da Figura 5-19, torna-se evidente a relevância da resistência mecânica desempenhada no regime pós-crítico da instabilidade de primeira espécie do arranjo estrutural de base. Ou seja, observa-se que fenômenos como, plastificação do aço, não linearidade local da barra e o comportamento não linear da rigidez da ligação de base, fazem com que os resultados de ' $\theta_{ult}$ ' não se assemelhem com ' $\theta_c$ ', observado experimentalmente.

Além disso, a partir da Figura 5-20, observa-se que a rotação de projeto obtida pelas especificações da norma australiana, no geral, apresenta resultados a favor da segurança quando

comparados com os dados de ‘ $\theta_{ult}$ ’ da análise de estabilidade, com exceção dos arranjos T1-100 e T2-300.

No âmbito da resposta estrutural do arranjo T2, à medida que a força de compressão aumenta, o gráfico da Figura 5-20 (b) revela um padrão distinto no comportamento das rotações em comparação ao observado para o arranjo T1. Conforme o esperado, as amostras T1 exibiram uma redução clara de ‘ $\theta_c$ ’ com o crescimento de  $F1$ . No entanto, no caso do arranjo T2, as rotações mantiveram-se consistentes em uma faixa entre 0,03 e 0,05 rad. Portanto, nota-se que a presença de torção no arranjo estrutural de base influencia também nos comportamentos da rotação observada no colapso das ligações.

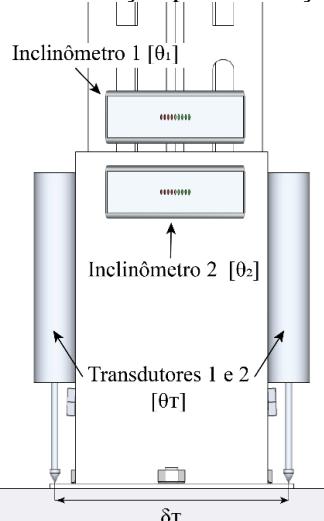
As rotações resultantes do arranjo estrutural de base submetido a esforços fletores representam um dos parâmetros fundamentais na avaliação dos impactos da ligação na amplificação dos esforços de segunda ordem e, consequentemente, na estabilidade do porta-paleta seletivo na direção do corredor. Nesse sentido, de conhecimento dos recorrentes acidentes por falha nas colunas próximas à base – conforme elucidado no Capítulo 2 – comprehende-se a relevância em se investigar formas seguras de se determinar as rotações limites para estabilidade dos arranjos estruturais de base dos porta-paletes seletivos.

#### 5.4 AVALIAÇÃO DAS PARCELAS DE ROTAÇÃO DA LIGAÇÃO DE BASE

Conforme elucidado no Capítulo 3, um importante avanço nas investigações sobre ligações de base de colunas porta-paletes foi a descrição da rotação desse elemento pela composição de 4 parcelas principais, as quais são identificadas como (i) rotação por deformação do piso de concreto ( $\theta_{pc}$ ), (ii) rotação por flexão do *bracket* ( $\theta_{br}$ ), (iii) rotação e deformações locais da coluna ( $\theta_{co}$ ) e (iv) rotação da placa de base por formação de rótulas plásticas ( $\theta_{rp}$ ).

Nesse sentido, com base nas conclusões dos trabalhos de Gilbert e Rasmussen (2009) e Gilbert e Rasmussen (2011), o presente programa experimental propôs a avaliação da influência das diferentes parcelas de rotação da ligação de base através da análise dos comportamentos ilustrados na Figura 4-6. Sendo assim, a Figura 5-21 resume os equipamentos de medição detalhados na Figura 4-6 e identifica as variáveis que compõem a análise das rotações relativas do arranjo estrutural de base.

Figura 5-21 – Equipamentos de medição para avaliação das parcelas de rotação



Fonte: Elaborado pelo autor

À vista do exposto, as Equações (59) à (61) descrevem as rotações que compõem as análises do presente item. Faz-se relevante mencionar que a segmentação das rotações relativas descritas nas equações apresentadas não ocorre de forma íntegra no experimento, todavia, comprehende-se que a contribuição majoritária nas medições dos equipamentos ocorre conforme descrito nas formulações (59) à (61).

$$\theta_T = \theta_{pc} + \theta_{rp} = \arctan\left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{\delta_t}\right) \quad (59)$$

$$\theta_{br} = \theta_2 - \theta_T \quad (60)$$

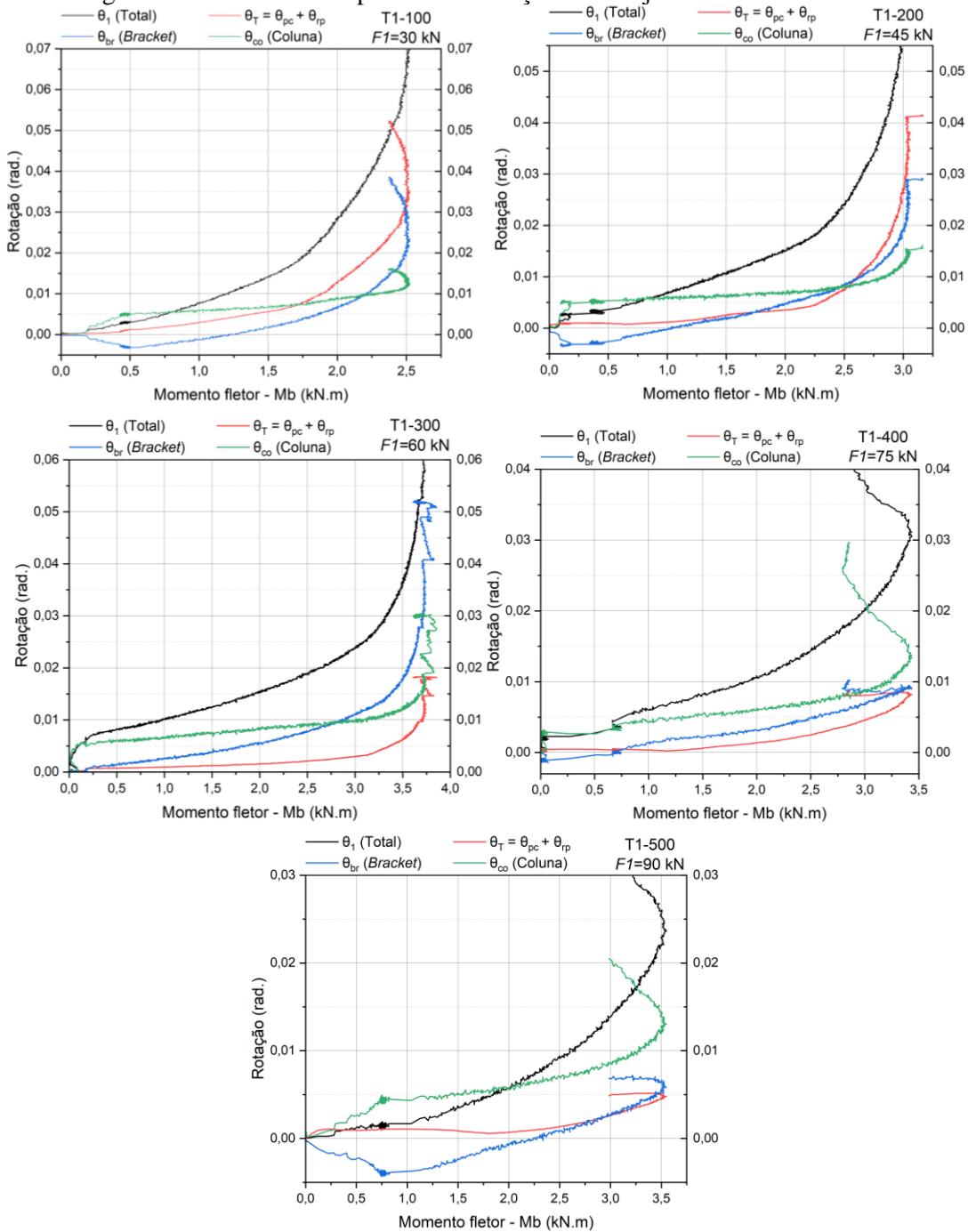
$$\theta_{co} = \theta_1 - \theta_2 \quad (61)$$

Em vista do exposto, a Figura 5-22 ilustra os resultados das parcelas de amostras do arranjo estrutural de base T1. Nesse sentido, os gráficos constam com os valores de momento fletor ' $M_b$ ' no eixo das abscissas e os valores das respectivas rotações no eixo das ordenadas. Conforme legenda da Figura 5-22, são apresentados os dados de rotação total da ligação ( $\theta_l$ ) – inclinômetro 1 –, os valores de rotação aferidos pelos transdutores 1 e 2 ( $\theta_t$ ) – Equação (59) –, rotação do bracket ( $\theta_{br}$ ) – Equação (60) – e rotação da coluna ( $\theta_{co}$ ), Equação (61).

Sendo assim, conforme gráficos da Figura 5-22, importantes comportamentos são observados à medida que a força de compressão no arranjo T1 aumenta. Conforme esperado, para as ligações T1-100 e T1-200, observa-se a contribuição majoritária das rotações ' $\theta_t$ ', i.e., parcelas de rotação do bloco de concreto e da placa de base. Nesse cenário, para ambas as amostras, nota-se que a parcela de rotação da coluna permanece em um patamar com poucas variações ao longo do experimento, indicando alterações relevantes apenas no fim do ensaio.

Além do mais, os gráficos dos arranjos T1-100 e T1-200, ilustrados na Figura 5-22, evidenciam a contribuição efetiva da rotação do *bracket* ( $\theta_{br}$ ) na rotação total da ligação.

Figura 5-22 – Gráficos de parcelas de rotação – Arranjo estrutural de base T1



Fonte: Elaborado pelo autor

As análises da Figura 5-22 para as amostras submetidas a menores magnitudes de compressão concordam os comportamentos mecânicos observados no experimento. Isso pois, conforme descrito no item 5.1, as amostras T1-100 e T1-200 falham por formação de rótula plástica. Além disso, através do ensaio de líquido penetrante, ilustrado na Figura 5-5,

evidenciou-se a concentração de tensões na ligação soldada que une o *bracket* à placa de base, resultado que justifica a contribuição expressiva de ' $\theta_{br}$ ' para as amostras T1-100 e T1-200.

Portanto, conforme análises feitas para o ensaio não destrutivo, comprehende-se que a parcela de ' $\theta_{br}$ ' para as amostras T1-100 e T1-200 pode estar relacionada ao rasgamento dos filetes de solta do *bracket*, e não necessariamente à deformação do elemento aos esforços de flexão.

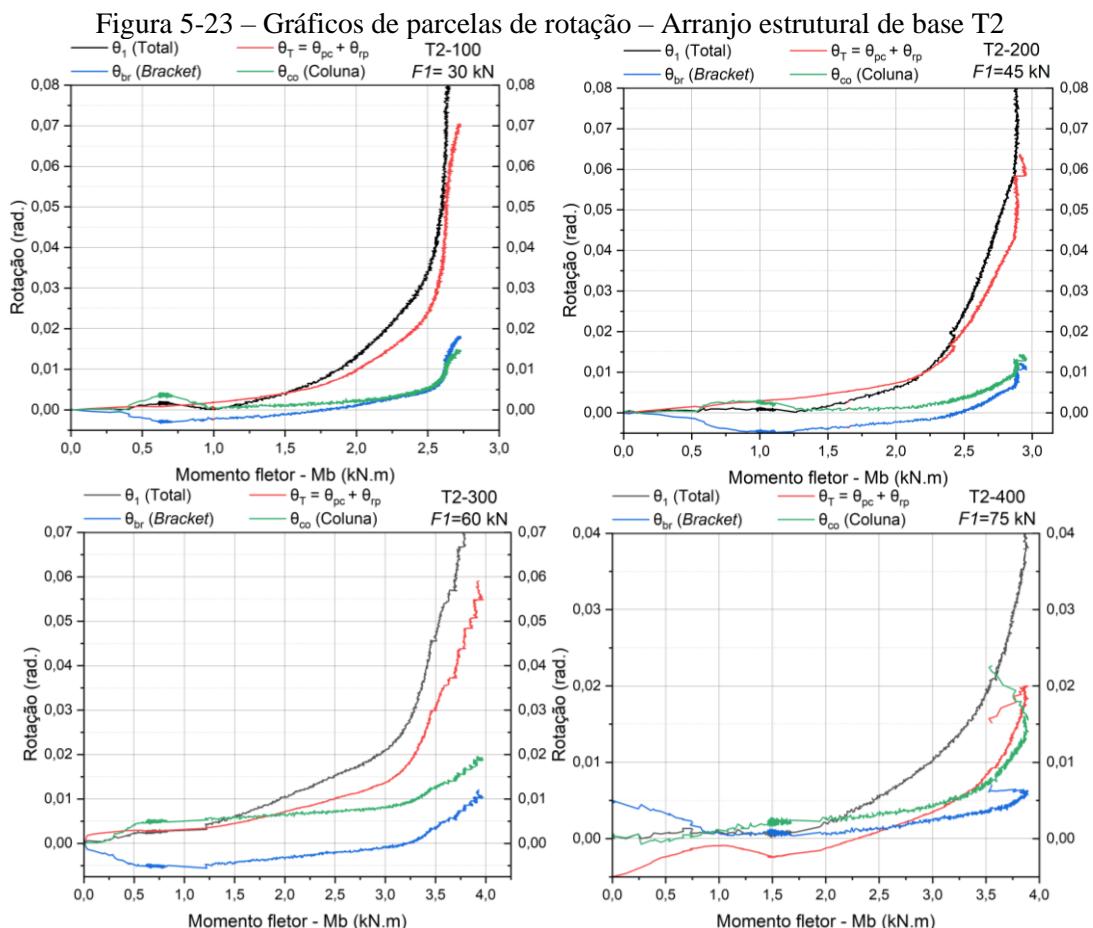
Em sequência, observa-se pelo gráfico da Figura 5-22, a alteração significativa das parcelas de rotação para a amostra T1-300. Nesse âmbito, a rotação do *bracket* do arranjo demonstrou contribuição significativo ao longo de todo o experimento. Já a rotação ' $\theta_t$ ' cresce e se faz relevante a partir do momento fletor de 2.5 kN.m, ou seja, próximo do fim do experimento. Por fim, ' $\theta_{co}$ ' tem um aumento expressivo no início do ensaio, o qual é seguido de um crescimento sucinto até próximo do momento fletor de 2.5 kN.m, a partir do qual ' $\theta_{co}$ ' se torna significativo nas rotações totais da ligação.

Diante do exposto, as análises das parcelas de rotação da amostra T1-300 trazem maiores esclarecimentos ao complexo comportamento experimental observado para o arranjo. Conforme elucidado, as amostras T1-300 apresentaram a interação entre falha por formação de rótula plástica na placa de base e por instabilidades na coluna. Os ensaios de líquido penetrante também evidenciaram a fissuração das soldas da ligação. Sendo assim, de conhecimento do papel fundamental do *bracket* na transferência dos esforços, comprehende-se que o aumento de  $F1$  resultou na maior contribuição de ' $\theta_{br}$ ' na falha da ligação e, consequentemente, na maior mobilização da coluna na rigidez da ligação. Além disso, de forma similar às análises das amostras T1-100 e T2-200, nota-se que a fissuração da solda tem parcela majoritária na composição de ' $\theta_{br}$ '.

Por fim, para as amostras T1-400 e T1-500, submetidas a compressão de 75 kN e 90 kN, respectivamente, nota-se pela Figura 5-22 as parcelas de rotação da ligação que também concordam com os comportamentos mecânicos observados em ensaio. Nesse sentido, a falha por instabilidade na coluna porta-paleta determinou que ' $\theta_{co}$ ' se apresente como a rotação principal do arranjo estrutural de base T1-400 e T1-500. Além disso, observa-se que ' $\theta_{br}$ ' e ' $\theta_t$ ' apresentaram comportamentos e valores similares, principalmente no colapso da ligação.

Em sequência, no âmbito do arranjo estrutural de base T2, a Figura 5-23 apresenta a análise das parcelas de rotação dessas amostras. Diferentemente do arranjo estrutural de base

T1, o arranjo T2 não apresenta um padrão no comportamento das parcelas de rotação que coincide com os diferentes modos de falha observados experimentalmente.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 5-23, de forma geral, exibem um comportamento similar entre si. Sendo assim, observa-se a presença significativa de ' $\theta_t$ ' em todos os arranjos, inclusive na amostra T2-400, a qual falhou por instabilidade de flexo-torção na coluna. Verifica-se, portanto, que a presença de esforços torções no arranjo estrutural de base altera significativamente a composição das parcelas de rotação da ligação.

As rotações do *bracket* ( $\theta_{br}$ ) demonstram ser a parcela de menor impacto nas rotações totais dos arranjos T2, sendo mais expressiva para a amostra T2-100 e menos para a T2-400. A participação ínfima de ' $\theta_{br}$ ' nas ligações assimétricas concorda com os resultados observados no ensaio de líquido penetrante para amostras dessa ligação, exemplificado na Figura 5-5, o qual demonstrou um menor rasgamento dos filetes de solda.

Por fim, a parcela de rotação na coluna ( $\theta_{co}$ ) se torna significativa apenas para as amostras T2-300 e T2-400. De forma similar ao arranjo T1-300, a ligação T2-300 apresenta um aumento de ' $\theta_{co}$ ' no início do ensaio, seguido de um patamar nos valores da rotação, os

quais retornam a crescer próximos à finalização do experimento. Já para a amostra que falhou por instabilidade de flexo-torção na coluna porta-paleta (T2-400), o gráfico da Figura 5-23 exibe a contribuição efetiva de ' $\theta_{co}$ ', juntamente com as rotações ' $\theta_t$ ', na composição da rotação total da ligação de base.

A compreensão das parcelas de rotação que compõem o comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos é fundamental para o desenvolvimento de modelos mecânicos que pretendem prever a rigidez rotacional do elemento. Nesse sentido, o Capítulo 3 apresenta algumas propostas analíticas da literatura que procuram elucidar a rigidez de projeto das ligações de base para a análise estrutural do porta-paleta na direção do corredor.

Conforme descrito no quadro da Figura 3-8, as propostas analíticas de rigidez rotacional do arranjo estrutural de base de porta-paletes consideram em suas formulações a contribuição de diferentes parcelas de rotação. Nesse sentido, os métodos analíticos consideram a contribuição da rotação devido deformações no concreto ( $\theta_{pc}$ ) e coluna porta-paleta ( $\theta_{co}$ ). Portanto, parcelas de rotações que se demonstraram fundamentais no presente programa experimental não são avaliadas pelas propostas analíticas da literatura, i.e., rotação do *bracket* ( $\theta_{br}$ ) e rotação devido formação de rótulas plásticas ( $\theta_{rp}$ ).

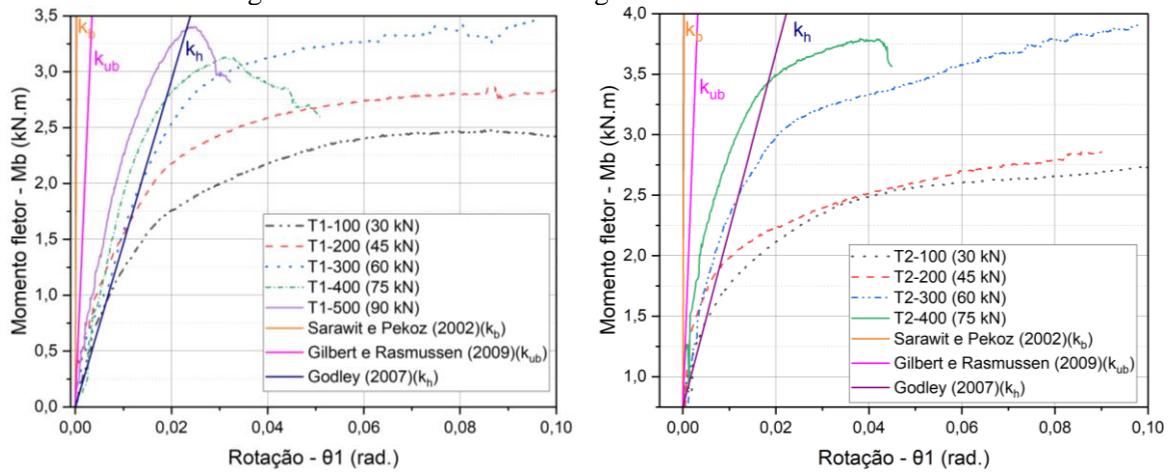
Nesse cenário, a fim de avaliar a adequabilidade das propostas analíticas de rigidez rotacional, a Figura 5-24 ilustra os resultados teóricos e experimentais para ambos os arranjos avaliados experimentalmente. Sendo assim, os gráficos da Figura 5-24 exibem as curvas M- $\theta$  experimentais e os resultados de rigidez rotacional (i) pelo método de Sarawit e Pekoz (2002) – ' $k_b$ ', dado pela Equação (3) –; (ii) pela proposta de Gilbert e Rasmussen (2009) – ' $k_{ub}$ ', dado pela Equação (7) –; e (iii) pelo método de Godley (2007), ' $k_h$ ' dado pela Equação (8).

De forma geral, observa-se pela Figura 5-24 os resultados elevados de rigidez rotacional ' $k_b$ ' e ' $k_{ub}$ ' retirados do trabalho de Sarawit e Pekoz (2002) e Gilbert e Rasmussen (2009), respectivamente. Na formulação de Sarawit e Pekoz (2002), os autores consideram apenas a parcela de rotação devido deformações no concreto. Já o método analítico de Gilbert e Rasmussen (2009) adota a formulação de Sarawit e Pekoz (2002) acrescida da parcela de rotação por deformações na coluna porta-paleta. Por isso, conforme esperado, os resultados de ' $k_b$ ' se apresentam superiores à ' $k_{ub}$ '.

Portanto, os resultados elevados de rigidez rotacional ' $k_b$ ' e ' $k_{ub}$ ' podem ser justificados pela resistência à compressão das amostras de bloco de concreto, apresentadas na Tabela 4-2, e

pela ausência de consideração da rotação do *bracket* e da placa de base da ligação, parcelas que se demonstraram significativas no comportamento mecânico das amostras.

Figura 5-24 – Gráficos M-θ e rigidezes analíticas da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

De fato, diferentemente do presente trabalho, o estudo experimental de Gilbert e Rasmussen (2009) não aponta a contribuição do *bracket* no comportamento de falha das ligações de base. Nesse sentido, as ligações avaliadas pelos autores (Figura 3-24) apresentam o filete de solda envolvendo todo o perímetro do *bracket*. Portanto, de conhecimentos dos resultados do ensaio de líquido penetrante realizados na presente pesquisa, uma possível justificativa para a menor contribuição do *bracket* nas rotações dos ensaios de Gilbert e Rasmussen (2009) é a maior extensão do filete de solda das amostras dos autores. Consequentemente, as rigidezes dos arranjos estruturais de base ensaiados por Gilbert e Rasmussen (2009) se apresentaram condizentes com os resultados analíticos de ‘ $k_{ub}$ ’.

Por fim, diferentemente da análise de ‘ $k_b$ ’ e ‘ $k_{ub}$ ’, o resultado de rigidez advindo da formulação de Godley (2007) se apresentou conservador quando comparado aos resultados experimentais. Nesse sentido, conforme ilustrado na Figura 5-24, ‘ $k_h$ ’ se apresentou similar aos resultados de T1-100 e T2-100, ambos arranjos submetidos à compressão de 30 kN. Godley (2007) afirma que rigidezes rotacionais superiores à ‘ $k_h$ ’ podem ser simuladas através de uma ligação de base engastada para análises estruturais do porta-paleta seletivo na direção do corredor. Nesse sentido, apesar dos comportamentos mecânicos observados no presente ensaio não concordarem com as conclusões de Godley (2007), faz-se necessário uma análise dos efeitos da rigidez rotacional da base na estabilidade do sistema momento resistente para maiores esclarecimentos.

À vista do exposto, o presente trabalho não atestou a adequabilidade das propostas analíticas para definição da rigidez rotacional dos arranjos estruturais de base avaliados

experimentalmente. Sendo assim, conforme gráficos da Figura 5-22 e Figura 5-23, notam-se que comportamentos não negligenciáveis na rotação do arranjo T1 e T2 não são abordados pelos métodos analíticos. Portanto, torna-se evidente a relevância do conhecimento das parcelas de rotações na determinação de um modelo mecânico representativo do comportamento mecânico do arranjo estrutural de base.

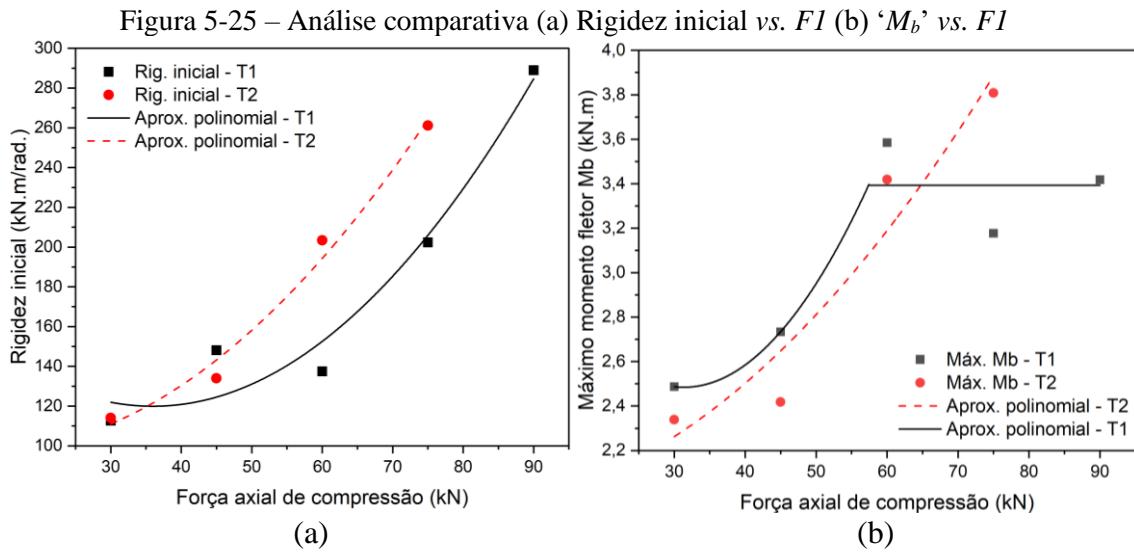
## 5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS ARRANJOS ESTRUTURAIS DE BASE

Diante das análises realizadas no Capítulo 5, torna-se evidente a diferença significativa no comportamento mecânico dos arranjos estruturais de base T1 e T2. Nesse sentido, o presente item procura fundamentar as distinções observadas experimentalmente para o arranjo de ancoragem assimétrica em relação ao arranjo simétrico.

Inicialmente, a presente pesquisa propôs o estudo da ligação T1 como arranjo estrutural de base padrão dos experimentos, uma vez que a expectativa era de que a ancoragem simétrica de 4 barras proporcionasse maior resistência mecânica e rigidez rotacional. Todavia, diferentemente do previsto, as análises experimentais indicaram uma certa semelhança no desempenho estrutural dos arranjos T1 e T2. Além disso, de maneira geral, o arranjo T2 exibiu rigidezes rotacionais iniciais ligeiramente superiores em comparação com as ligações T1.

Em contraste à semelhança nos valores de resistência aos esforços fletores, os modos de falha e a análise dos efeitos de segunda ordem do arranjo T2 mostraram-se significativamente distintos em relação às amostras T1. Portanto, comprehende-se que a presença de torção nas amostras e, consequentemente, o modo de instabilidade característico do arranjo estrutural de base, alteram o comportamento mecânico da ligação.

Nesse âmbito, visando realizar uma análise comparativa dos arranjos estruturais de base ensaiados, a Figura 5-25 (a) e (b) ilustram, respectivamente, os gráficos que relacionam a rigidez inicial e o máximo momento fletor ' $M_b$ ' às forças de compressão  $F_1$  atuantes nas amostras. Os parâmetros ilustrados na Figura 5-25 foram obtidos pelas análises experimentais apresentadas no presente capítulo. Ademais, a Figura 5-25 também apresenta a curva de aproximação polinomial da rigidez inicial e momento ' $M_b$ ' dos respectivos arranjos estruturais de base.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas aproximações polinomiais ilustradas na Figura 5-25, torna-se evidente o aumento exponencial da rigidez rotacional e resistência aos momentos fletores a partir do aumento da força de compressão no arranjo estrutural de base. Além disso, as curvas de tendência dos desempenhos mecânicos das ligações apresentam um comportamento tipicamente não linear, principalmente para o arranjo estrutural de base T1.

Sendo assim, apesar das distinções nos comportamentos mecânicos das amostras, os valores de máximo momento fletor resistente ‘ $M_b$ ’ dos arranjos T1 e T2 apresentaram similaridade entre si. Conforme apresentado no tópico 5.2 e ilustrado na Figura 5-25 (b), a capacidade resistente do modelo simétrico de ancoragem (T1) apresenta um patamar de valores limitado pela estabilidade do arranjo estrutural de base. O mesmo não ocorre para a ligação assimétrica, sendo que o valor de ‘ $M_b$ ’ do arranjo estrutural de base T2 é ligeiramente superior ao resultado do arranjo T1 quando ambos são expostos à  $F1$  igual a 75 kN.

Nesse âmbito, o presente programa experimental observou que a força de compressão de 60 kN qualifica o início da instabilidade na coluna porta-paleta das amostras. Portanto, a comparação evidenciada pela curva de aproximação polinomial da Figura 5-25 (b), exibe a superação da capacidade resistente da ligação T2, em relação à T1, nos ensaios que a torção qualifica o modo de colapso por perda de estabilidade da coluna T2.

No âmbito dos valores de rigidez inicial, observa-se pela Figura 5-25 (a) uma maior distinção nos resultados dos arranjos T1 e T2, principalmente para as amostras submetidas a forças  $F1$  elevadas. Nesse cenário, as curvas de aproximação polinomial dos valores de rigidez inicial evidenciam o melhor desempenho mecânico do arranjo T2, em relação à T1, com o

aumento progressiva da interação entre ligação de base e coluna porta-paleta. Ou seja, à medida que a estabilidade de ambos os arranjos estruturais de base se tornou crítica e esforços torções se fizeram evidentes nas amostras T2, a rigidez inicial das ligações assimétricas demonstrou um melhor desempenho em comparação à ancoragem simétrica.

Nesse cenário, conforme mencionado no presente capítulo, a perda de estabilidade das amostras T1 foram marcadas por modos distorcionalis e locais na coluna, já as amostras T2 apresentaram instabilidade global de flexo-torção. A presença de esforços torções nos arranjos estruturais de base T2 está associada à ancoragem assimétrica da ligação ao bloco de concreto e a excentricidade acidental na transmissão dos esforços fletores. Além disso, o presente programa experimental constatou o papel fundamental do *bracket* do arranjo estrutural de base na interação entre a ligação e a coluna porta-paleta.

À vista do exposto, verificou-se que uma maior rigidez inicial do arranjo T2 pode estar atrelada ao suporte proporcionado pela estrutura do *bracket* no arranjo estrutural de base. Nesse cenário, foi constatado que o *bracket*, por se posicionar envolta da coluna porta-paleta, atua enrijecendo o arranjo aos esforços torções. Além disso, a participação do suporte do *bracket* no desempenho mecânico do arranjo T2 pode ser fundamentada pela resistência e transmissão da torção pela alma da peça em contato com o arranjo estrutural de base.

O mesmo comportamento não é observado para o arranjo estrutural T1, no qual o *bracket* atua transferindo majoritariamente esforços fletores. Essa diferença na atuação estrutural do *bracket* é evidenciada nos resultados do ensaio de líquido penetrante (Figura 5-5), no qual foi constatado o maior rasgamento das soldas para o arranjo estrutural T1 – falha associada à transmissão dos esforços fletores –, em comparação com as amostras do arranjo T2.

Além disso, a análise das parcelas de rotação devido esforços fletores de ensaio, ilustradas na Figura 5-23, evidenciam pequenas rotações do *bracket* nas amostras da ligação T2, comportamento que pode estar associado à exposição do elemento majoritariamente à esforços torções presentes no arranjo estrutural de base.

Nesse âmbito, o presente programa experimental observou que, além da ancoragem da placa de base, o *bracket* possui influência direta no comportamento mecânico das ligações de base de colunas porta-paletes. Todavia, para conclusões mais assertivas com relação à intervenção do *bracket* no comportamento estrutural, faz-se necessário um programa experimental voltado a essa análise.

Por fim, apesar dos maiores valores de rigidez inicial do arranjo estrutural de base T2, estas amostras apresentaram colapso mediante menores resultados de rotação da ligação. Sendo assim, quando comparados com os ensaios do arranjo T1, as amostras T2 falharam sob rotações entre 23% a 30% inferiores aos respectivos experimentos T1. Portanto, comprehende-se que a presença de torção no arranjo estrutural de base destaca o alerta para possíveis colapsos do porta-paleta seletivo na direção do corretor mediante pequenos valores deslocabilidade do pórtico, resultantes da semirrigidez da base.

Consequentemente, diferentes comportamentos mecânicos decorrentes da interação entre coluna porta-paleta e ligação de base podem definir a estabilidade do pórtico paralelo ao corretor e sua resistência aos efeitos de segunda ordem típicos do sistema estrutural. Portanto, a análise comparativa dos comportamentos mecânicos observados para os arranjos estruturais T1 e T2, além de expor as complexidades típicas da resposta estrutural desses elementos, evidencia os possíveis efeitos não negligenciais da ligação de base na estabilidade e capacidade resistente dos porta-paletes seletivos.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 5 apresenta os principais resultados do programa experimental desenvolvido pela pesquisa. Portanto, o presente tópico de considerações finais destina-se a frisar alguns pontos relevantes observados no desenvolvimento do estudo experimental, enquanto as principais conclusões da análise experimental serão abordadas no Capítulo 6 deste trabalho.

O ensaio de 21 amostras de ligações de base de colunas porta-paletes seletivos conduziu as análises dos comportamentos mecânicos típicos da ligação semirrígida avaliada. Além disso, os experimentos fundamentaram a obtenção dos parâmetros de projeto para inclusão da ligação de base na análise estrutural global do porta-paleta seletivo na direção do corredor, conforme diretrizes do *Design by testing*, especificado na EN 15512:2009.

*A priori*, o programa experimental validou o modelo alternativo de ensaio proposto pelo presente trabalho, conforme descrito no Capítulo 4. Nota-se que a complexidade do ensaio de ligações de base de porta-paletes seletivos se estende tanto ao âmbito da execução do programa experimental quanto na sensibilidade dos resultados de ensaio aos típicos efeitos parasitas.

Nesse sentido, as especificações normativas determinam o escorvamento das amostras a partir de uma porcentagem de força de compressão  $F1$  prevista para o experimento. Seguindo as recomendações de ensaio da AS 4084:2012 e de Gilbert e Rasmussen (2009), o presente trabalho realizou o escorvamento das amostras aplicando uma taxa de compressão de 5% a 10% da força  $F1$ . Todavia, a menor restrição provocada pela ancoragem da ligação T2 fez com que essas amostras apresentassem considerável acomodação perante os esforços de compressão do ensaio, mesmo após o escorvamento. Por isso, conforme detalhado no presente capítulo, as análises da curva M- $\theta$  dessas amostras necessitaram de correções.

Portanto, nota-se a importância de uma análise cuidadosa dos resultados experimentais de ligações de base de colunas porta-paletes, sendo que o processo de escorvamento mediante maiores magnitudes de compressão podem trazer benefícios às amostras com menor restrição na base, como foi o caso do arranjo estrutural de base T2.

Em sequência, a análise comparativa dos resultados do arranjo estrutural padrão do presente trabalho (ligação T1) e do arranjo T2 evidenciou que a ancoragem da placa de base determinou diferentes comportamentos mecânicos observados experimentalmente para as amostras. Sendo assim, a presença de torção na ligação de base T2 delineou análises fundamentais para compreender a influência da ancoragem no desempenho estrutural dos modelos de ligação avaliados na presente pesquisa.

No entanto, apesar do arranjo estrutural de base T1 apresentar um parafuso de ancoragem a mais que a ligação T2, os valores de capacidade resistente aos momentos fletores de ambos os modelos demonstraram similaridade entre si. Além disso, os valores de rigidez rotacional obtidos experimentalmente para os arranjos T1 e T2 não mostraram diferenças significativas, sendo que o arranjo T2, de forma geral, apresentou maiores resultados de rigidez inicial. Portanto, em contraste com a diferença significativa no comportamento mecânico observado experimentalmente, o presente estudo notou que a diferença na ancoragem da placa de base não conduziu à diferenças relevantes na capacidade resistente das ligações.

Ademais, conforme mencionado, as principais conclusões do estudo experimental serão devidamente apresentadas no Capítulo 6.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo apresentou uma investigação experimental e teórica do comportamento mecânico de ligações de base de colunas porta-paletes, as quais foram avaliadas quanto componentes estruturais do pórtico na direção do corredor. Sendo assim, no intuito de realizar uma análise experimental adequada, a presente pesquisa:

- Realizou a revisão bibliográfica apresentada nos Capítulos 2 e 3, abordando temas pertinentes para o estudo. Essa etapa contribuiu com a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da presente pesquisa;
- Empenhou-se em projetar e planejar um modelo alternativo de ensaio de ligações de base de colunas porta-paletes, apresentado no Capítulo 4. Para tanto, foram concebidos aparatos experimentais específicos para o estudo e proposto o aparelhamento dos equipamentos de medição conforme comportamento mecânico previsto para o ensaio. Além disso, parte fundamental do planejamento experimental consistiu em definir e caracterizar os grupos de amostras do estudo. Por fim, foram realizados 3 ensaios pilotos para validação do funcionamento do modelo alternativo de ensaio projetado;
- Promoveu esclarecimentos sobre os comportamentos mecânicos característicos das ligações de base de colunas porta-paletes por meio de um programa experimental com 21 amostras de ligações. As análises experimentais apresentadas no Capítulo 5 fundamentaram a avaliação da adequabilidade das especificações normativas e procedimentos propostos pela literatura referentes às ligações de base de porta-paletes seletivos. Além do mais, compreendeu-se os diferentes comportamentos mecânicos resultantes dos dois modelos de ligação avaliados experimentalmente.

Portanto, o presente capítulo elenca as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do estudo, apresentadas acerca do planejamento e concepção do programa experimental, detalhado no Capítulo 4, e das análises experimentais do Capítulo 5.

*Acerca do Programa experimental:*

- i. Fundamentado pela etapa de ensaios pilotos e pelas estratégias adotadas para avaliar a execução do experimento, o presente trabalho conclui a eficiência do modelo alternativo de ensaio em: restringir eventuais rotações do bloco de concreto em torno do seu eixo vertical; viabilizar a atuação da força horizontal ( $F_2$ ) por controle de taxa de deslocamento; manter a força de compressão ( $F_1$ ) constante na coluna ao longo do

- ensaio; garantir a atuação das forças  $F1$  e  $F2$  nos centros geométricos da coluna e bloco de concreto, respectivamente; e restringir eventuais interferências decorrentes do atrito entre bloco e aparatos experimentais e entre bloco e laje de reação do ensaio;
- ii. Compreende-se que o modelo alternativo de ensaio de ligações de base de estruturas porta-paletes seletivos atende de forma satisfatória às premissas do *Design by testing*, pois simula corretamente as condições reais de contorno e carregamento a que o arranjo estrutural de base é submetido no pórtico paralelo ao corredor;
  - iii. A interferência mínima do atrito em ensaio foi atestada devido à ausência de esforços parasitas típicos do experimento de ligações de base e pelos valores similares de força na atuação do servo-hidráulico e na reação da célula de carga ‘C02’ (Figura 4-2). Nesse sentido, o presente trabalho conclui a eficiência do sistema de deslizamento projetado e da graxa de lítio e grafite proposta para lubrificação das peças.

Dadas as conclusões acima, constatou-se a eficiência do modelo alternativo de ensaio projetado pela presente pesquisa, o qual promoveu padrões consistentes de comportamento mecânico para amostras similares e gerou resultados de rigidez rotacional e capacidade resistente compatíveis com os comportamentos observados experimentalmente.

*Acerca da análise experimental:*

- iv. As ligações de base avaliadas experimentalmente resultaram em curvas M- $\theta$  com traçado característico de ligações semirrígidas. De fato, os comportamentos mecânicos observados nos ensaios evidenciam os efeitos não negligenciais de fenômenos estruturais tipicamente não lineares, tais como a plastificação do aço, efeitos de segunda ordem que interferem na capacidade resistente da ligação, perda de estabilidade do arranjo estrutural e não linearidade de contato entre as peças;
- v. O presente programa experimental constatou a correlação entre os comportamentos mecânicos na falha dos arranjos estruturais de base, a força de compressão ( $F1$ ) nessas amostras e suas respectivas curvas M- $\theta$  experimentais. Com relação a isso, as análises experimentais permitiram concluir que:
  - a. O colapso por formação de rótula plástica na placa de base é característico de arranjos estruturais de base expostos a baixos valores de compressão. A curva M- $\theta$  dessas ligações apresenta comportamento não linear acentuado e menores valores de rigidez rotacional e resistência mecânica;

- b. Arranjos estruturais de base submetidos a maiores esforços de compressão apresentam colapso por instabilidade na coluna porta-paleta. A curva M-θ dessas ligações apresenta trecho inicial elástico linear e um pico de momento fletor, marcado pela perda de estabilidade do arranjo. Os resultados de momento fletor resistente e rigidez rotacional dessas ligações são maiores, todavia, a falha ocorre sob menores valores de rotação;
  - c. As ligações de base submetidas a esforços axiais próximos da metade da capacidade resistente à compressão do arranjo estrutural, podem apresentar falha devido à interação de rótula plástica na placa e instabilidades na coluna porta-paleta. A curva M-θ dessas ligações mantém comportamento não linear acentuado, todavia, apresenta uma elevação no sentido de resistência aos esforços fletores e rigidez rotacional;
- vi. A análise das deformações de plastificação da placa de base evidencia as diferenças resultantes dos modelos de ancoragem da placa no comportamento mecânico da ligação. Sendo assim, observou-se pelas linhas de plastificação que a menor restrição formada pela ancoragem T2 (Figura 4-17) resulta em excentricidades acidentais na transmissão de esforços entre a ligação e a coluna, que induz o aparecimento de esforços torções no arranjo estrutural de base;
- vii. Os resultados do ensaio de líquido penetrante permitem constatar a atuação do *bracket* na transmissão dos esforços entre a placa de base e a coluna porta-paleta, visto que os filetes de solda do elemento se apresentaram como pontos de concentração de tensões;
- viii. A partir da análise dos resultados experimentais, conclui-se a influência significativa dos esforços torções no comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos. Os resultados de ensaio do arranjo T2 evidenciam a influência da torção: no modo de falha da ligação, nos efeitos de segunda ordem, na relação entre o momento fletor resistente e a perda de estabilidade do arranjo estrutural, nos valores de rotação da ligação, e no comportamento não linear da curva M-θ experimental;
- ix. No âmbito das especificações normativas, o presente trabalho concluiu a melhor adequação dos parâmetros de projetos obtidos pelas diretrizes da AS 4084:2012. Para o arranjo T1 (Figura 4-17), a AS 4084:2012 resultou em parâmetros a favor da segurança, sem envolver grandes conservadorismos. Já para o arranjo T2, após as correções necessárias na curva M-θ experimental, a AS 4084:2012 também gerou resultados a favor da segurança. De forma geral, os parâmetros de projeto do arranjo T2 se apresentaram mais conservadores em relação aos resultados de T1;

- x. A análise dos efeitos de segunda ordem em ensaio permitiram concluir inconsistências nas especificações da EN 15512:2009. O critério de parada do ensaio pelo *peak load* de  $F_2$ , além de prejudicar o experimento, resulta em dados de momento fletor resistente demasiadamente conservadores. Em contradição aos esforços resistentes, a EN 15512:2009 apresentou resultados contra-segurança de rigidez de projeto para algumas amostras ensaiadas, fato também observado nas especificações da ANSI/RMI MH16.1:2021;
- xi. Em concordância com Firouzianhaij *et al.* (2022), o presente trabalho conclui que um limite seguro de serviço para as rotações da ligação de base são os valores correspondentes ao *peak load* de  $F_2$ , visto que se garante a estabilidade do arranjo estrutural de base e também um limite seguro para resistência mecânica. O mesmo não foi observado para a proposta de rotação limite de serviço da ANSI/RMI MH16.1:2021, que apresentou resultados inconsistente para as ligações avaliadas no trabalho;
- xii. A avaliação das parcelas que compõem a rotação das amostras de ligação de base permitem concluir a contribuição efetiva da plastificação da placa de base e deformações na coluna porta-paleta na rotação total da ligação. Compreendeu-se também que o rasgamento dos filetes de solda resultaram na participação efetiva da rotação dos *brackets* das ligações T1. A partir da análise das diferentes parcelas de rotação do arranjo estrutural de base, o presente trabalho não atestou a adequabilidade das propostas analíticas da literatura para definição da rigidez rotacional da ligação;
- xiii. O presente programa experimental observou a relevância da estrutura dos *brackets* no comportamento mecânico das ligações de base, os quais influenciaram: na transmissão dos esforços da ligação, na plastificação da placa de base, nas parcelas de rotação resultantes da ligação e na definição da região em que as instabilidades na coluna porta-paleta ocorre. Por fim, a análise comparativa dos dois arranjos estruturais de base avaliados identificou que o *bracket* possivelmente atuou enrijecendo a coluna porta-paleta aos esforços torções.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões do presente estudo, as seguintes recomendações para estudos futuros são indicadas:

- i. Avaliação experimental da influência do *bracket* no comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos;
- ii. Investigação numérica do comportamento mecânico das ligações de base de porta-paletes seletivos, avaliadas experimentalmente pela presente pesquisa;
- iii. Desenvolvimento de uma proposta teórica para avaliação da rigidez rotacional e momento fletor resistente condizente com os resultados e comportamentos mecânicos do presente programa experimental;
- iv. Avaliação da influência da ligação semirrígida de base na deslocabilidade e capacidade resistente do porta-paleta seletivo na direção do corredor.



## REFERÊNCIAS

- AFFOLTER, C.; PISKOTY, G.; WULLSCHLEGER, L.; WEISSE, B. Collapse of a high storage rack. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 6, p. 1846–1855, 2009.
- ANTONY, J. P.; MITTAL, B. D.; NAITHANI, A.K.; MISRA, A.K.; BHATNAGAR, A.K. Antiwear extreme pressure performance of graphite and molybdenum disulphide combinations in lubricating greases. **Wear**, v. 174, p. 33–37, 1994.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). **ANSI/AISI S100**. Washington, D.C., North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). **ANSI/AISI S100**. Washington, D.C., North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14762:**  
Dimensionamento de estruturas de aço perfis formados a frio - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14762:**  
Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR15524-1** Sistemas de armazenagem Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15524-2:** Sistemas de armazenagem Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739:** Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800:** Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- AUSTRALIAN/ NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). 4600 Cold-formed steel structures.** Sidney: AS/NZS, 2005.

AUSTRALIAN STANDARD (AS). **4084 Steel Storage Racking**. Sidney: AS, 2012.

BALDASSINO, N.; BERNUZZI, C.; GIOIA, A.; SIMONCELLI M. An experimental investigation on solid and perforated steel storage racks uprights. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 155, p. 409–425, 2019.

BALDASSINO, N.; BERNUZZI, C. Analysis and behaviour of steel storage pallet racks. **Thin-Walled Structures**, v. 37, p. 277–304, 2000.

BALDASSINO, N.; ZANDONINI, R. Design by testing of Industrial Racks. **Advanced Steel Construction an International Journal**, v. 7, p. 27–47, 2011.

BALDASSINO, N.; ZANDONINI, R. Performance os Base-Plate connections of Steel Storage Pallet Racks. In: Proceedings of Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures (CIMS2008), Gregory J. Hancock Symposium, **Proceedings...** Sydney, Australia, 2008.

BERNUZZI, C.; SIMONCELLI, M.; VENEZIA, M. Performance of mono-symmetric upright pallet racks under slab deflections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 672–686, 2017.

BRANQUINHO, M. Á. **Análise de estabilidade e dimensionamento de porta-paletes seletivos com base no método da análise direta**. 2021. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

BRISTISH STANDARD (BS). **EN 15512: Steel static storage systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design**. Londres: EN, 2009.

CASTRO, A. L. SET5965 – Concreto: materiais, dosagem e propriedades nas primeiras idades. São Carlos: Laboratório de Materiais e Construção Civil (**LMCC**) SET EESC/USP, 2023.

ÇELIK, İ. D.; YILDIZ, I.; ARSLAN, K. Y.; OZTURK, Y.; EFE, M. E.; KOCAMAN, T. B. Effect of base-plate types on system behaviour in down-aisle pallet rack systems. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 198, p. 107584, 2022.

CHEN, C. K.; SCHOLL, R. E. Earthquake Resistance of Industrial Steel Storage Racks Earthquake Resistance of Industrial Steel Storage Racks. In: Seventh International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. **Proceedings...** St. Louis, Missouri, U.S.A. St. Louis, Missouri, U.S.A.: 1984.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). EN 1993-1-1. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. CEN, 2005.

DAVIES, M. J. Stability of Unbraced Pallet Racks. In: 5th nternational Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, **Proceedings...** University of Missouri - Rolla, 1980.

DÓRIA, A.S.; MALITE, M.; VIEIRA, JR. L.C.M. On Frame Stability Analysis. In: SSRC Annual stability conference, 2013, Saint Louis, Missouri, USA, **Proceedings...Missouri**, 2013.

FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION (FEM). **10.2.02.** Section X. The design of static steel pallet racking. Racking Design Code, 2001.

FIROUZIANHAIJ, A.; AZANDARIANI, M. G.; USEFI, N.; SAMALI, B. Performance of baseplate connections in CFS storage rack systems: An experimental, numerical and theoretical study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 196, 2022.

GILBERT, B. P.; FERNANDO, D.; PHAM, C. H. Experimental techniques in structural Testing: Common Mistakes, how to avoid them and other advice. **Structures**, v. 41, p. 1687–1699, 2022.

GILBERT, B. P.; RASMUSSEN, K. J. R. Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 6, p. 1031–1041, 2011.

GILBERT, B. P.; RASMUSSEN, K. J. R. **Experimental test on steel storage rack components - Research Report No R899.** Sydney, 2009.

GODLEY, M. H.; BEALE, R. G.; FENG, X. Rotational Stiffnesses of semi-rigid baseplate. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, **Proceedings...** 1998.

GODLEY, M. H. R. The behaviour of storage racking baseplates. In: 6th international conference on steel and aluminium structures, R. G. Beale, Org., **Proceedings...** 2007.

GOMES, K. F. **Avaliação comparativa de graxas com cálcio e com lítio em ensaios do tipo pino-sobre-disco.** 2021. 26 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

HANCOCK, G. J. Distortional Buckling of Steel Storage Rack Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 12, p. 2770–2783, 1985.

HUANG, Z.; WANG, Y.; ZHAO, X.; SIVAKUMARAN, K. S. Determination of the flexural behavior of steel storage rack baseplate upright connections with eccentric anchor bolts. **Thin-Walled Structures**, v. 160, 2021.

NAGARE, P.; KUDAL, H. A Taguchi Approach on Influence of Graphite as an Anti-Wear Additive on the Performance of Lithium Grease. In: 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, Procedia Manufacturing, **Proceedings...** 2018.

NIETZSCHE, F. **A Gaia Ciência.** São Paulo: Schwarcz, 2012. Tradução de Paulo César de Souza.

PIGNATTA E SILVA, V. **Dimensionamento de Estrutural de Aço.** São Paulo: Departamento de Eng. de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da USP, 2021.

RACK MANUFACTURERS INSTITUTE (RMI). Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks, rack manufacturers institute. Charlotte (USA): Rack Manufactures Institute, 2008.

RACK MANUFACTURERS INSTITUTE (RMI). **MH16.1**: Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. Charlotte (USA): Rack Manufactures Institute, 2012.

RACK MANUFACTURERS INSTITUTE (RMI). **MH16.1**: Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. Charlotte (USA): Rack Manufactures Institute, 2021.

RASMUSSEN, K.J.R., GILBERT, B.P. Analysis-Based Design Provisions for Steel Storage Racks, **Journal of Structural Engineering**, v.139, n.5, p.849-859, 2013.

REIS, A.; CAMOTIM, D. **Estabilidade Estrutural**. Lisboa: McGRAW-HILL, 2000.

ROURE, F.; PEKOZ, T.; SOMALO, M. R.; BONADA, J.; PASTOR M. M. Industrial Cold-Formed Steel Rack Column Base Fixity. In: International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Baltimore, Maryland, U.S.A: Wei-Wen Yu International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, **Proceedings...** 2016.

ROURE, F.; PASTOR, M. M.; SOMALO, M.; CASAFONT, M. New experimental method for determining the stiffness and strength of steel storage rack floor connections. In: 5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. Cape Town, África do Sul. p. 2–4. **Proceedings...** 2013.

SALMON, S. G.; SCHENKER, L.; JOHNSTON, B. G. Moment rotation characteristic of column anchorages. **Journal of the Structural Division**, v. 81, 1955.

SARAWIT, A. T.; PEKÖZ, T. Cold-Formed Steel Frame and Beam-Column Design. **Research Report RP03-2**, Committee on specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural members, 2006.

SARAWIT, A. T.; PEKÖZ, T. Design of Industrial Storage Racks. In: 16th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida: Missouri University of Science and Technology, **Proceedings...** 2002.

SHAH, S.N.R.; SULONG, N.H.R.; JUMAAT, M.Z.; SHARIATI, M. State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections. **Engineering Failure Analysis**, v. 66, p. 240–258, 2016.

SILVA, E.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. **Estruturas compostas por Perfis Formados a Frio - Dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e aplicações conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA - Série Manual de Construção em Aço, 2014.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Solid Lubrication and Surface Treatments. In: STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 4. ed. Waltham: Elsevier, 2014. p. 429–474.

WINTER, G.; PEKOZ, T. Cold-formed Steel Rack Structures. In: 2nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri - Rolla, **Proceedings...** 1973.

YAO, Z.; RASMUSSEN, K. J. R. Perforated Cold-Formed Steel Members in Compression. II: Design. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 5, 2017.

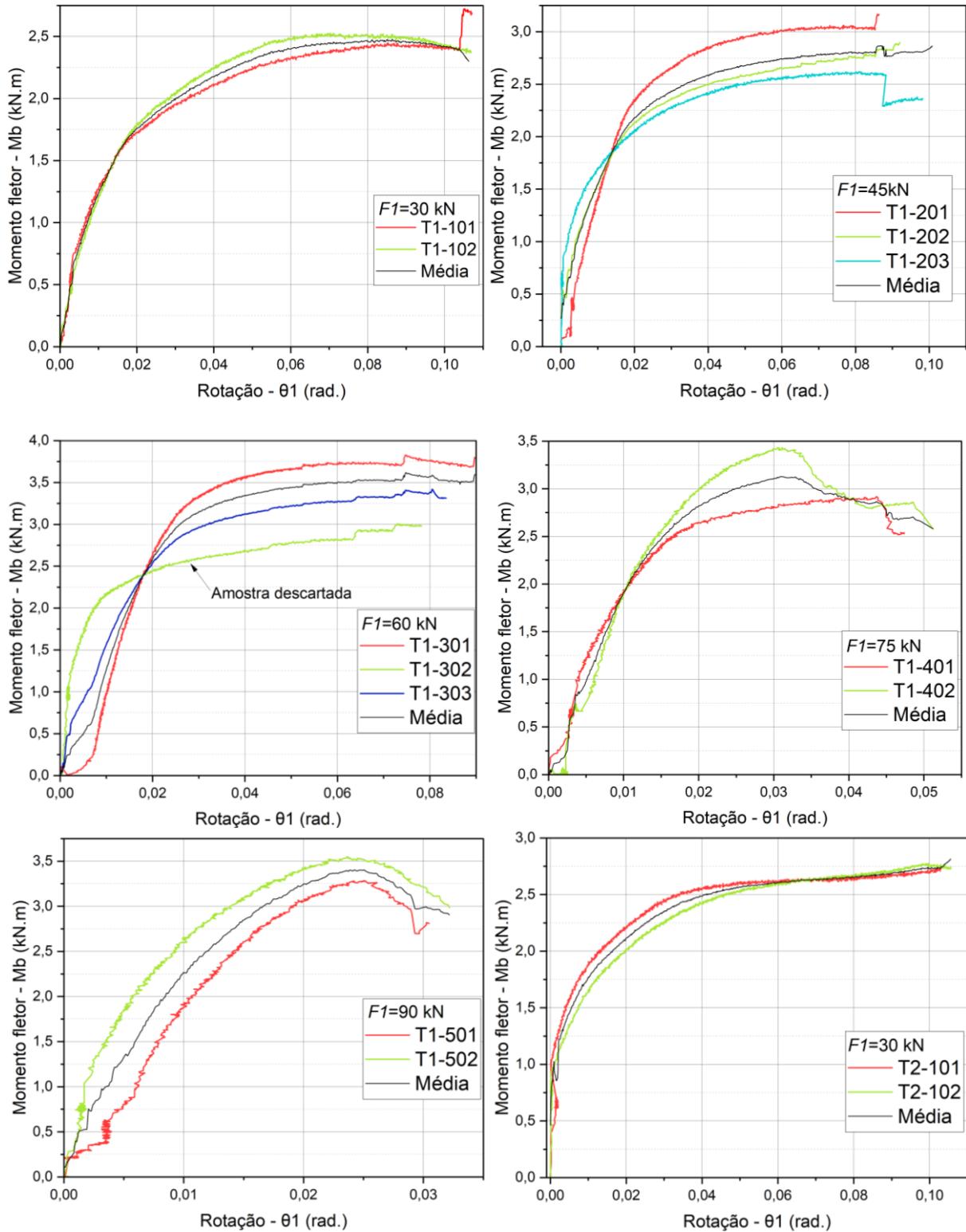
YURA, J. A.; ZETTLEMOYER, N.; EDWARDS, I. F. Ultimate capacity equations for tubular joints. In: 12th Annual Offshore Technology Conference. Houston: OTC 3690, p. 113–125. **Proceedings...** 1980.

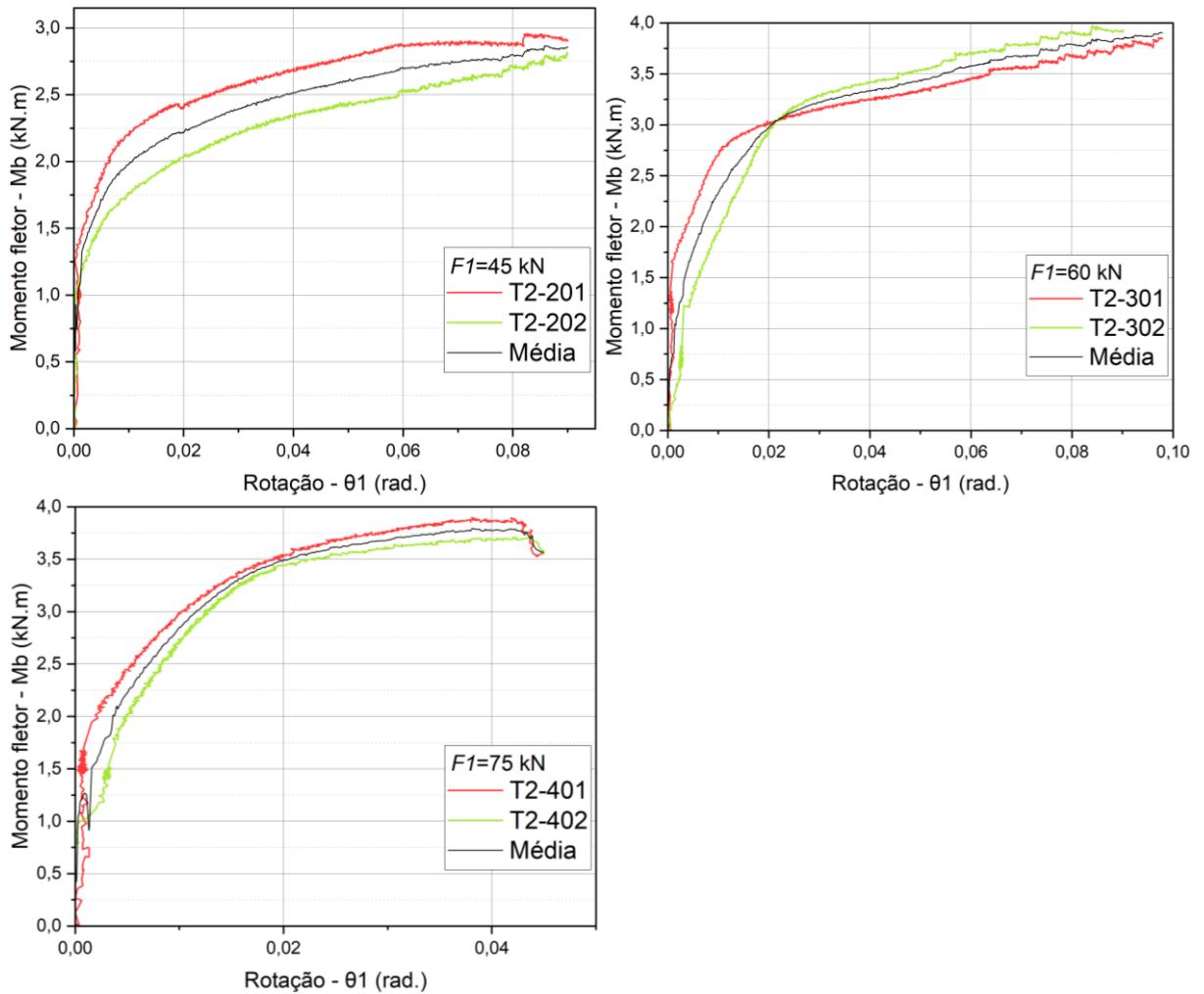
ZHAO, X.; HUANG, Z.; WANG, Y.; SIVAKUMARAN, K.S. Flexural behavior of steels storage rack base-plate upright connections with concentric anchor bolts. **Steel and Composite Structures**, v. 33, n. 3, p. 357–373, 2019.



## APÊNDICE A – Curvas M-θ experimentais

- Curva M-θ experimental de cada grupo de arranjo estrutural de base ensaiado:





## APÊNDICE B – Parâmetros de projeto das ligações de base

- Rigidez rotacional (kd) e Momento fletor de projeto (Mrd) para arranjo estrutural de base
- T1:

		M <sub>ti</sub> [kN.m]	M <sub>m</sub> [kN.m]	Desvio padrão [kN.m]	C.V. [%]	M <sub>rd</sub> [kN.m]	θ <sub>rdi</sub> [rad.]	k <sub>ni</sub> [kN.m/rad.]	k <sub>d</sub> [kN.m/rad.]
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T1-101</b>	1,876	1,923	0,066	3,409	1,547	0,0151	141,888	118,288
	<b>T1-102</b>	1,969					0,0150	128,017	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T1-101</b>	2,447	2,487	0,057	2,300	2,086	0,0383	100,161	101,512
	<b>T1-102</b>	2,528					0,0317	102,862	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T1-101</b>	2,447	2,487	0,034	2,300	1,492	0,0138	106,022	107,104
	<b>T1-102</b>	2,528					0,0140	108,186	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T1-201</b>	2,260	2,114	0,130	6,167	1,610	0,0113	133,891	200,577
	<b>T1-202</b>	2,011					0,0108	225,711	
	<b>T1-203</b>	2,070					0,0081	404,575	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T1-201</b>	2,916	2,734	0,159	5,813	2,105	0,0164	134,570	136,840
	<b>T1-202</b>	2,665					0,0192	171,104	
	<b>T1-203</b>	2,622					0,0219	214,034	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T1-201</b>	2,916	2,734	0,095	5,813	1,640	0,0119	146,546	154,444
	<b>T1-202</b>	2,665					0,0112	142,802	
	<b>T1-203</b>	2,6216					0,0090	173,984	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T1-301</b>	3,307	3,058	0,352	11,507	1,702	0,0137	86,301	129,956
	<b>T1-303</b>	2,809					0,0111	173,611	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T1-301</b>	3,749	3,585	0,233	6,491	2,546	0,0192	106,392	129,933
	<b>T1-303</b>	3,420					0,0201	153,474	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T1-301</b>	3,749	3,585	0,140	6,491	2,151	0,0163	138,287	136,313
	<b>T1-303</b>	3,420					0,0153	134,339	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T1-401</b>	2,544	2,667	0,174	6,514	1,892	0,0097	212,260	191,408
	<b>T1-402</b>	2,790					0,0100	170,555	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T1-401</b>	2,919	3,177	0,365	11,473	1,772	0,0087	214,121	191,107
	<b>T1-402</b>	3,435					0,0093	168,092	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T1-401</b>	2,919	3,177	0,219	11,473	1,906	0,0101	173,034	189,555
	<b>T1-402</b>	3,435					0,0100	206,075	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T1-501</b>	3,123	3,160	0,052	1,659	2,712	0,0158	178,577	241,031
	<b>T1-502</b>	3,197					0,0110	353,850	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T1-501</b>	3,285	3,418	0,187	5,485	2,533	0,0145	179,557	276,534
	<b>T1-502</b>	3,551					0,0093	373,511	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T1-501</b>	3,285	3,418	0,112	5,485	2,051	0,0060	327,376	260,869
	<b>T1-502</b>	3,551					0,0110	194,361	

**M<sub>ti</sub>:** Momento fletor resistente da amostra 'i'

**M<sub>m</sub>:** Média dos momentos fletores resistentes do arranjo estrutural de base

**M<sub>rd</sub>:** Momentos fletor resistente de projeto

**θ<sub>rdi</sub>:** Rotação da amostra 'i' em M<sub>rd</sub>

**k<sub>ni</sub>:** rigidez rotacional da amostra 'i'

**k<sub>d</sub>:** rigidez rotacional de projeto do arranjo estrutural de base

- Rigidez rotacional (kd) e Momento fletor de projeto (Mrd) para arranjo estrutural de base T2:

		M <sub>ti</sub> [kN.m]	M <sub>m</sub> [kN.m]	Desvio padrão [kN.m]	C.V. [%]	M <sub>rd</sub> [kN.m]	θ <sub>rdi</sub> [rad.]	k <sub>ni</sub> [kN.m/rad.]	k <sub>d</sub> [kN.m/rad.]
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T2-101</b>	2,377	2,275	0,145	6,366	1,624	0,0056	585,444	268,865
	<b>T2-102</b>	2,172					0,0093	405,419	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T2-101</b>	2,358	2,339	0,026	1,124	2,046	0,0141	335,948	278,356
	<b>T2-102</b>	2,320					0,0207	220,763	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T2-101</b>	2,358	2,339	0,016	1,124	1,403	0,0031	450,270	343,139
	<b>T2-102</b>	2,320					0,0059	236,007	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T2-201</b>	2,250	2,070	0,256	12,351	1,098	0,0002	763,240	1402,117
	<b>T2-202</b>	1,889					0,0008	2040,993	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T2-201</b>	2,622	2,418	0,289	11,971	1,311	0,0006	1010,260	1170,370
	<b>T2-202</b>	2,213					0,0028	1330,480	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T2-201</b>	2,622	2,418	0,174	11,971	1,451	0,0016	1001,591	662,653
	<b>T2-202</b>	2,213					0,0041	323,715	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T2-301</b>	2,825	2,967	0,202	6,793	2,080	0,0042	1039,804	388,766
	<b>T2-302</b>	3,110					0,0113	244,957	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T2-301</b>	3,321	3,419	0,138	4,036	2,685	0,0098	583,713	395,749
	<b>T2-302</b>	3,516					0,0169	207,785	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T2-301</b>	3,321	3,419	0,083	4,036	2,051	0,0042	471,797	333,227
	<b>T2-302</b>	3,516					0,0108	194,658	
<b>EN 15512:2009</b>	<b>T2-401</b>	3,363	3,354	0,014	0,408	3,007	0,0104	621,847	304,748
	<b>T2-402</b>	3,344					0,0125	378,346	
<b>AS 4084:2012</b>	<b>T2-401</b>	3,897	3,808	0,125	3,292	3,078	0,0113	589,323	478,542
	<b>T2-402</b>	3,719					0,0135	367,760	
<b>ANSI/RMI MH16.1:2021</b>	<b>T2-401</b>	3,897	3,808	0,075	3,292	2,285	0,0041	570,024	444,441
	<b>T2-402</b>	3,719					0,0070	318,857	

**M<sub>ti</sub>:** Momento fletor resistente da amostra 'i'

**M<sub>m</sub>:** Média dos momentos fletores resistentes do arranjo estrutural de base

**M<sub>rd</sub>:** Momentos fletor resistente de projeto

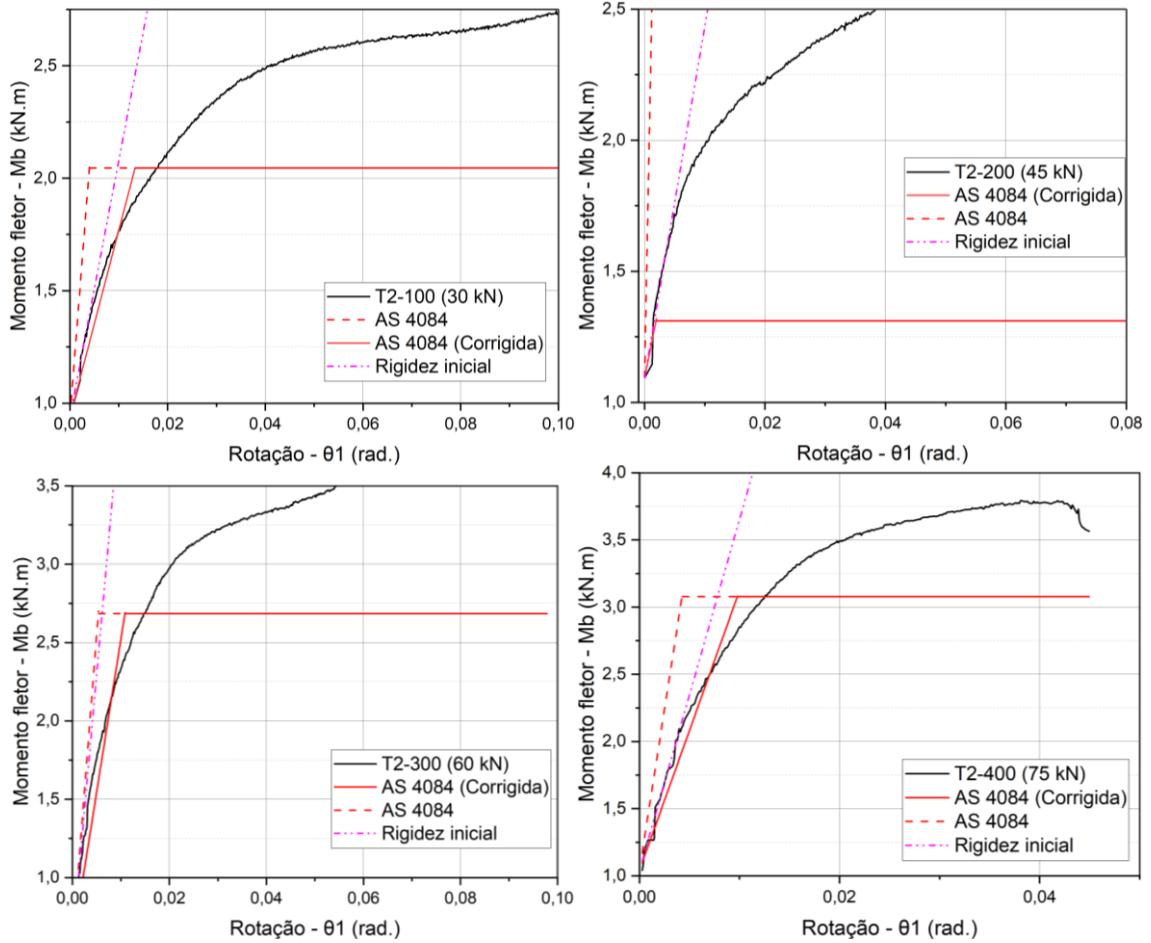
**θ<sub>rdi</sub>:** Rotação da amostra 'i' em M<sub>rd</sub>

**k<sub>ni</sub>:** rigidez rotacional da amostra 'i'

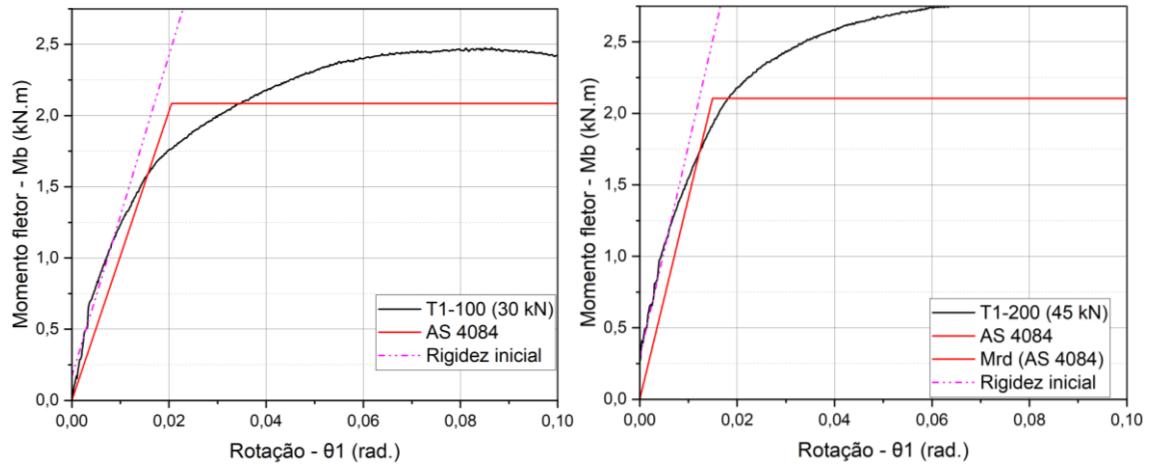
**k<sub>d</sub>:** rigidez rotacional de projeto do arranjo estrutural de base

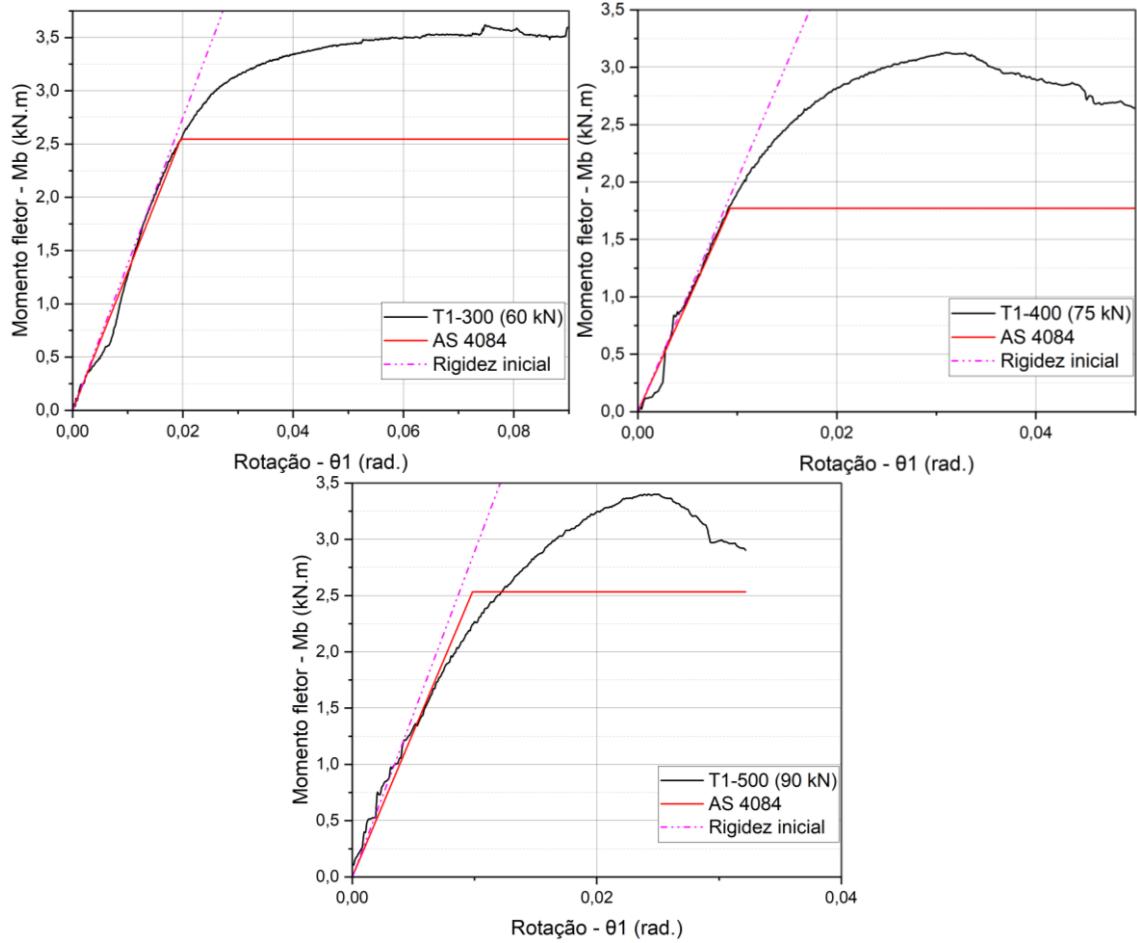
## APÊNDICE C – Análise comparativa das rigidezes rotacionais

- Análise comparativa dos resultados de rigidez rotacional do Arranjo estrutural de base T2;



- Análise comparativa dos resultados de rigidez rotacional do Arranjo estrutural de base T1;







EESC • USP