Litícia Purificação da Benigna Chimuaga

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS APARELHOS DE APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. **Área de Concentração**: Tecnologia da Construção e Estruturas. **Linha de Pesquisa**: Patologia, Reforço e Recuperação de Estruturas, Materiais de Construção e Sistemas Construtivos.

Orientador: Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.

NITERÓI

2015

Litícia Purificação da Benigna Chimuaga

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS APARELHOS DE APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. **Área de Concentração**: Tecnologia da Construção e Estruturas. **Linha de Pesquisa**: Patologia, Reforço e Recuperação de Estruturas, Materiais de Construção e Sistemas Construtivos.

Aprovada em 30 de outubro de 2015

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense

_____

Prof[a]. Claudia Maria de Oliveira Campos, Ph.D..
Universidade Federal Fluminense

_____

Prof. Iporan de Figueiredo Guerrante, D.Sc.
Fundação Getúlio Vargas

_____

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho, D.Sc.
Fundação Getúlio Vargas

Niterói
2015

Aos meus pais, Paulo (i.m.) e Benigna, as minhas irmãs,
Liliane e Sheilla, ao meu sobrinho Paulo e ao Thiago.

AGRADECIMENTOS

Poucas são as oportunidades que tenho para agradecer e em um momento como este, de grande realização, no qual celebro o fim de mais uma jornada acadêmica, gostaria de prestar uma justa e sincera homenagem...

Primeiro a Deus, por tornar possível a realização de mais um sonho.

Aos meus pais, Paulo (i.m.) e Benigna, que sempre acreditaram no meu sucesso e deram o melhor de si para que eu o pudesse alcançar.

Às minhas irmãs, Liliane e Sheilla, pelo apoio, solidariedade e compreensão.

Ao meu sobrinho, Paulo, por existir e ter dado mais sentido à minha vida desde a sua chegada.

Ao meu padrinho, Songane, pelo carinho, encorajamento e solicitude.

Ao querido, Thiago, pelo amor, zelo, paciência e encorajamento de sempre. Por acreditar e me fazer acreditar que a concretização deste sonho era certa.

Ao meu orientador, Professor Emil, por ter me acolhido como sua orientanda, pela paciência e compreensão.

Aos demais professores do curso, por cada minuto dedicado a minha formação e pelo aprendizado de vida.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela amizade e companheirismo. Ao Ricardo pela atenção e disponibilidade em ajudar sempre que necessário.

A todos vocês dedico esta vitória, pois ela é tanto minha, quanto vossa!

RESUMO

Esta dissertação aborda o comportamento estrutural, procedimentos de análise e dimensionamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado. Com base nos preceitos da EN 1337-3:2005 e das metodologias de MASON (1977), PFEIL (1983) e de MARCHETTI (2008) para aparelhos de apoio de elastômero fretado, duas planilhas eletrônicas foram desenvolvidas para o dimensionamento de aparelhos de apoio em dimensões comerciais da fabricante nacional NEOPREX e para a verificação do dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói, respectivamente. Foi analisado na planilha de dimensionamento o comportamento estrutural dos aparelhos de apoio à compressão, à rotação e ao carregamento horizontal; e na planilha de verificação apenas às respostas desses elementos estruturais à compressão e à rotação.Além disso, efetuou-se uma comparação entre os métodos utilizados nas análises realizadas que adotou a EN 1337-3:2005 como metodologia padrão que permitiu concluir que MARCHETTI (2008) é o mais criterioso. Observou-se ainda que à compressão os aparelhos de apoio apresentam o mesmo comportamento quando dimensionados por MASON (1977) e EN 1337-3:2005 e o mesmo acontece quando estes são dimensionados por MARCHETTI (2008) e PFEIL (1983) e que para a carga vertical adotada ($P = 1.305\,kN$) apenas o métodos de MARCHETTI (2008) e MASON (1977) não tiveram as suas especificações atendidas.Finalmente, concluiu-se que o desempenho estrutural dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói é satisfatório, pois durante quarenta anos de uso não houve variações nas suas dimensões que comprometessem o seu funcionamento.

Palavras chave: Aparelhos de Apoio; Aparelhos de apoio elastoméricos; Neoprene; Dimensionamento; Ponte Rio-Niterói.

ABSTRACT

This dissertation addresses the structural behavior, analysis procedures and sizing of chartered elastomer supportive equipment. Based on the precepts of EN 1337-3:2005 and methodologies of MASON (1977), PFEIL (1983) and MARCHETTI (2008) for chartered elastomer supportive devices, two electronic spreadsheets were developed for the scaling of elastomeric bearings in commercial dimensions from the national manufacturer NEOPREX and for the sizing verification of the bearings of the Rio-Niteroi bridge, respectively. In the scaling spreadsheet, the behavior of the bearings pads under compression, rotation and horizontal loading was analyzed; and in the verification spreadsheet, just the responses of these elements under compression and rotation were analyzed. In the dimensioning spreadsheet, the behavior of the bridge bearing pads under compression, rotation and horizontal loading were analyzed; and on the verification spreadsheet just the responses of these elements under compression and rotation. Furthermore, a comparison was made between methods used in the performed analyses where the EN 1337-3:2005 was adopted as standard procedure, which permitted to conclude that the method of MARCHETTI (2008) was the most conservative. It was also observed that under compression, the bridge bearing pads show the same behavior when dimensioned by MASON (1977) and the EN 1337-3:2005 and the same occurs when these are dimensioned by MARCHETTI (2008) and PFEIL (1983), and for the adopted vertical load of P=1305kN only the methods of MARCHETTI (2008) and MASON (1977) did not have its specifications met. Finally, it was concluded that the structural performance of the bearing pads of the Rio-Niteroi Bridge is satisfactory because, for forty years of use there were not any variations in its dimensions that would compromise its functionality.

Keywords: Bearing; Elastomeric Bearings; Neoprene; Sizing; Rio-Niteroi Bridge.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **18**
1.1. GENERALIDADES 18
1.2. OBJETIVOS 18
1.2.1. Objetivo geral **18**
1.2.2. Objetivos específicos **19**
1.3. JUSTIFICATIVA 19
1.4. METODOLOGIA 20
1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 21

2. APARELHOS DE APOIO **22**
2.1. GENERALIDADES 22
2.2. TIPOLOGIA DOS APARELHOS DE APOIO 22
2.2.1. Aparelhos de apoio metálicos **22**
2.2.2. Aparelhos de apoio de concreto **23**
2.2.3. Aparelhos de apoio elastoméricos **25**
2.2.4. Materiais **28**
2.2.5. Processo de vulcanização **30**

3.DIMENSIONAMENTO DE APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS **32**
3. 1 GENERALIDADES 32
3. 2 NORMALIZAÇÃO 32
3. 3 METODOLOGIA DE MASON (1977) 33
3.3.1 Verificação das tensões devido à compressão **34**
3.3.2 Verificação das tensões devido à rotação **35**
3.3.3 Verificação das tensões devidas à força horizontal **37**
3.3.4 Tensões de tração na chapa **38**
3.3.5 Recomendações **38**
3.3.6 Condições de não deslizamento **38**
3. 4 METODOLOGIA DE PFEIL (1983) 41
3.4.1 Verificação das tensões devido à compressão **41**
3.4.2 Verificação das tensões devido à rotação **42**
3.4.3 Verificação das tensões devido à força horizontal **43**
3. 5 METODOLOGIA DE MARCHETTI (2008) 44
3.5.1 Verificação das tensões devido à compressão **44**
3.5.2 Verificação das tensões devido à força horizontal **45**
3.5.3 Verificação das tensões devido à rotação **46**
3.5.4 Deformabilidade **47**
3. 6 METODOLOGIA INGLESA 47
3.6.1 Aparelhos de apoio inclinados **54**
3.6.2 Isolamento de vibrações **55**
3.6.3 Fluência em elastômeros **55**
3. 7 METODOLOGIA ALEMÃ (DIN 4141-4:1986) 56
3. 8 NORMA EUROPEIA (EN 1337-3:2005) 57
3.8.1 Base de projeto **61**
3.8.2 Fator de forma **62**
3.8.3 Deformação específica devido à carga de compressão **64**
3.8.4 Deformação específica devido ao cisalhamento **64**

3.8.5 Espessura da placa de aço 65
3.8.6 Condições limitantes 65
3.8.7 Forças, momentos e deformações exercidas sobre a estrutura 67

4. ANÁLISE DOS APARELHOS DE APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI 70
4. 1 GENERALIDADES 70
4. 2 TRECHO CENTRAL 70
4.2.1 Características geométricas 71
4. 3 PILARES 71
4.3.1 Nomenclatura dos pilares 72
4. 4 APARELHOS DE APOIO 72
4.4.1 Nomenclatura dos aparelhos de apoio 73
4. 5 INSPEÇÃO E ANÁLISE DE RISCOS 74
4. 6 PATOLOGIAS EXISTENTES 76
4. 7 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS 77
4.7.1 Apresentação do programa de dimensionamento 80
4.7.2 Apresentação do programa de verificação 82
4.7.3 Dados disponíveis 84
4.7.4 Análise dos dados 84
4. 8 VERIFICAÇÕES 93
4.8.1 Verificações à compressão 93
4.8.2 Verificações à rotação 94
4. 9 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 96
4. 10 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS 97

5.CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 99
5. 1 CONCLUSÕES 99
5. 2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 100

6.REFERÊNCIAS 102
SÍTIOS VISITADOS 104

ANEXOS 105

APÊNDICE A 111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema da metodologia adotada nesta dissertação. 20
Figura 2.1: Aparelhos de apoio metálicos do tipo fixo. (Fonte: El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010). 23
Figura 2.2:Aparelhos de apoio metálicos do tipo móvel (a) apoio com 2 roletes metálicos, (b) apoio com 4 roletes metálicos. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983). 23
Figura 2.3: Articulação de contato de superfície. (Fonte: adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010). 24
Figura 2.4: Articulação Mesnager.(Fonte: adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010). 24
Figura 2.5: Articulação Freyssinet. (Fonte: adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010). 25
Figura 2.6: Pêndulos de concreto. (Fonte: adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010). 25
Figura 2.7: Aparelho de apoio de neoprene simples. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010). 26
Figura 2.8: Aparelho de apoio de neoprene deslizante. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010). 27
Figura 2.9: Aparelho de apoio de neoprene com abas. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010). 27
Figura 2.10: Aparelho de apoio de neoprene fretado. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010). 28
Figura 2.11: Cadeias moleculares da borracha (a) borracha não vulcanizada, (b) borracha vulcanizada. (Fonte: adaptado de http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php, 2015). 30
Figura 2.12: Curvas Força x Deformação de borrachas vulcanizadas e não vulcanizadas. (Fonte: adaptado de Billmeyer, 1971 *apud* GUERREIRO, 2003). 31
Figura 3.1: Situações de carregamento analisadas. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 34
Figura 3.2: Camada de neoprene sujeita à compressão. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 34
Figura 3.3: Tensões geradas pela força de compressão. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 34
Figura 3.4: Tensões geradas pela rotação. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 35
Figura 3.5: Representação da rotação global do aparelho. (Fonte: adaptado de MASON,1977). 37
Figura 3.6: Tensões geradas pela força horizontal. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 37
Figura 3.7: Deslocamento horizontal do aparelho. (Fonte: adaptado de MASON, 1977). 39
Figura 3.8: Tensões internas numa camada de elastômero fretado sujeita a força de compressão simples. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983). 41
Figura 3.9: Tensões internas numa camada de elastômero geradas por uma rotação imposta. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983). 42
Figura 3.10: Tensões internas de uma camada de elastômero sujeita a solicitações horizontais (H). (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983). 43
Figura 3.11: Representação esquemática de um aparelho de apoio elastomérico. (Fonte: adaptado de LEE, 1994). 49
Figura 3.12: Efeito da temperatura e da frequência no valor de G. (Fonte: adaptado de LEE, 1994). 50
Figura 4.1: Traçado da Ponte Rio-Niterói. (Fonte: Google Earth, 2015). 71
Figura 4.2: Seção transversal típica do trecho central. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975). 71

Figura 4.3: Pilar típico do trecho central da Ponte Rio-Niterói. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975). 72
Figura 4.4: Aparelhos de apoio sobre o pilar. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975). 73
Figura 4.5: Defeitos encontrados no aparelho C136P, CPRN (2015). 77
Figura 4.6: Defeitos encontrados no aparelho C136C, CPRN (2015). 77
Figura 4.7: P1– Planilha 1: página inicial. 80
Figura 4.8: P1– Planilha 2: dados de entrada. 81
Figura 4.9: P1– Planilha 2: verificação das tensões devido à compressão. 81
Figura 4.10: P1–Planilha 2: verificação das tensões devido à rotação. 81
Figura 4.11: P1–Planilha 2: verificação das tensões devido à força horizontal. 82
Figura 4.12: P1–Planilha 2: condições de não deslizamento. 82
Figura 4.13: P1– Planilha 2: verificação das tensões cisalhantes. 82
Figura 4.14: P2 – página inicial. 83
Figura 4.15: P2 – Planilha 4: dados de entrada. 83
Figura 4.16: Variação do comprimento com o tempo, P38. 85
Figura 4.17: Variação da largura com o tempo, P38. 85
Figura 4.18: Variação da altura com o tempo, P38. 86
Figura 4.19: Variação do comprimento com o tempo, P123 e P124. 86
Figura 4.20: Variação da largura com o tempo, P123 e P124. 87
Figura 4.21: Variação da altura com o tempo, P123 e P124. 87
Figura 4.22: Variação do comprimento com o tempo. 88
Figura 4.23: Variação do comprimento com o tempo. 88
Figura 4.24: Variação da altura com o tempo. 89
Figura 4.25: Disposição dos macacos no pilar. (Fonte: CPRN, 2015). 89
Figura 4.26: Leitura dos macacos no pilar. (Fonte: CPRN, 2015). 90
Figura 4.27: Verificação à compressão por MASON (1977). 94
Figura 4.28: Verificação à compressão por PFEIL (1983). 94
Figura 4.29: Verificação à compressão por MARCHETTI (2008). 94
Figura 4.30: Verificação à compressão pela EN 1337-3:2005. 94
Figura 4.31: Variação da tensão normal com o aumento da carga vertical. 98
Figura 5.1: Zonas limites dos métodos na verificação à compressão. 99
Figura A.1: Instabilidade elástica de um aparelho de apoio. (Fonte: adaptado de Topaloff, 1964). 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Constantes elásticas. 49
Tabela 3.2: Fatores de rigidez dinâmica. 50
Tabela 3.3: Determinação do fator Ks. 68
Tabela 4.1: Dimensões comerciais de aparelhos de apoio de neoprene fretado. 78
Tabela 4.2: Tabela utilizada na verificação dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói. 79
Tabela 4.3: Resultados da leitura dos macacos hidráulicos. 90
Tabela 4.4: Cargas verticais atuantes num bloco corrente no acesso sobre o mar. 91
Tabela 4.5: Resultados do ensaio de compressão simples. 92
Tabela 4.6: Resultados do ensaio de distorção. 93
Tabela 4.7: Apresentação geral dos resultados. 97
Tabela B.1: Valores típicos de Rc (P=0,005). 110

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Dimensões normalizadas de aparelhos de apoio elastoméricos; adaptado de EN 1337-3:2005. 59
Quadro 4.1: Critérios relativos à urgência e tendência. 75
Quadro 4.2: Escala GUT. 75
Quadro 4.3: Critérios de dimensionamento dos métodos estudados. 97

LISTA DE SÍMBOLOS

Romanos maiúsculos

A	Área do aparelho de apoio em planta
A_0	Ângulo inicial
A_e	Área efetiva
A_l	Área efetiva reduzida devido à carga de efeitos
A_n	Área útil do neoprene
A_t	Ângulo total
D	Fator de rigidez dinâmica
D_{ab}	Distorção do aparelho de apoio
E	Módulo de elasticidade do elastômero
E_i	Módulo de elasticidade aparente de uma camada de elastômero fretada
F_f	Fator de forma
G	Módulo de cisalhamento do elastômero para carregamentos lentos
G_s	Módulo de cisalhamento do elastômero para carregamentosrápidos
G_n	Resistência ao cisalhamento do elastômero
H	Força horizontal aplicada ao aparelho de apoio
H_c	Força horizontal de aplicação lenta
H_{cd}	Força horizontal de curta duração
H_{lc}	Força horizontal longitudinal de curta duração
H_{ld}	Força horizontal de longa duração
H_{ll}	Força horizontal longitudinal de longa duração
H_r	Tensão total para cálculo da distorção do aparelho de apoio
H_s	Força horizontal de aplicação rápida
H_{tc}	Força horizontal transversal de curta duração
H_{tl}	Força horizontal transversal de longa duração
K_c	Rigidez à compressão
K_h	Rigidez horizontal efetiva

K_s	Rigidez estática do sistema do aparelho de apoio
K_v	Rigidez vertical eficaz
M	Momento associado à rotação α
N	Força total vertical a ser aplicada no aparelho de apoio
$N_{mín}$	Força normal mínima
$N_{máx}$	Força normal máxima
P	Força de compressão aplicada no aparelho de apoio
P_c	Força vertical de aplicação lenta
P_s	Força vertical de aplicação rápida
S	Fator de forma
V	Efeito de carga vertical do projeto
W	Deslocamento na extremidade do pilar

Romanos minúsculos

a	Comprimento do aparelho de apoio
a'	Comprimento útil do aparelho de apoio
b	Largura do aparelho de apoio
b'	Largura útil do aparelho de apoio
b_e	Largura efetiva do aparelho de apoio
b_n	Menor dimensão útil do aparelho de apoio
c	Espessura do cobrimento
d	Diâmetro dos furos no aparelho de apoio
d	Espessura da camada de elastômero
d_i	Espessura de uma camada de elastômero
e	Excentricidade da carga vertical aplicada
f	Coeficiente de atrito
f'	Coeficiente de atrito
g	Aceleração da gravidade
h	Altura total do aparelho de apoio
h_n	Altura da camada de elastômero
l	Comprimento total do aparelho de apoio
l_e	Comprimento efetivo do aparelho de apoio

l_p	Perímetro do aparelho livre de carregamento
k	Coeficiente de majoração das cargas acidentais vivas
n	Número de furos no aparelho de apoio
n_t	Número de camadas de elastômero
t	Espessura de uma camada de elastômero
t_e	Espessura efetiva da camada de elastômero
t_i	Espessura da camada de elastômero em análise
t_q	Espessura total do elastômero na tesoura

Gregos maiúsculos

ΔH	Deslocamento relativo das faces do aparelho
Σt_i	Espessura total de elastômero no aparelho
T	Tensão de cisalhamento total
T_α	Tensão de cisalhamento na rotação
T_{lc}	Tensão de cisalhamento longitudinal de curta duração
T_{ll}	Tensão de cisalhamento longitudinal de longa duração
T_{tc}	Tensão de cisalhamento transversal de curta duração
T_{tl}	Tensão de cisalhamento transversal de longa duração

Gregos minúsculos

α	Ângulo de rotação do aparelho de apoio
$\alpha_{a,d}$	Ângulo de rotação em toda a largura a do aparelho de apoio
$\alpha_{b,d}$	Ângulo de rotação em todo o comprimento b do aparelho de apoio
α_{adm}	Ângulo de rotação admissível de uma camada de elastômero
α_c	Componente da rotação de aplicação lenta
α_b	Ângulo de rotação em toda a largura b do aparelho de apoio (em radianos)
α_l	Área efetiva reduzida devido à carga de efeitos
α_s	Componente da rotação de aplicação rápida
δ_r	Deslocamento horizontal máximo resultante
γ	Distorção cisalhante
ξ_c	Tensão nominal devido a cargas compressivas

ξ_q	Tensão de cisalhamento devido a movimentos de translação
ξ_α	Tensão nominal devido à rotação
σ_c	Tensão média atuante no elastômero
$\sigma_{c,mín}$	Tensão normal mínima
$\sigma_{c,máx}$	Tensão normal máxima
σ_e	Tensão admissível das chapas de aço
σ_m	Tensão média no aparelho de apoio
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima normal
σ_n	Tensão no elastômero
σ_s	Tensão de tração na chapa de aço
$\sigma_s^{a_d}$	Tensão admissível do aço
τ	Tensão tangencial
τ_c	Tensão de cisalhamento no plano de colagem
τ_{cd}	Tensão de cisalhamento associada a cargas horizontais de curta duração
τ_{ld}	Tensão de cisalhamento associada a cargas horizontais de longa duração
$\tau_{máx.}$	Tensão máxima cisalhante
τ_α	Tensão interna associada à rotação

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação de Brasileira de Normas Técnicas
BS	British Standard
CPRN	Concessionária Ponte Rio-Niterói
DIN	Deutche Industrie Norme
EN	European Norm
GUT	Gravidade Urgência e Tendência
NBR	Norma Brasileira
PEP	Programa de Exploração da Ponte Rio-Niterói
TC	Associação de Brasileira de Normas Técnicas
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Os aparelhos de apoio são elementos estruturais de ligação cuja consideração na concepção, dimensionamento e execução de projetos de estruturas de obras de arte, nomeadamente, pontes, viadutos e passarelas, tem função primordial e indispensável para o funcionamento adequado dessas estruturas.

A ação da temperatura, as tensões elásticas induzidas por cargas externas, principalmente as cargas de tráfego, a retração e fluência nos seus materiais constituintes são algumas das principais causas de movimentos relativos entre os seus elementos estruturais (vigas e pilares). Esses movimentos nem sempre podem ser restringidos por algum desses elementos. Nesse caso, as propostas são garantir uma distribuição de tensões adequada e acomodar tais movimentos a partir da instalação de aparelhos de apoio entre o tabuleiro e os pilares de modo a possibilitar a movimentação natural entre esses elementos estruturais.

O uso de aparelhos de apoio é necessário para restrição ou permissão de movimentos de rotação e/ou translação entre os elementos estruturais e a transferência de cargas verticais para os pilares, respeitando as condições de estabilidade e movimentação previstas em projeto.

Existem diversos tipos de aparelhos de apoio, as suas diferenças fundamentais residem nos materiais que os compõem e no grau de liberdade das suas articulações.

Quanto ao tipo de material os aparelhos de apoio podem ser metálicos, de concreto ou elastoméricos; e em função das suas ligações, fixos ou móveis.

Os aparelhos de apoio elastoméricos têm como vantagens a sua durabilidade, resistência à corrosão e vibrações, fácil manutenção e baixo custo, quando comparado aos demais tipos de aparelhos de apoio, e assim justificam a sua adoção em diversas construções.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Elaborar um estudo sobre o comportamento estrutural dos aparelhos de apoio do Trecho Central da Ponte Rio-Niterói à compressão e a rotação, confrontando aspectos

normativos em vigência com resultados de campo, assim como dos diversos métodos de dimensionamento.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

– realizar uma análise de aparelhos de apoio como elementos estruturais, relatando os diferentes tipos existentes, principais diferenças entre si e vantagens de uns sobre os outros;

– aprofundar a análise supracitada para aparelhos de apoio elastoméricos;

– apresentar o dimensionamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado com base em metodologias nacionais e normas internacionais;

– acrescentar ao arcabouço teórico um estudo de caso no qual são analisados dados do monitoramento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói;

– desenvolver dois programas que permitam dimensionar os aparelhos de apoio de elastômero fretado em tamanhos comerciais de um fabricante nacional e verificar o dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói, respectivamente, com base em metodologias nacionais e na EN 1337-3:2005;

– comparar os métodos utilizados na concepção dos programas de dimensionamento e de verificação estabelecendo como padrão a metodologia indicada na EN 1337-3:2005.

1.3. JUSTIFICATIVA

O objeto principal de estudo desta dissertação é a análise do desempenho estrutural dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói, que por se tratar de uma obra de grande porte e de suma importância, desperta interesse aos estudiosos e profissionais da área de análise e dimensionamento estrutural, no que tange às respostas de aparelhos de apoio de elastômero fretado face às solicitações físicas, químicas e mecânicas a que estão submetidos.

Por outro lado, devido à disponibilidade dos resultados de monitoramento e a magnitude desse projeto, verificou-se a possibilidade de corroborar os modelos de dimensionamento aqui apresentados e atestar a sua adequação a casos reais.

Trata-se de pesquisa de interesse para futuros projetos de estruturas, visto as condições reais obtidas em campo, que permitem elaborar modelos consistentes para o dimensionamento estrutural de aparelhos de apoio de elastômero fretado, fornecendo

subsídios para a elaboração de uma norma brasileira específica para o dimensionamento dos mesmos.

1.4. METODOLOGIA

O esquema mostrado na Figura 1.1 ilustra a metodologia adotada no desenvolvimento desta dissertação.

Inicialmente, sobre os aparelhos de apoio, irá se dissertar em breves palavras acerca das tipologias existentes, suas principais características e métodos de dimensionamento em vigência no Brasil e no exterior, destacando-se os aparelhos de elastômero fretado.

As informações obtidas na revisão da literatura e os dados provenientes do monitoramento que fazem parte do controle de qualidade, que por sua vez compõe o programa de conservação e manutenção estrutural implantado na Ponte Rio-Niterói, realizado pela concessionária responsável pela administração da ponte, são verificados com os resultados obtidos nos métodos de dimensionamento usuais e normalizados.

A dissertação é composta por revisão da literatura e modelos de dimensionamento, os quais são aferidos considerando-se os dados de monitoramento efetuado em aparelhos de apoio em uso desde a década de 1970.

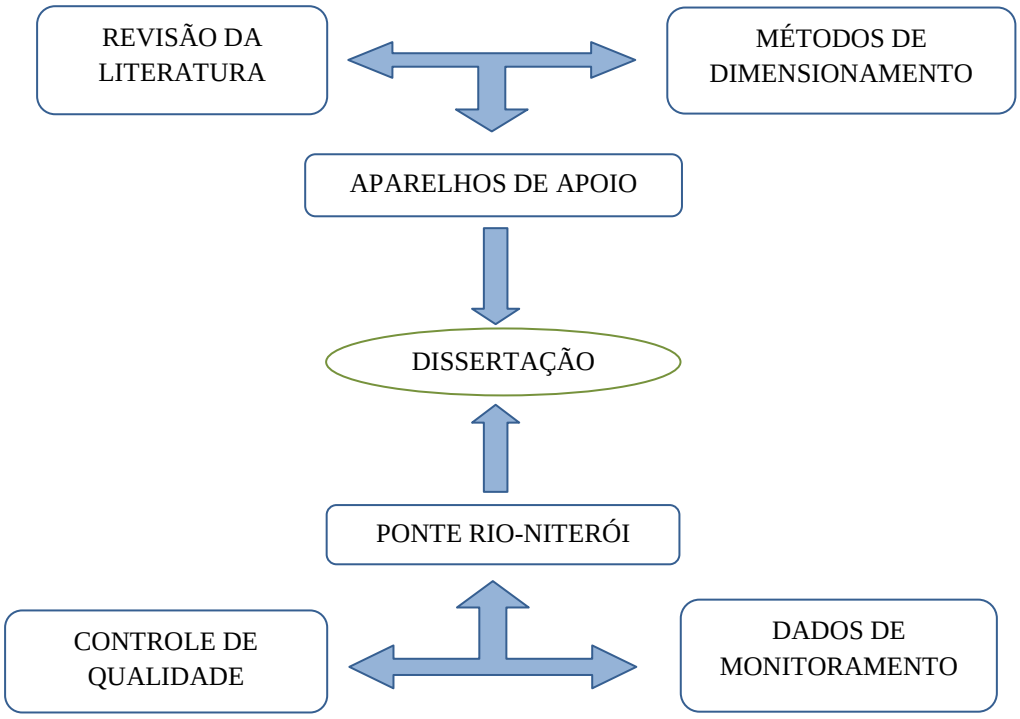


Figura 1.1: Esquema da metodologia adotada nesta dissertação.

1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos principais seguidos de dois anexos que apresentam os critérios de estabilidade dos aparelhos de apoio e o teste utilizado no tratamento estatístico dos dados de monitoramento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói (CHAUVENET), respectivamente e um apêndice que contém os fluxogramas desenvolvidos para a concepção dos programas de dimensionamento e de verificação de aparelhos de apoio de elastômero fretado. A seguir será apresentado de maneira resumida o conteúdo desses capítulos.

O capítulo 2contém uma abordagem acerca das tipologias existentes de aparelhos de apoio e suas principais características, tais como os materiais constituintes e os seus respectivos tratamentos aplicados para a obtenção de melhores propriedades, o grau de liberdade das articulações e indicações para utilização.

O capítulo 3é composto pela revisão bibliográfica relativa à normalização e aos métodos de dimensionamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado em vigência no Brasil e no exterior.

O capítulo 4 contém a apresentação do estudo de caso da dissertação: a Ponte Rio-Niterói e as suas características geométricas, os procedimentos efetuados na monitoração dos seus aparelhos de apoio, os dados que foram utilizados na análise do comportamento estrutural desses aparelhos e o tratamento estatístico aplicado, os programas desenvolvidos para o dimensionamento e a verificação à compressão e rotação de aparelhos de apoio seguido da análise dos resultados e a comparação entre os métodos.

O capítulo 5 contém as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados do comportamento estrutural dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói na compressão e na rotação seguido de sugestões para trabalhos futuros.

2. APARELHOS DE APOIO

2.1. GENERALIDADES

Os aparelhos de apoio são peças de transição entre as vigas e os pilares de uma determinada obra de arte, que transmitem as reações de apoio, permitindo ou restringindo os movimentos das vigas (SÁNCHEZ FILHO, 2014).

O uso de aparelhos de apoio como elementos de ligação em estruturas como pontes e viadutos tornou-se cada vez mais frequente nos últimos dois séculos. Com o aumento das exigências quanto à capacidade portante desse tipo de estruturas, os aparelhos foram submetidos a alterações como os materiais, formatos e processos de fabricação. Existem diversos tipos de aparelhos de apoio, suas diferenças fundamentais residem nos materiais que os compõem e no grau de liberdade de suas articulações.

Segundo a norma DNIT 091/2006 – ES existe uma classificação que grupa os aparelhos de apoio em duas grandes classes: elastoméricos e mecânicos; os apoios elastoméricos têm comportamento vertical elástico e acomodam movimentos horizontais e rotações comprimindo e deslocando as camadas de elastômero ou de materiais similares; os apoios mecânicos têm comportamento vertical rígido e acomodam movimentos horizontais e rotações por deslizamentos, rotações e movimentos pendulares. No entanto, uma classificação mais usual divide os aparelhos de apoio em classes que diferem entre si quanto ao tipo de material e quanto ao tipo de ligação; quanto ao tipo de material os aparelhos de apoio podem ser metálicos, de concreto ou elastoméricos; e em função das suas ligações, fixos ou móveis.

2.2. TIPOLOGIA DOS APARELHOS DE APOIO

2.2.1. Aparelhos de apoio metálicos

Os aparelhos de apoio metálicos são formados a partir da combinação adequada de chapas de aço e roletes metálicos ou duas chapas de aço sendo uma com a superfície plana e a outra com a superfície curva e convexa, (MACHADO e SARTORI, 2010).

Os aparelhos fixos ou articulações fixas conforme a Figura 2.1 têm cavidades usinadas e lubrificadas onde se encaixa o rolete, ao passo que os móveis representados na

Figura 2.2 têm um ou mais roletes entre as chapas planas.

As articulações metálicas são altamente dependentes de manutenção cuidadosa e permanente para que não fiquem prejudicadas no seu funcionamento pelo bloqueio de detritos

e não sejam atacadas pela corrosão, que além de torná-las inservíveis pode levá-las ao colapso.

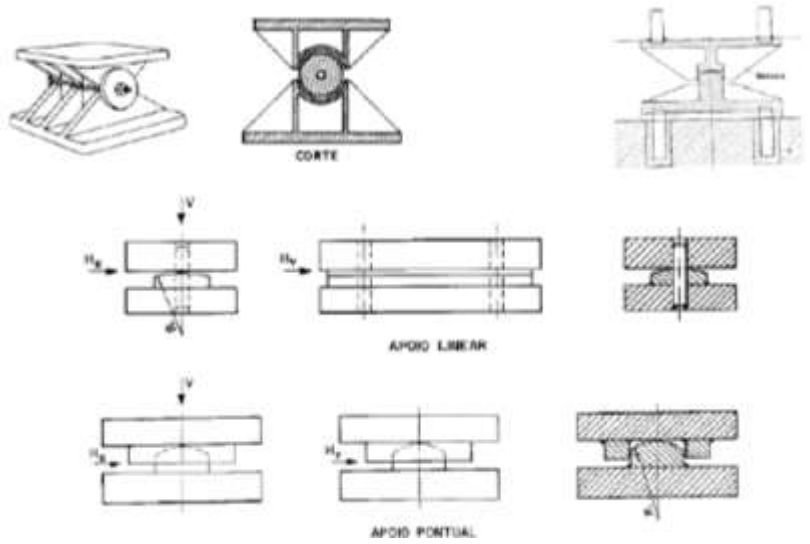
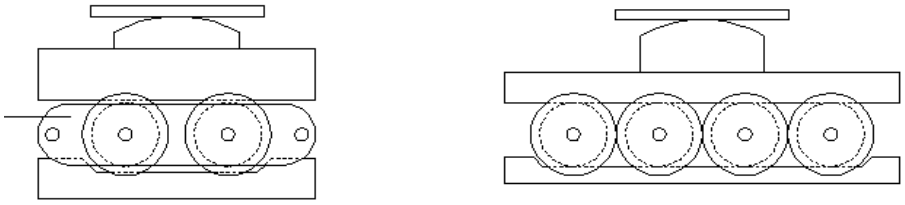


Figura 2.1: Aparelhos de apoio metálicos do tipo fixo. (Fonte: El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010).



(a) (b)

Figura 2.2: Aparelhos de apoio metálicos do tipo móvel (a) apoio com 2 roletes metálicos, (b) apoio com 4 roletes metálicos. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983).

2.2.2. Aparelhos de apoio de concreto

Os aparelhos de apoio de concreto são ligados monoliticamente à estrutura e suportam cargas maiores em relação aos aparelhos metálicos; mas, devido à sua fragilidade caíram em desuso.

Os aparelhos de apoio de concreto podem ser:

– articulação de contato de superfície, (Figura 2.3);

– articulação Mesnager, (Figura 2.4);

– articulação Freyssinet, (Figura 2.5);

– pêndulo de concreto, (Figura 2.6).

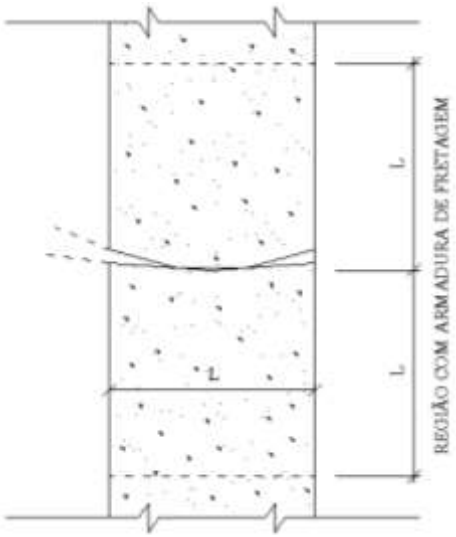


Figura 2.3: Articulação de contato de superfície. (Fonte: adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010).

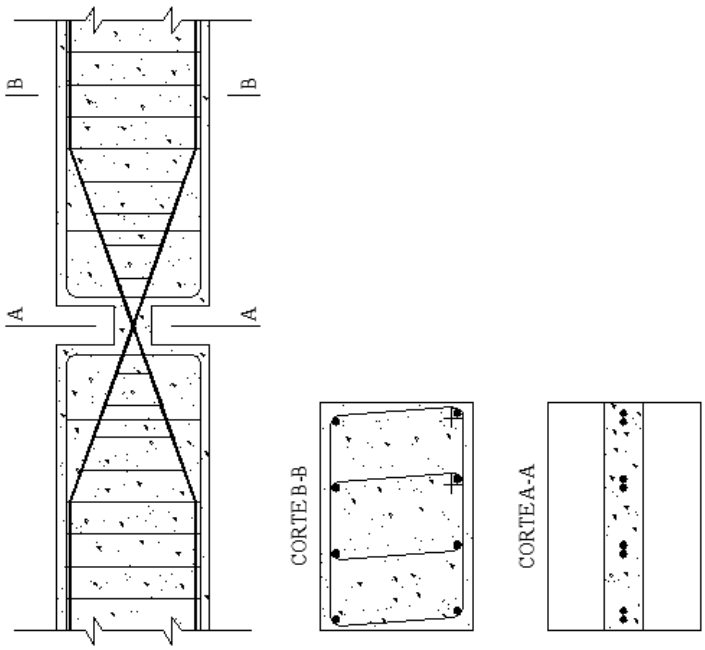


Figura 2.4: Articulação Mesnager.(Fonte:adaptado de El Debs e Takeya, 2009 *apud* MACHADO E SARTORI, 2010).

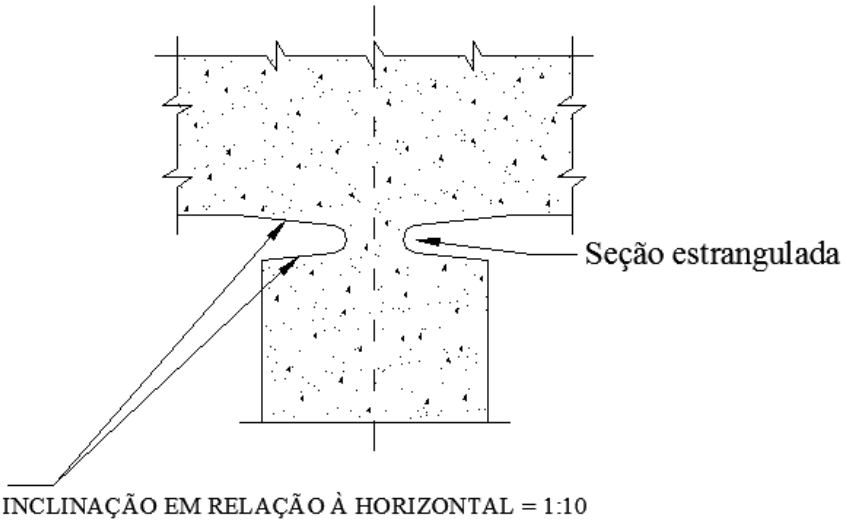


Figura 2.5: Articulação Freyssinet. (Fonte:adaptado de El Debs e Takeya, 2009*apud* MACHADO E SARTORI, 2010).

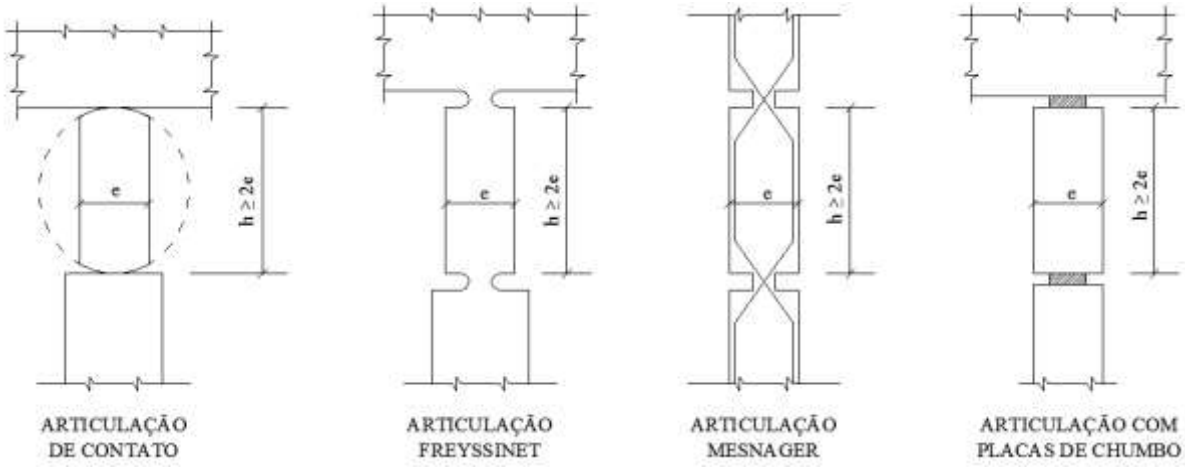


Figura 2.6: Pêndulos de concreto. (Fonte:adaptado de El Debs e Takeya, 2009*apud*MACHADO E SARTORI, 2010).

2.2.3. Aparelhos de apoio elastoméricos

De acordo com a DNIT 091/2006 – ES, os aparelhos de apoio elastoméricos mais conhecidos como aparelhos de apoio de neoprene são os que melhor conseguem combinar as propriedades desejáveis num elemento de ligação. Tendo como material principal a borracha, esses aparelhos têm a capacidade de rotação com pequena resistência e transmissão da reação de apoio numa área bem definida. Os aparelhos de apoio elastoméricos têm como vantagens a sua durabilidade, resistência à corrosão e vibrações, fácil manutenção e baixo custo, quando comparado aos demais tipos de aparelhos de apoio, e assim justificam a sua adoção em diversas construções.

Os aparelhos de apoio elastoméricos podem ser:

– simples;

– fretados;

– fretados com abas;

– deslizantes.

2.2.3.1 Aparelhos de Apoio Elastoméricos Simples

Os aparelhos de apoio de neoprene simples são usados em estruturas que não são solicitadas por carregamentos de grande magnitude ou movimentações, como por exemplo, edifícios, galpões e passarelas de pequeno porte. A Figura 2.7ilustra as características geométricas desse tipo de aparelho de apoio que podem variar de acordo com o fabricante, (http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/).

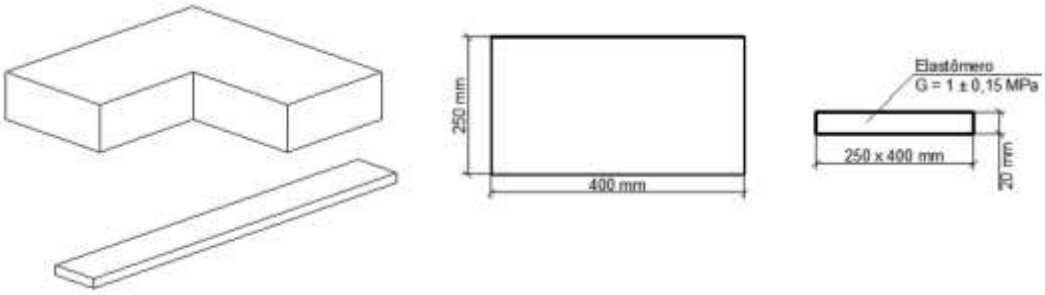


Figura 2.7: Aparelho de apoio de neoprene simples. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010).

2.2.3.2 Aparelhos de Apoio Elastoméricos Deslizantes

Os aparelhos de apoio de neoprene deslizantes são obtidos a partir da ligação de uma chapa de aço inoxidável polida ao espelho ligada a uma chapa de aço fixa na superestrutura com uma folha de teflon (PTFE - politetrafluoretileno) fixado ao elastômero fretado, com aço carbono estrutural, Figura 2.8 (VIVAN, 2015). Esse tipo de apoio é indicado para permitir o deslizamento da superestrutura sem transmissão de solicitações elevadas à estrutura suporte, o seu uso é mais frequente nos encontros em pontes. Também são usados quando não é possível dimensionar o aparelho devido à altura de elastômero necessária para evitar deformações impostas, (http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/).

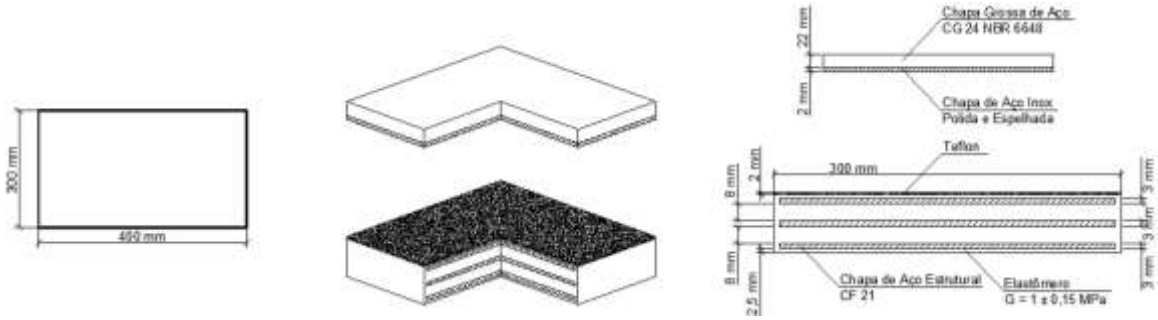


Figura 2.8: Aparelho de apoio de neoprene deslizante. (Fonte:adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/,2010).

2.2.3.3 Aparelhos de Apoio Elastoméricos com Abas

Os aparelhos de apoio de neoprene com abas são apoios fretados com uma ou mais chapas de aço os quais têm cavidade em baixo relevo, dimensionados conforme projeto, onde se faz necessário a moldagem de resina epóxi para nivelamento das estruturas.

A Figura 2.9mostra a sua geometria e dimensões comerciais variantes de acordo com as necessidades de projeto.

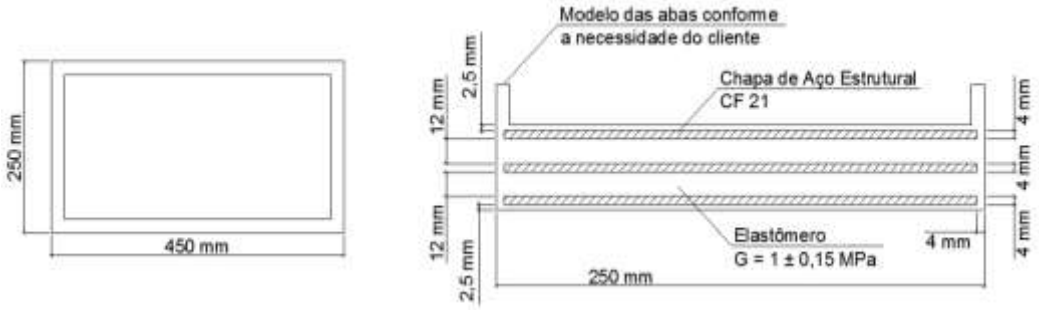


Figura 2.9: Aparelho de apoio de neoprene com abas. (Fonte: adaptado dehttp://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010).

2.2.3.4 Aparelhos de Apoio Elastoméricos Fretados

Os aparelhos de apoio de neoprene fretado são igualmente blocos de elastômero que podem ser reforçados com uma ou mais chapas de aço, onde a efetividade da ligação elastômero-aço é conseguida pelo prévio preparo das chapas de aço com jatos de areia e com aplicação de colantes químicos antes do processo de vulcanização. A tendência da borracha de escoar lateralmente é impedida pelo aço, que resulta tracionado comprimindo o elastômero, (VIVAN, 2015). Podendo existir na forma circular, elíptica ou retangular esses apoios são os mais usados na construção de viadutos, passarelas, pontes rodoviárias e ferroviárias, e em estruturas de grande porte. Na Figura 2.10 observam-se além das suas

características geométricas, a disposição dos materiais e suas dimensões comerciais, ambas variantes de acordo com o fabricante.

As propriedades dos vulcanizados obtidos com base na borracha de neoprene (policloropreno), que é o material principal constituinte desse tipo de aparelho, apresentam boa resistência à intempérie, ao ozônio, ao envelhecimento e aos agentes químicos. Esses vulcanizados apresentam, ainda, boas características mecânicas e uma boa elasticidade a temperaturas baixas da ordem dos -40 °C, para além de serem muito pouco combustíveis e apresentarem uma boa resistência às temperaturas da ordem dos 100 °C ou, por breves períodos, de 120 °C. Aproximando-se da permeabilidade das borrachas de acrilonitrilobutadieno. No tocante à resistência química os vulcanizados da borracha de neoprene apresentam uma boa resistência química aos óleos parafínicos, uma média resistência química aos óleos nafténicos e hidrocarbonetos alifáticos e uma fraca resistência aos hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos clorados e solventes polares.

Elaborado com material altamente resistente e de qualidade comprovada, o neoprene também pode ser fabricado em várias dimensões, conforme as especificações técnicas de projeto. Essa versatilidade do neoprene possibilita o desenvolvimento de apoios de neoprene exclusivos, e que certamente garantem um bom andamento durante a obra e máxima segurança após a finalização, (http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/).

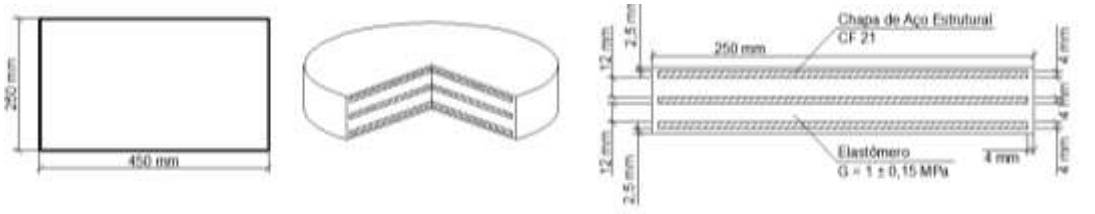


Figura 2.10: Aparelho de apoio de neoprene fretado. (Fonte: adaptado de http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/, 2010).

2.2.4. Materiais

2.2.4.1 Neoprene

O neoprene é um genérico dos elastômeros (borracha sintética) de policloropreno desenvolvido pela Dupont e introduzido no mercado mundial no início da década de 1930. O neoprene é obtido a partir do processo de copolimerização em emulsão aquosa entre o butadieno e o gás clorídrico, em algumas vezes na presença de modificadores e estabilizadores da estrutura polimérica.

As suas principais características são:

– módulo de deformação transversal muito baixo;

– módulo de deformação longitudinal também muito baixo;

– tensão normal de compressão com magnitude razoável, na ordem dos concretos usuais;

– grande resistência às intempéries.

2.2.4.2 Aço de Fretagem

O aço utilizado na fretagem dos aparelhos de apoio de neoprene fretado é o aço carbono estrutural. As suas propriedades como resistência à tração e resiliência são fundamentais para que haja aumento da resistência e diminuição da deformabilidade do aparelho.

2.2.4.3 Teflon

O PTFE Politetrafluoretileno conhecido mundialmente pela marca Teflon da Du Pont é um polímero cujas principais características são a inércia, a impermeabilidade e o baixo coeficiente de atrito. O seu emprego em aparelhos de apoio é útil devido à necessidade de combater a transferência de solicitações verticais à estrutura de apoio e melhorar o desempenho dos aparelhos nessas situações. Destacam-se também outras propriedades como o não envelhecimento e a boa resistência às variações de temperatura, (http://www.indaco.com.br/produtos.php?id_produto=52).

As suas principais características são:

– superfície não aderente, quase nada adere ao PTFE;

– resistente a temperaturas extremas entre -70°C e 260°C;

– quimicamente inerte;

– resistência à umidade e corrosão;

– boa usinabilidade;

– não tóxico.

2.2.5. Processo de vulcanização

A vulcanização é um processo de reticulação caracterizado pela adição de agentes químicos à borracha, que tem como finalidade torná-la mais resistente. Nesse processo as cadeias moleculares da borracha natural são unidas por meio de ligações químicas primárias que resultam na formação de uma rede tridimensional no material. A Figura 2.11 mostra a cadeia molecular da borracha antes e depois do processo.

A nova organização estrutural permite manter, ou incrementar as propriedades elásticas e reduzir o comportamento plástico do material vulcanizado, (STEIN, 2012).

O elastômero que inicialmente se apresenta como uma massa fraca, muito plástica e sem propriedades mecânicas de interesse é transformado num produto forte, resistente e com boas características elásticas, Figura 2.12 (GUERREIRO, 2003).

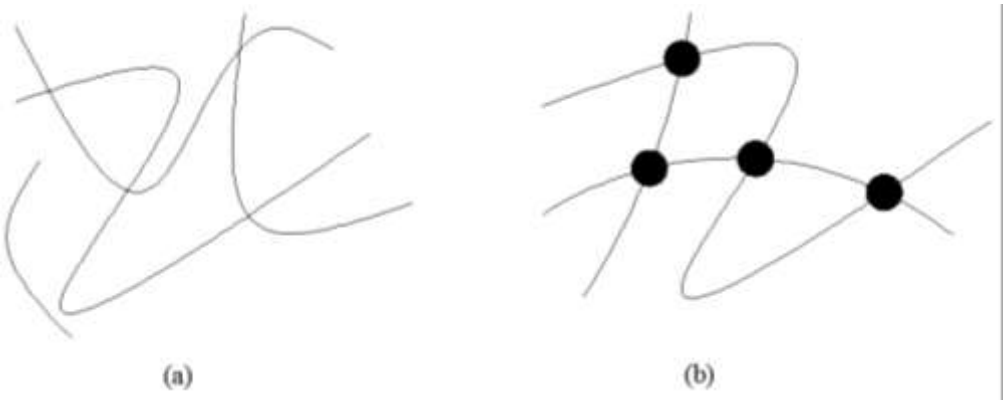


Figura 2.11: Cadeias moleculares da borracha (a) borracha não vulcanizada, (b) borracha vulcanizada. (Fonte:adaptado de http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php, 2015).

Observa-se na Figura 2.12 o ganho de resistência da borracha após o processo de vulcanização.

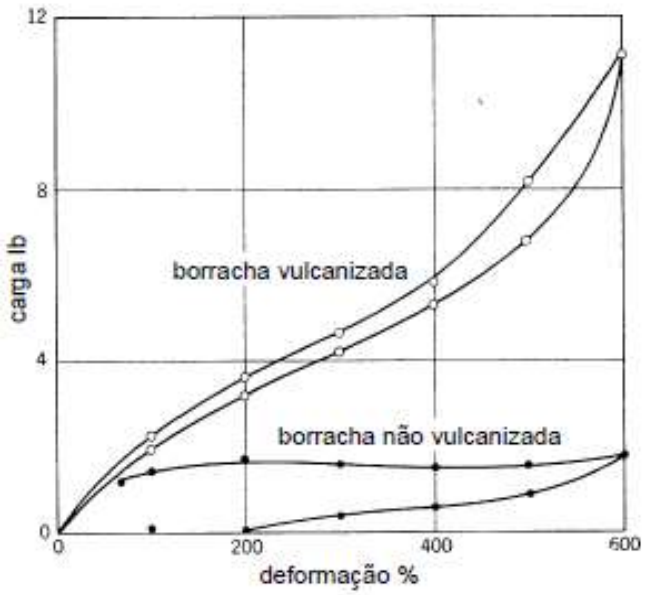


Figura 2.12: Curvas Força x Deformação de borrachas vulcanizadas e não vulcanizadas. (Fonte: adaptado de Billmeyer, 1971*apud* GUERREIRO, 2003).

3. DIMENSIONAMENTO DE APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS

3. 1 GENERALIDADES

O dimensionamento dos aparelhos de apoio deve atender às prescrições das normas em vigência para que o seu funcionamento seja satisfatório. Para tal é necessário atender às especificações de projeto previstas nas normas. Além das normas existem métodos que foram desenvolvidos por pesquisadores que também auxiliam nesse processo.

As etapas do dimensionamento são de responsabilidade do fabricante, porém, é necessário que o engenheiro responsável pelo projeto estrutural da obra saiba definir o tipo de aparelho de apoio adequado para determinada situação, bem como suas dimensões aproximadas para que seja previsto o espaço necessário para a instalação e possíveis obras de manutenção e/ou substituição desses aparelhos.

Existem vários métodos que regem o dimensionamento, a instalação e o funcionamento de aparelhos de apoio em vigência no Brasil e no exterior. Alguns desses métodos constituem o acervo de normas técnicas disponíveis para consulta.

Verifica-se que há uma variação no enfoque entre os diversos procedimentos de dimensionamento, os quais são mostrados e analisados nesta dissertação.

Essas diferentes metodologias serão confrontadas com as medições realizadas nos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói.

3. 2 NORMALIZAÇÃO

No Brasil, as primeiras normas referentes a aparelhos de apoio foram instituídas no fim da década de 1980 e são:

– aparelhos de apoio de elastômero fretado NBR 9783-1987;

– aparelho de apoio de elastômero – distorção – método de ensaio NBR 9785-1987;

– aparelho de apoio de elastômero – deslizamento – método de ensaio NBR 9786-1987.

Essas normas especificam as condições exigíveis para a aceitação ou rejeição e prescrevem os métodos de ensaio de distorção e deslizamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado. No entanto, no tocante ao dimensionamento dos aparelhos nada é citado nessas normas. Vale ressaltar que as mesmas vigoraram de 1987 a 31 de Outubro de 2014, data em que foram canceladas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. A ABNT

analisa no momento a viabilidade da reedição dessas normas e da formação de uma nova Comissão de Estudos de Aparelhos de Apoio Estruturais. A proposta seria manter o conteúdo das normas com alguns ajustes até que junto da nova comissão fossem analisadas alterações necessárias, o que exigiria cálculos comparativos, ensaios e análise em modelos matemáticos. Portanto, o objetivo da nova Comissão é normalizar projetos, ensaios, proteção, armazenamento, transporte, instalação, inspeção e manutenção dos aparelhos de apoio elastoméricos e metálicos (VIVAN, 2015).

A deficiência das normas brasileiras quanto ao dimensionamento de aparelhos de apoio, foi suprida pelo estudo realizado por alguns pesquisadores como MASON (1977), PFEIL (1983) e MARCHETTI (2008), que terão suas metodologias de dimensionamento neste capítulo apresentadas.

A EN 1337-3:2005, a DIN 4141-14:1986 *apud* STEIN (2012) e a metodologia inglesa são as metodologias estrangeiras que terão os seus procedimentos aqui apresentados.

3. 3 METODOLOGIA DE MASON (1977)

A metodologia de MASON (1977) consiste em limitar as tensões atuantes no neoprene e nos planos de colagem a valores admissíveis. De modo a garantir a estabilidade limita-se também a sua altura total. Para tal é necessário que sejam determinadas para cada situação de carregamento as tensões normais e cisalhantes que se desenvolvem no aparelho.

Para efeito de cálculo admite-se que a borracha apresente um comportamento hidrostático sob a ação de tensões normais. São analisadas as respostas do aparelho às seguintes solicitações:

– força de compressão;

– rotação;

– força horizontal.

Na Figura 3.1estão representadas as situações de carregamento que constituem a metodologia de MASON (1977).

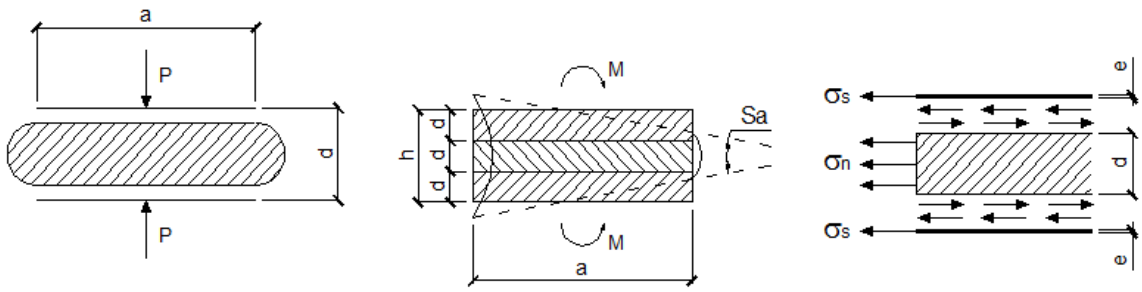


Figura 3.1: Situações de carregamento analisadas. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

3.3.1 Verificação das tensões devido à compressão

Uma camada de neoprene sob a ação de uma força de compressão desenvolve tensões normais e cisalhantes que podem ser determinadas conforme mostrado a seguir (Figura 3.2).

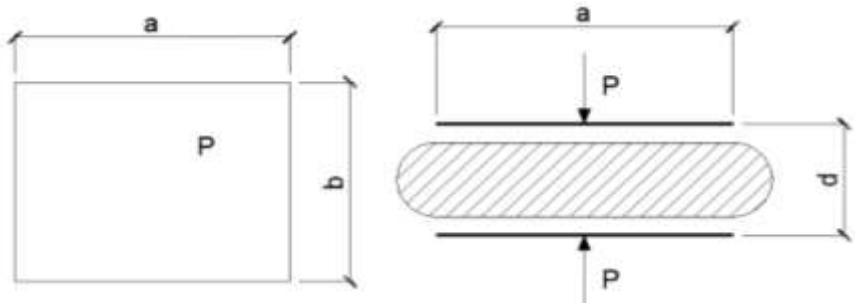


Figura 3.2: Camada de neoprene sujeita à compressão. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

Efetuando-se uma análise, constata-se que esse carregamento gera no aparelho as tensões mostradas na Figura 3.3.

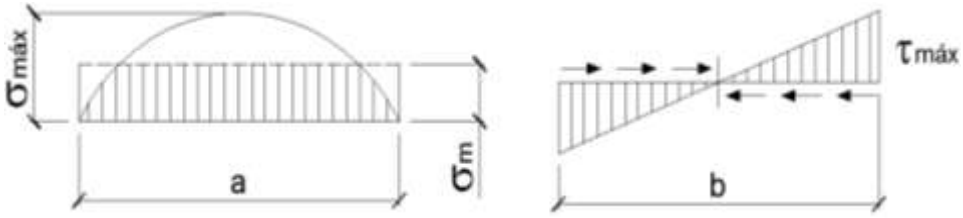


Figura 3.3: Tensões geradas pela força de compressão. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

As tensões geradas, normal média e máxima e a tensão cisalhante são obtidas a partir das expressões mostradas a seguir.

- Tensão média no aparelho

$$\sigma_m = \frac{P}{A} \qquad \text{Equação 3.1}$$

- Tensão máxima normal

$$\sigma_{máx.} = k_1 \sigma_m \qquad \text{Equação 3.2}$$

$$k_1 = \begin{cases} 2{,}10, & a \cong b \\ 1{,}50, & b \to \infty \end{cases}$$

- Tensão tangencial

$$\tau_{máx.} = k_2 \sigma_m \left(\frac{d}{a}\right) \qquad \text{Equação 3.3}$$

$$k_2 = \begin{cases} 4{,}55, & a \cong b \\ 3{,}00, & b \to \infty \end{cases}$$

onde

P – força de compressão aplicada;

A– área do aparelho de apoio em planta $(a \times b)$;

σ_m– tensão média no aparelho;

d – espessura da camada de neoprene;

a – maior dimensão do aparelho em planta.

3.3.2 Verificação das tensões devido à rotação

O momento de flexão associado à rotação αimposta pela superestrutura gera tensões no neoprene e nos planos de colagem, que são obtidas por meio das expressões mostradas a seguir. A Figura 3.4mostra a variação da tensão normal ao longo da maior dimensão do aparelho de apoio.

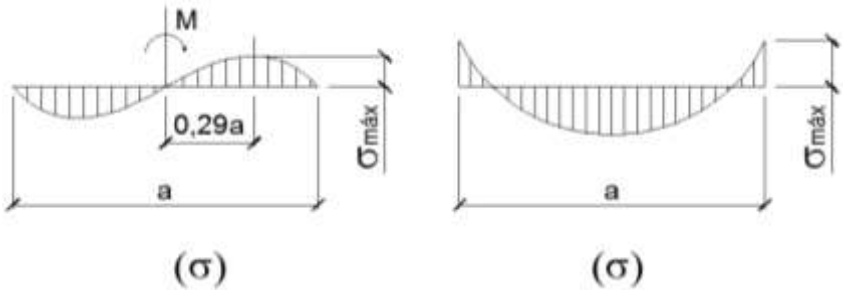


Figura 3.4: Tensões geradas pela rotação. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

- Tensão máxima normal

$$\sigma^*_{máx} = 5{,}75\,\frac{M}{a^2} \qquad \text{Equação 3.4}$$

- Tensão máxima cisalhante

$$\tau^*_{máx} = k_3 \alpha E \left(\frac{a}{d}\right)^2 \qquad \text{Equação 3.5}$$

$$k_3 = \begin{cases} 0{,}13, & a \cong b \\ 0{,}17, & b \to \infty \end{cases}$$

- Momento associado à rotação

$$M = \frac{E_i I}{d}\alpha \qquad \text{Equação 3.6}$$

$$I = \frac{a^3 \cdot b}{12} \qquad \text{Equação 3.7}$$

- Módulo de elasticidade aparente de uma camada de neoprene fretada

$$E_i = k_4 . E . \left(\frac{a}{d}\right)^2 \qquad \text{Equação 3.8}$$

$$k_4 = \begin{cases} 0{,}049, & a \cong b \\ 0{,}066, & b \to \infty \end{cases}$$

onde

M–momento associado à rotaçãoα;

α–rotação imposta ao aparelho;

E–módulo de elasticidade do neoprene;

E_i– módulo de elasticidade aparente de uma camada de neoprene fretada;

I– momento de inércia da seção em ralação ao eixo de maior lado.

As expressões mostradas referem-se ao comportamento de uma camada de neoprene entre duas chapas de aço. Na prática de projeto podem existir rotações que gerem tensões superiores às aceitáveis para apenas uma camada de neoprene. Nesses casos aumenta-se o número de camadas do aparelho de modo a reduzir a rotação específica por camada, desse

modo, a rotação global do aparelho passa a ser o somatório das rotações das camadas que o constituem.

Deve-se tomar cuidado ao se aumentar o número de camadas do aparelho, pois a sua altura total$h$não deve exceder o limite $h \cong \frac{a}{5}$; o aumento do número de camadas garante a estabilidade do aparelho.

A Figura 3.5mostra o deslocamento angular das camadas constituintes do aparelho quando sujeitas à flexão.

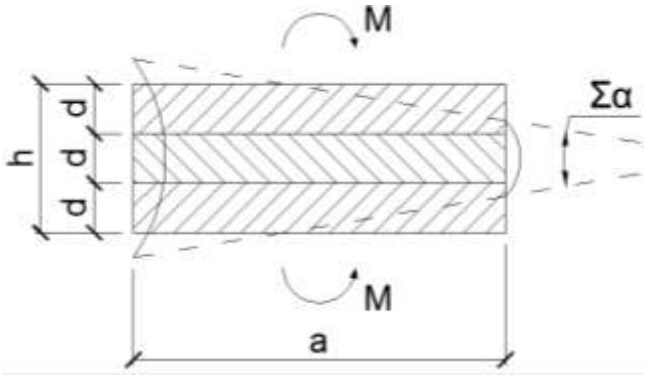


Figura 3.5: Representação da rotação global do aparelho. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

3.3.3 Verificação das tensões devidas à força horizontal

A Figura 3.6 mostra as tensões normais que surgem nos planos de colagem, na camada de elastômero e nas placas de aço ao se aplicar uma força horizontal no aparelho.

A sequência apresentada a seguir define os diversos parâmetros e expressões para o dimensionamento.

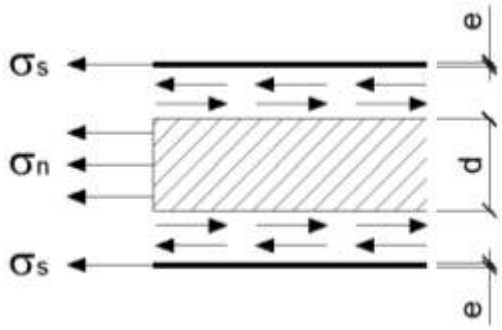


Figura 3.6: Tensões geradas pela força horizontal. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

- Tensão tangencial

$$\tau = \frac{H}{A}$$ Equação 3.9

- Distorção cisalhante

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \leq 0{,}7 \qquad \text{Equação 3.10}$$

- Deslocamento relativo das faces do aparelho

$$\Delta H = \gamma h = \frac{Hh}{GA} \qquad \text{Equação 3.11}$$

$$A = a \times b \qquad \text{Equação 3.12}$$

onde

H– força horizontal aplicada;

G– módulo de cisalhamento do neoprene;

h– altura total do aparelho.

3.3.4 Tensões de tração na chapa

$$\sigma_s = \sigma_n \frac{d}{e} \qquad \text{Equação 3.13}$$

onde

$$\sigma_n = \sigma^c_{máx.} + \sigma^r_{máx.} \qquad \text{Equação 3.14}$$

$$\sigma_n = k_1 \sigma_m + 5{,}75 \frac{M}{a^2} \qquad \text{Equação 3.15}$$

3.3.5 Recomendações

A maioria dos aparelhos de apoio em uso admite tensões médias$\sigma_m$da ordem de 10 a 12 MPa, desconsiderando-se a rotação. O módulo de elasticidade$E$do neoprene é da ordem de 4 MPa, podendo-se tomar para módulo de cisalhamento$G \cong \frac{E}{3}$, isto é,$G \cong 1{,}3$ MPa.

3.3.6 Condições de não deslizamento

De acordo com MASON (1977) a Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) tem um regulamento para aparelhos de apoio de borracha fretada, onde se distinguem cargas de aplicação lenta (cargas permanentes, efeitos térmicos, retração) e cargas de aplicação rápida (carga móvel, frenagem, *etc*.).

SendoP_ce$H_c$as cargas verticais e horizontais de aplicação lenta eP_se$H_s$as de aplicação rápida, o regulamento prescreve as condições de não deslizamento do aparelho, que são dadas por:

$$H_c < f' P_c \qquad \text{Equação 3.16}$$

$$H_c + H_s < f(P_c + P_s) \qquad \text{Equação 3.17}$$

onde$f$ e f'são os coeficientes de atrito definidos por:

$$f' = 0{,}10 + \frac{2}{\sigma'_m} \qquad \text{Equação 3.18}$$

$$f = 0{,}10 + \frac{2}{\sigma_m} \qquad \text{Equação 3.19}$$

sendoσ'_m e σ_m em kgf/cm² e

$$\sigma'_m = \frac{P_c}{A'_c} > 20 \ kgf/cm^2 \qquad \text{Equação 3.20}$$

$$\sigma_m = \frac{P_c + P_s}{A} \qquad \text{Equação 3.21}$$

As áreasA'_ceAsão definidas descontando-se o deslocamento horizontal do aparelho para as cargasH_ce$H_c + H_s$, respectivamente.

A Figura 3.7mostra o deslocamento horizontal do aparelho sob a ação de forças horizontais de aplicação lenta e rápida.

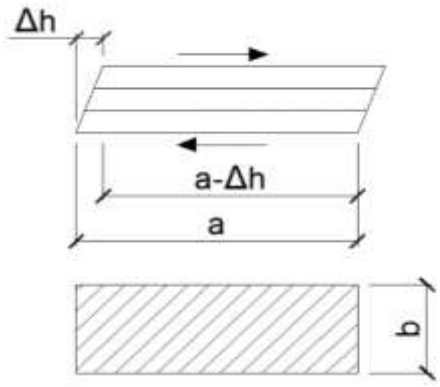


Figura 3.7: Deslocamento horizontal do aparelho. (Fonte: adaptado de MASON, 1977).

Onde

$$A'_c = \left(a - \Delta_{H_c}\right) b \qquad \text{Equação 3.22}$$

$$A = \left(a - \Delta_{H_{c+s}}\right)b \qquad \text{Equação 3.23}$$

O módulo de cisalhamento da borracha para carregamentos rápidosG_sé duas vezes maior do que o módulo de cisalhamento para cargas de longa duraçãoG; esse fato deve ser levado em conta no projeto. A soma das tensões cisalhantes nos planos de colagem devidas aP,Heα, deverá obedecer à condição:

$$\tau = \tau_p + \tau_H + \tau_\alpha < 5G \qquad \text{Equação 3.24}$$

As tensões cisalhantes são dadas por:

$$\tau_p = \frac{1{,}5}{S_i}\left(\frac{P_c + 1{,}5P_s}{ab}\right) \qquad \text{Equação 3.25}$$

$$\tau_H = \frac{H_c + 0{,}5H_s}{A} \qquad \text{Equação 3.26}$$

$$\tau_\alpha = \frac{Ga^2}{2d_i h}(\alpha_c + 1{,}5\alpha_s) \qquad \text{Equação 3.27}$$

onde

$$S_i = \frac{ab}{2d_i(a+b)} \qquad \text{Equação 3.28}$$

$$e > \frac{2(d_1 + d_2)(P_c + 1{,}5P_s)}{A'\sigma_s^{a_d}} \qquad \text{Equação 3.29}$$

$$\operatorname{tg}\alpha_c < \frac{6\sum e_i}{a} \qquad \text{Equação 3.30}$$

$$e_i = \frac{d_i\sigma'_m}{4GS_i^2 + 3\sigma'_m} \qquad \text{Equação 3.31}$$

onde

d_i– espessura de uma camada de neoprene;

α_c – componente da rotação de aplicação lenta;

α_s– componente da rotação de aplicação rápida.

$\sigma_s^{a_d}$– tensão admissível do aço.

Portanto, o dimensionamento dos aparelhos de apoio de neoprene fretado, por MASON (1977), compreende as seguintes verificações:

– escolha das dimensões em planta $a \times b$, com base na tensão média$\sigma_m$admissível;

– verificação do efeito de rotação α;

– verificação ao deslizamento;

– verificações das tensões nas chapas de aço e nos planos de colagem;

– observação da altura máxima do aparelho.

3. 4 METODOLOGIA DE PFEIL (1983)

O dimensionamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado de acordo com a metodologia de PFEIL (1983) é realizado conforme as expressões a seguir. Este procedimento é baseado em recomendações francesas (PFEIL, 1983).

3.4.1 Verificação das tensões devido à compressão

As tensões internas de cisalhamento e de compressão transversal geradas numa camada de elastômero fretado sujeita a força de compressão simples são mostradas na Figura 3.8.

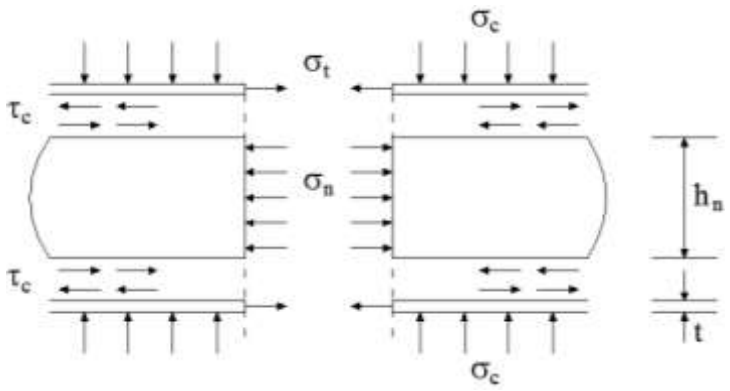


Figura 3.8: Tensões internas numa camada de elastômero fretado sujeita a força de compressão simples. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983).

- Tensão média atuante

$$\sigma_c = \frac{N}{a \cdot b} \leq 15 \text{ MPa} \qquad \text{Equação 3.32}$$

onde

N– força total vertical aplicada ao aparelho;

a– comprimento do aparelho;

b– largura do aparelho.

- Tensão de cisalhamento no plano de colagem

$$\tau_c = 1{,}5 \cdot \frac{\sigma_c}{F_f} \leq 3G_n \qquad \text{Equação 3.33}$$

onde

$$F_f = \frac{ab}{2(a+b)h_n} \qquad \text{Equação 3.34}$$

onde

h_n– altura da camada de elastômero;

F_f–fator de forma de uma camada de elastômero;

G_n– módulo de cisalhamento do elastômero.

3.4.2 Verificação das tensões devido à rotação

Submetendo-se uma camada de elastômero fretado a uma rotação α (Figura 3.9), o elastômero fica sujeito a tensões cisalhantes PFEIL (1983).

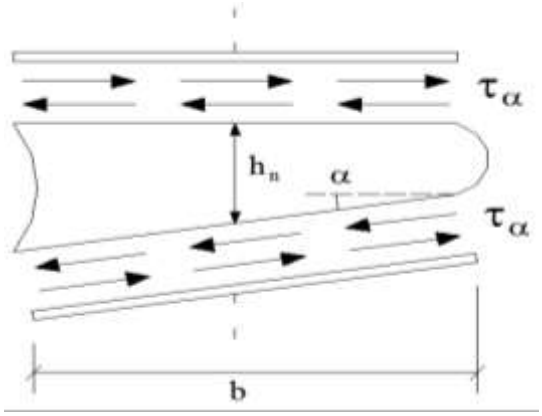


Figura 3.9: Tensões internas numa camada de elastômero geradas por uma rotação imposta. (Fonte:adaptado de PFEIL, 1983).

- Tensão interna associada à rotação

$$\tau_\alpha = \frac{G_n}{2}\left(\frac{A_n}{h_n}\right)\mathrm{tg}\left(\frac{\alpha}{n}\right) \leq 1{,}5G_n \qquad \text{Equação 3.35}$$

onde

n–número de camadas de elastômero;

α–ângulo de rotação imposto;

A_n–área da camada de elastômero em planta.

- Verificação à flambagem

$$n \cdot h_n \geq \frac{1}{5} b_n \qquad \text{Equação 3.36}$$

- Condição de não deslizamento

$$H < \mu \cdot \sigma_{c,mín} a \cdot b \qquad \text{Equação 3.37}$$

ondeμ é o coeficiente de atrito e pode ser determinado a partir da seguinte expressão:

$$\mu = 0{,}12 + \frac{2}{\sigma_{c,mín}} \qquad \text{Equação 3.38}$$

3.4.3 Verificação das tensões devido à força horizontal

As solicitações horizontais provocam nas camadas de elastômero tensões de cisalhamento (Figura 3.10).

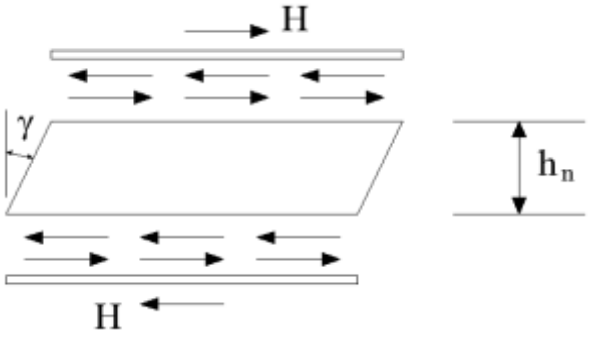


Figura 3.10: Tensões internas de uma camada de elastômero sujeita a solicitações horizontais (H). (Fonte: adaptado de PFEIL, 1983).

$$\tau = \frac{H}{A_n} \qquad \text{Equação 3.39}$$

Onde H é a força horizontal atuante.

- Tensão de cisalhamento associada às cargas horizontais de longa duração

$$\tau_{ld} = \frac{H_{ld}}{A_n} \leq 0{,}5G_n \qquad \text{Equação 3.40}$$

onde

H_{ld} – força horizontal de longa duração;

- Distorção

$$\tan\gamma_{ld} = \frac{\tau_{ld}}{G_n} \leq 0{,}5 \qquad \text{Equação 3.41}$$

$$\tan\gamma_{ld} + \tan\gamma_{cd} = \frac{\tau_{ld} + 0{,}5\tau_{cd}}{G_n} \leq 0{,}7 \qquad \text{Equação 3.42}$$

onde γ é a deformação angular do aparelho de apoio gerada por cisalhamento e é obtida a partir da seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{H_{ld}}{A_n \sigma_n} \qquad \text{Equação 3.43}$$

3. 5 METODOLOGIA DE MARCHETTI (2008)

3.5.1 Verificação das tensões devido à compressão

- Tensões normais

$$\sigma_{c,máx} = \frac{N_{máx}}{a'b'} \leq 10MPa \qquad \text{Equação 3.44}$$

$$\sigma_{c,mín} = \frac{N_{mín}}{a'b'} \geq 3MPa \qquad \text{Equação 3.45}$$

- Tensão cisalhante

$$\tau_c = 1{,}5 \cdot \frac{\sigma_{c,máx}}{F_f} \leq 3G_n \qquad \text{Equação 3.46}$$

Onde F_f é o fator de forma e é obtido a partir da expressão:

$$F_f = \frac{ab}{2(a+b)h_n} \qquad \text{Equação 3.47}$$

- Recalque

$$D_h = \frac{\sigma_{c,máx}(n_t + 2c)}{4G_n F_f + 3\sigma_{c,máx}} \quad \text{Equação 3.48}$$

onde

τ_c– tensão média atuante no elastômero;

n_t– número de camadas de elastômero;

c– espessura do cobrimento;

h– altura total do aparelho de apoio.

3.5.2 Verificação das tensões devido à força horizontal

- Tensão de cisalhamento longitudinal de longa duração

$$\mathrm{T}_{ll} = \frac{H_{ll}}{a'b'} \leq 0{,}5G_n \quad \text{Equação 3.49}$$

- Tensão de cisalhamento longitudinal de curta duração

$$\mathrm{T}_{lc} = \frac{H_{lc}}{a'b'} \leq 0{,}5G_n \quad \text{Equação 3.50}$$

- Tensão de cisalhamento transversal de longa duração

$$\mathrm{T}_{tl} = \frac{H_{tl}}{a'b'} \leq 0{,}5G_n \quad \text{Equação 3.51}$$

- Tensão de cisalhamento transversal de curta duração

$$\mathrm{T}_{tc} = \frac{H_{tc}}{a'b'} \leq 0{,}5G_n \quad \text{Equação 3.52}$$

- Tensões totais

$$\mathrm{T}_l = \mathrm{T}_{ll} + \mathrm{T}_{lc} \leq 0{,}7G_n \quad \text{Equação 3.53}$$

$$\mathrm{T}_t = \mathrm{T}_{tl} + \mathrm{T}_{tc} \leq 0{,}7G_n \quad \text{Equação 3.54}$$

onde

T_{ll}– tensão de cisalhamento longitudinal de longa duração;

T_{lc}– tensão de cisalhamento longitudinal de curta duração;

T_{tl}– tensão de cisalhamento transversal de longa duração;

T_{tc}– tensão de cisalhamento transversal de curta duração;

H_{ll}– força horizontal longitudinal de longa duração;

H_{lc}– força horizontal longitudinal de curta duração;

H_{tl}– força horizontal transversal de longa duração;

H_{tc}– força horizontal transversal de curta duração.

- Distorção

$$H_r = \sqrt{(H_{ll} + 0{,}5H_{lc})^2 + (H_{tl} + 0{,}5H_{tc})^2} \quad \text{Equação 3.55}$$

$$D_{ab} = \frac{ntH_r}{abG_n} \quad \text{Equação 3.56}$$

$$tg(a) = \frac{D_{ab}}{h} < 0{,}5 \quad \text{Equação 3.57}$$

ondeH_r é a força horizontal total resultante.

3.5.3 Verificação das tensões devido à rotação

- Tensão cisalhante

$$\mathrm{T}_a = \frac{G_n a'^2 (A_0 + A_t)}{2ht} \leq 1{,}5G_n \quad \text{Equação 3.58}$$

onde

A_0– ângulo inicial;

A_t– ângulo total;

t– espessura da placa de neoprene.

- Tensão cisalhante total

$$\mathrm{T} = \mathrm{T}_n + \mathrm{T}_l + \mathrm{T}_a \leq 5G_n \quad \text{Equação 3.59}$$

- Esbeltez e espessura mínima

$$h < \frac{a'}{5} \quad \text{Equação 3.60}$$

$$h > \frac{a'}{10} \quad \text{Equação 3.61}$$

- Levantamento das bordas do aparelho

$$\frac{A_t}{n_t} < \frac{3\left(\sigma_{c,máx} + \sigma_{c,mín}\right) \cdot 0{,}5\left(\frac{t}{a}\right)^2}{G_n \cdot F_f} \qquad \text{Equação 3.62}$$

- Escorregamento

$$\frac{H_r}{N_{mín}} < 0{,}10 + \frac{0{,}06}{\sigma_{c,mín}} \qquad \text{Equação 3.63}$$

- Espessura das chapas metálicas

$$e > \frac{a}{F} \cdot \frac{\sigma_{c,máx}}{\sigma_e} \qquad \text{Equação 3.64}$$

onde σ_eé a tensão admissível nas chapas de aço.

3.5.4 Deformabilidade

$$Def = \frac{nt}{Ga'b'} \qquad \text{Equação 3.65}$$

3. 6 METODOLOGIA INGLESA

A BS 5400-9.1:1983 *apud* LEE (2004) estabelece critérios para o dimensionamento de aparelhos de apoio de elastômero fretado que constituem a metodologia inglesa. O material e suas aplicações, propriedades mecânicas, propriedades dinâmicas e não só, são especificados nessa metodologia de modo a garantir aos aparelhos um comportamento estrutural satisfatório.

A rigidez de um aparelho de apoio de borracha sujeito a compressão é influenciada pelo fator de forma S, que é definido como a razão entre a área carregada e a área de superfície livre do aparelho.

Para aparelhos de apoio de neoprene simples, tem-se:

$$S = \frac{A}{l_p t_e} \qquad \text{Equação 3.66}$$

com

$$l_p = 2(l + b) \qquad \text{Equação 3.67}$$

ou

$$l_p = 2(l + b) + n\sum \pi d \qquad \text{Equação 3.68}$$

e

$$t_e = 1{,}8t \qquad \text{Equação 3.69}$$

onde

A– área total do aparelho de apoio em planta;

l_p– perímetro do aparelho livre de carregamento;

n– número de furos no aparelho;

d– diâmetro dos furos;

l– comprimento total do aparelho;

b– total do aparelho;

t_e– espessura efetiva de uma camada de elastômero; tomada como a espessura real,$t_i$por camadas interiores e $1{,}4t_i$ para as camadas exteriores;

t– espessura real de elastômero.

Os aparelhos de apoio de neoprene fretado têm o fator de forma para cada camada de elastômero dado pela expressão abaixo:

$$S = \frac{A_e}{l_p t_e} \qquad \text{Equação 3.70}$$

Com

$$A_e = l_e b_e \qquad \text{Equação 3.71}$$

$$l_p = 2(l_e + b_e) \qquad \text{Equação 3.72}$$

onde

A_e– área eficaz do aparelho, ou seja, área comum entre o elastômero e a chapa de aço;

l_e– comprimento efetiva do aparelho;

b_e– largura efetiva do aparelho.

A rigidez ao cisalhamento dos aparelhos de apoio elastoméricos não é afetada pela adição de aço, e a deformação de cisalhamento é normalmente limitada para evitar problemas

de fadiga. A deformação por cisalhamento$\xi_q$devido ao movimento de translação é limitada por:

$$\xi_q = \frac{\delta_r}{t_q} \leq 0{,}7 \qquad \text{Equação 3.73}$$

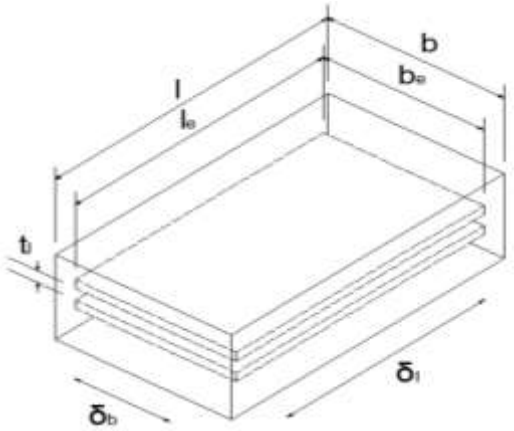


Figura 3.11: Representação esquemática de um aparelho de apoio elastomérico. (Fonte: adaptado de LEE, 1994).

A tensão média de projetoV/Asobre aparelhos de apoio é limitada àGSou$5G$, consoante o que for menor, onde$G$é o módulo de elasticidade transversal do elastômero eSé o fator de forma. Em aparelhos de apoio usados em regiões frias, a variação de$G$deve ser estabelecida por meio de ensaios. No entanto, na ausência de dados de ensaios, valores de$G$sejam obtidos multiplicando-se os valores da Tabela 3.1 por$1 - T/25$onde T(ºC) é a temperatura mínima

Tabela 3.1: Constantes elásticas.

Dureza	**Módulo de elasticidade transversal G (MPa)**	**Módulo de compressibilidade do elastômero E_b (MPa)**
35	0,38	2000
40	0,45	2000
45	0,53	2030
50	0,63	2060
55	0,75	2090
60	0,89	2120
65	1,04	2150
70	1,22	2180
75	1,42	2210

Fonte: LEE, 1994.

O elastômero é um material visco-elástico e o seu módulo de elasticidade transversal é dependente da frequência ou taxa de aplicação e também da amplitude da tensão. Portanto, para variações de tensão rápidas, como por exemplo, devido a cargas móveis em aparelhos de apoio sob pontes ferroviárias, G deve ser multiplicado pelos fatores de rigidez dinâmica dados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Fatores de rigidez dinâmica.

	Dureza			
	40	50	60	70
Módulo de elasticidade transversal $\mathbf{G(MPa)}$	0,45	0,63	0,89	1,22
Fator de rigidez dinâmica **D**	1,1	1,25	1,5	1,9

Fonte: LEE, 1994.

O efeito da temperatura e da frequência no módulo de cisalhamento dinâmico é ilustrado na Figura 3.12.

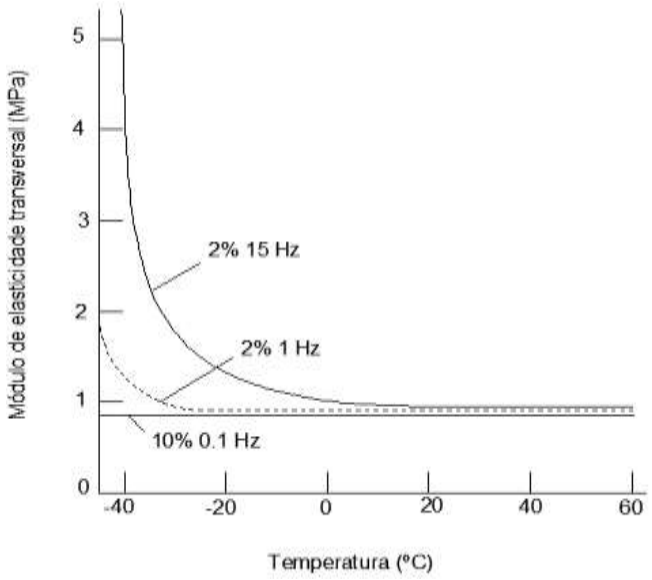


Figura 3.12: Efeito da temperatura e da frequência no valor de G. (Fonte: adaptado de LEE, 1994).

As tensões normais e de cisalhamento em uma placa de elastómero não são uniformes e dependem do fator de forma S, ainda que a placa esteja sob tensão de compressão uniforme. A tensão de cisalhamento máxima ocorre na borda das placas coladas e o seu valor ξ_b devido à tensão de compressão é dado pela expressão:

$$\xi_b = 6S\xi_c \qquad \text{Equação 3.74}$$

A reação vertical V quando submetida a uma placa de elastômero atua numa área efetiva reduzida apresentada a seguir

$$A_l = \left(1 - \frac{\delta_b}{b_e} - \frac{\delta_l}{l_e}\right) \quad \text{Equação 3.75}$$

A fim de proporcionar uma margem adequada contra os efeitos da fadiga, a soma das tensões nominais devido a todos os efeitos de carga ξ_t é dada por:

$$\xi_t = k(\xi_c + \xi_q + \xi_\alpha) \leq 5 \quad \text{Equação 3.76}$$

Com

$$\xi_c = 1{,}5V/GA_lS \quad \text{Equação 3.77}$$

$$\xi_\alpha = (b_e^2\alpha_b + l_e^2\alpha_l)/2t_i \sum t_i \quad \text{Equação 3.78}$$

$$A_l = A_e\left(1 - \frac{\delta_b}{b_e} - \frac{\delta_l}{l_e}\right) \quad \text{Equação 3.79}$$

onde

k – fator igual a 1,5 para efeitos de sobrecarga; 1,0 para todos os outros efeitos (incluindo vento e temperatura);

ξ_c – tensão nominal devido a cargas compressivas;

ξ_q – tensão de cisalhamento devido a movimentos de translação;

ξ_α – tensão nominal devido à rotação;

V – efeito de carga vertical do projeto;

A_l – área efetiva reduzida devido à carga de efeitos;

α_b– ângulo de rotação em toda a largura b do aparelho de apoio (em radianos);

α_l – ângulo de rotação (se houver) em todo o comprimento l do aparelho de apoio (em radianos);

t_i – espessura da camada de elastômero em análise;

Σt_i – espessura total de elastômero no aparelho.

O valor limite de $\xi_t = 5$ não deve ser tomado para definir a tensão final do material, pois trata se de um valor empírico obtido por meio de ensaios de fadiga realizados em três

tipos de aparelhos de apoio de elastômero para atender melhor ao critério de limitação de tensão neste método apresentado.

A rotação α devido à flecha angular de um tabuleiro de ponte sob carga produzirá uma inclinação entre as faces de um aparelho de apoio, causando tensões de tração no elastômero. Essas tensões podem levar à ruptura interna e a entrada de ozono e é importante, portanto, evitar tensões de tração nos bordos, ou seja, $\xi_t > 0$, (LEE, 1994).

Não é possível especificar uma quantidade admissível de inclinação adequada para todas as condições que podem surgir (ou seja, a combinação de compressão, cisalhamento e rotação).

Como indicação geral, aparelhos de apoio de elastômero fretado devem ser projetados de modo que a flecha nas bordas devido à rotação crítica não exceda a Δ de flecha sob cargas verticais; assim,

$$\frac{\alpha_b b_e}{2} + \frac{\alpha_l l_e}{2} < \Delta \qquad \text{Equação 3.80}$$

aplica-se um fator de segurança de 1,5 a essa expressão. Para fins práticos, aparelhos usados no apoio de vigas pré-moldadas de concreto ou de aço devem ser projetados para suportar uma rotação mínima de 0,01 radianos.

Quando a espessura de uma placa de elastômero excede quatro vezes a sua menor dimensão em planta pode haver uma redução significativa da rigidez horizontal. Para evitar a possibilidade da instabilidade, a espessura total do elastômero não deve exceder um quarto da menor dimensão lateral ou, no caso de aparelhos de apoio de neoprene fretado, assim

$$\frac{V}{A_l} < \frac{2 b_e G S^l}{3 \sum t_i} \qquad \text{Equação 3.81}$$

Onde S^l é o fator de forma para a camada mais grossa de elastômero e $\sum t_i$ é a espessura total de todas as camadas.

Considerando-se que a borracha se comporta como um fluido, a aplicação de uma carga vertical V, em uma área efetiva A_l produz uma tensão V/A_l em todas as direções. Em uma camada de borracha de espessura t_i, a força horizontal total produzida por unidade de comprimento é, portanto, $t_i V/A_l$, metade da qual é resistida pela chapa de aço superior e

metade pela placa inferior. Assim, a espessura h de uma placa de aço sem furos, submetida a uma tensão de tração σ_s entre camadas de borracha de espessura t_1 e t_2 fica determinada por:

$$h = (t_1+t_2)V/2A_l\sigma_s \qquad \text{Equação 3.82}$$

entretanto, ensaios indicam que a tensão não é uniforme em toda a placa, sendo a mínima nas extremidades e a máxima ocorrendo no centro, onde o valor local é cerca de 1,5 vezes a média. Portanto, é necessário modificar a expressão (3.82), assim:

$$h = \frac{3V(t_1 + t_2)}{4A_l\sigma_s} \qquad \text{Equação 3.83}$$

No estado limite último é necessário relacionar a espessura com a tensão de rendimento das placas de aço. Portanto, é necessário introduzir um fator de segurança de 1,75 para fornecer a expressão da espessura mínima de aço reforçando placas, daí:

$$\frac{1{,}3V(t_1 + t_2)}{A_l\sigma_s} \geq 2\ mm \qquad \text{Equação 3.84}$$

onde

V, A_l são como definido acima;

t_1,t_2 – espessura do elastômero em ambos os lados da placa;

σ_s – tensão no aço, que deve ser tomada como não maior do que a tensão de rendimento, nem superior a 120 MPa para placas com furos, e 290 MPa para placas sem furos.

A flecha de um único bloco de elastômero sob uma carga vertical V é dada por:

$$\delta = \frac{Vt_i}{5A_eGS^2} + \frac{Vt_i}{A_eE_b} \qquad \text{Equação 3.85}$$

Onde E_b o módulo de elasticidade do elastômero. A flecha vertical total de um aparelho de apoio de neoprene fretado é então a soma das flechas de cada camada. Para um aparelho em que o comprimento não é inferior a 10 vezes a largura, o efeito do módulo em massa pode ser ignorado, assim

$$\delta = \frac{Vt}{5A_eGS^2} \qquad \text{Equação 3.86}$$

onde as expressões podem ser usadas para estimar a variação na flecha entre um terço da carga total e a carga plena, com uma precisão de ± 25%.

A flecha real de um aparelho inclui um fundamento inicial para baixo de fase que pode produzir desvios de aproximadamente 2mm. Depois disso, a rigidez do aparelho aumenta com o aumento da carga. Onde a flecha vertical sob carga é fundamental para o projeto da estrutura, a rigidez do aparelho deve ser determinada por meio de ensaios. No entanto, uma variação de como ± 20% do observado significa valor ainda pode ocorrer. Quando um número de aparelhos similares é usado em um suporte e a rigidez diferencial entre eles é fundamental para a estrutura, uma variação de rigidez à compressão deve ser permitida no projeto igual a ± 15% da média observada nos ensaios.

Os cálculos para a flecha de aparelhos de apoio elastoméricos simples são propensos a subestimar a flecha sob carga permanente, e superestimar a flecha sob cargas móveis.

Em um aparelho de apoio elastomérico, o movimento horizontal é acomodado por cisalhamento no elastômero, e a força horizontal resultante desse cisalhamento é dada por:

$$H = \frac{AG\delta_r}{t_q} \qquad \text{Equação 3.87}$$

onde

A – área da laje de elastômero;

G – módulo de elasticidade transversal do elastômero;

δ_r – deslocamento horizontal máximo resultante;

t_q – espessura total do elastômero na tesoura.

3.6.1 Aparelhos de apoio inclinados

Um único aparelho de apoio tem características de cisalhamento idênticas em todas as direções horizontais, mas um conjunto de aparelhos pode ser reforçado numa direção por montá-los em pares inclinados um em direção ao outro. Isto é particularmente útil onde existe necessidade do aparelho resistir à carga lateral elevada porque a resistência aos movimentos longitudinais normais é inalterada.

A rigidez horizontal efetiva K_h de um par de aparelhos de apoio idênticos de rigidez ao cisalhamento K_s e rigidez a compressão K_c, se cada um estiver oposto e inclinado a um ângulo θ graus em relação à horizontal, é dada por:

$$K_h = 2(K_c\, sen^2\,\theta + K_s\, cos^2\,\theta) \qquad \text{Equação 3.88}$$

da mesma forma, a rigidez vertical eficaz $K_v$fica

$$K_h = 2(K_c\, sen^2\,\theta + K_s\, cos^2\,\theta) \qquad \text{Equação 3.89}$$

Para evitar a subida de um dos aparelhos é necessário garantir que

$$\frac{V}{H} > \frac{K_c\, tg\,\theta}{K_c\, tg^2\,\theta + K_s} \qquad \text{Equação 3.90}$$

desde que θ < 5°, onde V e H são as cargas verticais e horizontais atuantes.

Havendo uma rotação significativa da superestrutura nos aparelhos devido aos efeitos de carga excêntrica, o valor efetivo de K_h é reduzido significativamente, assim:

$$K_h = \frac{2K_cK_s}{K_c\, cos^2\,\theta + K_s\, sen^2\,\theta} \qquad \text{Equação 3.91}$$

Portanto, tensões excessivas poderão ser desenvolvidas nos aparelhos devido a rotações da superestrutura, especialmente se as flechas de compressão não forem suficientes. Nesses casos o desempenho global do conjunto de aparelhos deve ser reavaliado.

3.6.2 Isolamento de vibrações

Segundo LEE (1994) para isolamento de vibração, a frequência natural da estrutura com suporte deve ser menor do que a frequência perturbadora por um fator de pelo menos 2, e de preferência 3. A frequência natural η_f é dada por:

$$\eta_f = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_sD}{V/g}\right)^{1/2} \qquad \text{Equação 3.92}$$

onde

K_s– rigidez estática do sistema do aparelho;

D – fator de rigidez dinâmica;

V – carga vertical;

g – aceleração da gravidade.

3.6.3 Fluência em elastômeros

Os efeitos da fluência e relaxação de tensão no elastômero para aplicações de ponte rolamento, normalmente não são considerados, como uma parte significativa da deformação

ocorre no momento em que as articulações de convés são instaladas ou acabamentos superficiais aplicados.

3. 7 METODOLOGIA ALEMÃ (DIN 4141-4:1986)

DIN 4141-4:1986 *apud* STEIN (2012) especifica os requisitos para o projeto e fabricação de aparelhos de apoio elastoméricos, ou seja, define a aplicação, o projeto estrutural, materiais de construção, formulação e monitoramento dos aparelhos de apoio de elastômero fretado.

- Tensão de cisalhamento associada à força horizontal

$$\tau_H = \frac{H}{ab} + \frac{\delta}{nt} G_n \qquad \text{Equação 3.93}$$

onde

H – força horizontal devido à frenagem;

δ – deslocamento horizontal longitudinal devido à retração hidráulica, à deformação imediata da protensão, à deformação lenta do concreto protendido, e a retração ou dilatação térmica do tabuleiro da ponte;

n – número de camadas de elastômero;

t – espessura de uma camada de elastômero;

G_n– módulo de cisalhamento do elastômero.

- Tensão de cisalhamento associada à rotação

$$\tau_\alpha = \left[-0{,}0872\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0{,}1551\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0{,}1048\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0{,}1666\right] \cdot 3G_n\left(\frac{a}{t}\right)^2\left(\frac{\alpha_{total}}{n}\right) \qquad \text{Equação 3.94}$$

onde

a – dimensão na direção longitudinal da ponte;

b – dimensão na direção transversal da ponte;

α_{total} – rotação do aparelho;

t – espessura de uma camada de elastômero;

G_n– módulo de cisalhamento do elastômero.

- Tensão de cisalhamento associada à compressão

$$\tau_P = \left[7{,}2058\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 9{,}7613\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 4{,}1055\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 3\right]\left(\frac{t}{a}\right)^2\left(\frac{P}{a \cdot b}\right) \quad \text{Equação 3.95}$$

onde

a – dimensão na direção longitudinal da ponte;

b – dimensão na direção transversal da ponte;

t – espessura de uma camada de elastômero;

P– força de compressão no aparelho.

- Critério de tensão limite no elastômero

$$\tau_{lim} = \tau_H + \tau_\alpha + \tau_P < 50\, kN/cm^2 \quad \text{Equação 3.96}$$

3. 8 NORMA EUROPEIA (EN 1337-3:2005)

A EN 1337-3:2005 contém regras gerais de projeto com indicações comuns aos vários tipos de aparelhos de apoio, e também regras específicas e particulares para cada tipo de aparelho de apoio. Os aparelhos de apoio de neoprene devem ser dimensionados de modo a garantir o cumprimento dos estados limite últimos e de utilização, (VIEIRA, 2013). No ELU a força e estabilidade dos aparelhos devem ser as adequadas para resistir a cargas limite de projeto e movimentos da estrutura, assim:

$$S_d \leq R_d \quad \text{Equação 3.97}$$

onde

S_d – valores das ações de projeto;

R_d – valores de projeto de resistência.

Os parelhos de apoio de neoprene fretado são geralmente na forma retangular ou circular, no entanto, em situações particulares pode se optar pelas formas elíptica ou octogonal. Nesses casos, os apoios octogonais podem ser considerados como elípticos para efeitos de cálculo, exceto o fator de forma e a pressão, com os eixos maior e menor iguais ao comprimento e a largura.

Em relação às dimensões dos aparelhos de apoio de neoprene fretado, um aparelho deve ser concebido com camadas internas de borracha com a mesma espessura, que deve estar compreendida entre 5 mm e 25 mm.

Para aparelhos de apoio com dimensões em planta superiores a 1200×1200 mm, as dimensões normalizadas recomendadas no que diz respeito à espessura e número de camadas são representadas no

.

Dimensões a, b ou D (mm)	Espessura (mm)		Número de camadas (n)	
	Camada de elastômero	Chapas de reforço	Mín.	Máx.
100 x 150	8	3	2	3
100 x 200	8	3	2	3
150 x 200	8	3	2	4
ϕ 200	8	3	2	4
150 x 250	8	3	2	4
150 x 300	8	3	2	4
ϕ 250	8	3	2	4
200 x 250	8	3	3	6
200 x 300	8	3	3	6
200 x 350	8	3	3	6
ϕ 300	8	3	3	6
250 x 300	8	3	3	7
ϕ 350	8	3	3	7
250 x 400	8	3	3	7
300 x 400	12	4	3	6
ϕ 400	12	4	3	6
300 x 500	12	4	3	6
ϕ 450	12	4	3	6
300 x 600	12	4	3	6
350 x 450	12	4	3	7
ϕ 500	12	4	3	7
400 x 500	12	4	4	8
ϕ 550	12	4	4	8
400 x 600	12	4	4	8
450 x 600	12	4	4	9
ϕ 600	12	4	4	9
500 x 600	12	4	4	10
ϕ 650	12	4	4	10
600 x 600	16	5	4	9
ϕ 700	16	5	4	9
600 x 700	16	5	4	9
ϕ 750	16	5	4	9
700 x 700	16	5	4	10
ϕ 800	16	5	4	10
700 x 800	16	5	4	10
ϕ 850	16	5	4	10
800 x 800	20	5	4	10
ϕ 900	20	5	4	10
900 x 900	20	5	4	11

Quadro 3.1: Dimensões normalizadas de aparelhos de apoio elastoméricos; adaptado de EN 1337-3:2005.

Fonte: EN 1337-3:2005.

As regras de projeto são baseadas no conceito de que o elastômero é um material visco-elástico, e a sua deformação sob cargas de compressão é influenciada pela forma. As chapas de reforço devem ser ligadas quimicamente ao elastômero por forma a evitar quaisquer movimentos relativos nos planos de colagem. Os cálculos de projetos não se aplicam a camadas exteriores, superior ou inferior, quando a espessura do aparelho é menor ou igual a 2,5 mm.

De acordo com a regulamentação vigente todos os aparelhos de apoio incluem dimensões normalizadas como mostrado no quadro 5.1, devendo cumprir os requisitos de dimensionamento a seguir descritos:

A deformação máxima de projeto, em qualquer ponto do aparelho de apoio é o somatório das extensões ou deformações devido às cargas de projeto, assim

$$N_{mín} = N_{cp}\alpha - N_{sc}^{(-)} - N_{vt}^{(-)} \qquad \text{Equação 3.98}$$

$$d = d_{cp} + d_{VUT} + d_{VDT} + 1{,}5d_{sis} \qquad \text{Equação 3.99}$$

onde

N – reação vertical máxima e mínima atuante;

N_{cp} – cargas verticais devido às cargas permanentes;

N_{sc} – cargas verticais devido às sobrecargas;

N_{vt} – reação vertical devido ás variações de temperatura;

d – deslocamento dado pelo somatório dos deslocamentos devidos às cargas permanentes, às variações uniformes e diferenciais de temperatura e à ação sísmica;

d_{cp} – deslocamento devido às cargas permanentes;

d_{VUT} – deslocamento devido à variação uniforme de temperatura;

D_{VDT} – deslocamento devido à variação diferencial de temperatura;

d_{sis} – deslocamento devido à ação sísmica.

Os aparelhos de apoio elastoméricos devem ser projetados para atender no Estado Limite Último as condições relevantes apresentadas nesta seção.

No ELU a força e a estabilidade dos aparelhos de apoio devem ser adequadas para resistir a carga final de projeto, bem como os movimentos da estrutura.

O desempenho e durabilidade dos aparelhos projetados de acordo com a EN 1337-3:2005 são baseados na suposição de que tolerâncias dadas na sua cláusula 6 sejam respeitadas.

3.8.1 Base de projeto

As regras de projeto são baseadas na suposição de que o elastômero é um material viscoelástico, cuja flecha sob uma carga de compressão é influenciada pela sua forma.

As placas de aço no aparelho devem ser quimicamente ligadas ao elastômero para impedir qualquer movimento relativo no aço / interface de elastômero.

O cálculo de projeto não é aplicável para a parte superior externa e a camada inferior, quando a sua espessura é menor ou igual a 2,5 mm, (EN 1337-3:2005).

Todos os aparelhos de apoio projetados, incluindo-se as dimensões padrões mostrados no

devem atender aos requisitos dados daqui por diante.

- Deformação específica máxima de projeto

Em qualquer ponto no parelho a soma das deformações específicas $\varepsilon_{t,d}$ devido aos efeitos de carga de projeto E_d é dada por:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L\left(\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{\alpha,d}\right) \qquad \text{Equação 3.100}$$

onde

$\varepsilon_{c,d}$ – deformação específica de projeto devido a cargas de compressão;

$\varepsilon_{q,d}$–deformação específica de projeto devido ao cisalhamento e movimentos de translação de projeto;

$\varepsilon_{\alpha,d}$ – deformação específica de projeto devido à rotação angular de projeto;

K_L – fator de carga-tipo.

A deformação específica$\varepsilon_{t,d}$ não deve exceder à

$$\varepsilon_{u,d} = \frac{\varepsilon_{u,k}}{\gamma_m} \qquad \text{Equação 3.101}$$

onde

$\varepsilon_{u.k}$ – valor máximo admissível de $\varepsilon_{t,d}$ para o ELU;

γ_m – fator de segurança parcial.

Recomenda-se $\gamma_m = 1{,}00$.

- Tensão máxima de tração nas chapas de aço

A adição de chapas de aço deve ser concebida para o ELU, conforme definido no item 5.3.3.5 dessa norma.

- Critérios de estabilidade

Os critérios de estabilidade devem ser avaliados tendo em conta o seguinte:

– estabilidade em relação à rotação;

– estabilidade em relação à flambagem;

– estabilidade em relação ao deslizamento.

- Força, momento e deformações atuantes na estrutura

A força, o momento e a deformação na estrutura devem ser avaliados considerando-se o seguinte:

– a pressão em superfícies de contato entre o aparelho de apoio e a estrutura

– a força que o aparelho de apoio exerce sobre a estrutura ao resistir aos movimentos de translação;

– o momento devido à resistência do aparelho de apoio ao movimento de rotação;

– flecha vertical devido à carga vertical.

Ressalta-se que o módulo de cisalhamento nominal pode ser modificado para efeitos de carga dinâmica (estruturas de ferrovias, terremoto), dependendo da frequência (frequências gerais > 6 Hz) e amplitudes de movimento, assim o fator, que pode variar para diferentes compostos, é obtido experimentalmente.

3.8.2 Fator de forma

O fator de forma S é um meio de se considerar a forma do elastômero nos cálculos de força e flecha. É a razão entre a área plana efetiva da camada de elastômero e a sua área de superfície livre de carregamento, incluindo-se os furos.

Para os aparelhos de apoio de elastômero fretado o fator de forma S para cada camada de elastômero é dado por:

$$S = \frac{A_1}{l_p t_e} \qquad \text{Equação 3.102}$$

Para aparelhos de apoio de elastômero simples o fator de forma S fica:

$$S = \frac{A}{l_p t_e} \qquad \text{Equação 3.103}$$

Para uma faixa de aparelho de apoio o fator de forma S é dado por:

$$S = \frac{a}{2t_e} \qquad \text{Equação 3.104}$$

onde

A_1– área plana efetiva do aparelho, ou seja, o plano de área comum de elastômero e aço placa, excluindo-se a área de todos os furos, se esses não são mais tarde efetivamente ligados;

A – área plana total do aparelho de apoio;

a – largura total da faixa do aparelho de apoio;

l_p– perímetro de força-livre do aparelho incluindo-se o de todos os furos, se esses não são mais tarde efetivamente ligados;

t_e– espessura efetiva de uma camada de elastômero sob compressão; em aparelhos de apoio de elastômero fretado é tomada como a espessura real t_i, por camadas interiores, e $1{,}4t_i$ para camadas exteriores com uma espessura ≥ 3 mm; em rótulas de almofada e tira isso é tomado como $1{,}8t_i$;

t_i– espessura de cada camada de elastômero.

Para aparelhos de apoio retangulares e sem furos tem-se:

$$A_1 = a'b' \qquad \text{Equação 3.105}$$

$$l_p = 2(a' + b') \qquad \text{Equação 3.106}$$

onde

a′– é a largura efetiva do aparelho (a largura das chapas de aço);

b′ – comprimento efetivo do aparelho (o comprimento das chapas de aço).

3.8.3 Deformação específica devido à carga de compressão

Para efeitos de cálculo G destina-se um dos valores definidos na Tabela 3.2.

A deformação específica de projeto $\varepsilon_{c,d}$ devido às cargas de compressão é dada por:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1{,}5 \cdot F_{z,d}}{G A_r S} \qquad \text{Equação 3.107}$$

sendoA_r a área plana efetiva reduzida devido a carga de efeitos dada por:

$$A_r = A_1 \left(1 - \frac{V_{x,d}}{a'} - \frac{V_{y,d}}{b'}\right) \qquad \text{Equação 3.108}$$

onde

$V_{x,d}$– deslocamento relativo horizontal máximo das partes do aparelho de apoio na direção da dimensão a devido a todos os efeitos de carga do projeto;

$V_{y,d}$– deslocamento relativo horizontal máximo das partes do aparelho na direção da dimensão b devido a todos os efeitos de carga de projeto.

3.8.4 Deformação específica devido ao cisalhamento

A deformação específica de cisalhamento $\varepsilon_{q,d}$ do elastômero devido ao movimento de translação não deve exceder a 1,00:

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{V_{xy,d}}{T_q} \qquad \text{Equação 3.109}$$

onde

$V_{xy,d}$– resultante do deslocamento relativo horizontal máximo das partes do aparelho de apoio obtidos pela soma vetorial de $V_{x,d}$ e $V_{y,d}$;

T_q – espessura total do elastômero em cisalhamento incluindo-se a tampa superior e inferior.

O valor máximo admissível para $\varepsilon_{q,d}$ definido como 1,00 para o ELU foi derivado de $\varepsilon_{g,k}$ multiplicando-se por $\gamma_f = 1{,}40$, e

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{\left(a'^2 \alpha_{a,d} + b'^2 \alpha_{b,d}\right) t_i}{2 \sum (t_i^3)} \qquad \text{Equação 3.110}$$

onde

$\alpha_{a,d}$ – ângulo de rotação em toda a largura a do aparelho de apoio;

$\alpha_{b,d}$– ângulo de rotação (se houver) em todo o comprimento b do aparelho de apoio;

t_i– espessura de uma camada individual do elastômero.

3.8.5 Espessura da placa de aço

Para resistir às tensões de tração induzidas sob carga, a espessura mínima das placas de aço em um aparelho de apoio de elastômero fretado é dada por:

$$t_s = \frac{K_p F_{z,d}(t_1 + t_2) K_h \gamma_m}{A_r f_y} \text{ e } t_s \geq 2\ mm \qquad \text{Equação 3.111}$$

onde

$F_{z,d}$, A_r definidos no item 3.2;

t_1, t_2 – espessuras do elastômero em ambos os lados da placa;

f_y – tensão de escoamento do aço;

K_p– fator de correção de tensão de tração cujo valor é $K_p = 1{,}3$;

K_h – fator para tensões de tração induzida nas chapas de aço.

Sendo

$K_h = 1$sem furos

$K_h = 2$com furos

γ_m – fator de segurança parcial;

Recomenda-se $\gamma_m = 1{,}00$.

3.8.6 Condições limitantes

- Condição de limitação à rotação

De acordo com a norma europeia para aparelhos de apoio de elastômero fretado a limitação de rotação deve ser satisfeita quando a flecha vertical total $\sum V_{z,d}$ estiver em conformidade com as expressões mostradas a seguir:

Para aparelhos de apoio retangulares:

$$\sum V_{z,d} - \frac{\left(a' \alpha_{a,d} + b' \alpha_{b,d}\right)}{K_{r,d}} \geq 0 \qquad \text{Equação 3.112}$$

Para aparelhos de apoio circulares:

$$\sum V_{z,d} - \frac{(D'\alpha_d)}{K_{r,d}} \geq 0 \qquad \text{Equação 3.113}$$

onde

D' – diâmetro efetivo do aparelho de apoio;

$K_{r,d}$ – fator de rotação;

$K_{r,d} = 3{,}0$

$\sum V_{z,d}$ – flecha vertical total, produzindo α_a e α_b.

- Estabilidade à flambagem

Para aparelhos de apoio de elastômero fretado a pressão $\frac{F_{z,d}}{A_r}$ deve satisfazer as seguintes expressões:

Para aparelhos de apoio retangulares:

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2a'GS_1}{3T_e} \qquad \text{Equação 3.114}$$

Para aparelhos de apoio circulares a' considera-se ser o diâmetro.

- Condição de não deslizamento

A condição de não deslizamento deve ser satisfeita para aparelhos de apoio não ancorados conforme as seguintes expressões:

$$F_{xyd} \leq \mu_e F_{z,dmín} \qquad \text{Equação 3.115}$$

e sob carga permanente

$$\sigma_{cd\ mín} = \frac{F_{z,d\ mín}}{A_r} \geq 3\ \ (\mathrm{N/mm^2}) \qquad \text{Equação 3.116}$$

$$\mu_e = 0{,}1 + \frac{1{,}5K_f}{\sigma_m} \qquad \text{Equação 3.117}$$

onde

F_{xyd} – resultante de todas as forças horizontais;

$F_{z,dmín}$– força vertical de projeto mínimo coexistindo com $F_{xy,d}$;

μ_e – coeficiente de atrito, dado pela seguinte expressão;

$K_f = 0{,}6$para concreto;

$K_f = 0{,}2$para todas as outras superfícies incluindo-se as argamassas de resina;

σ_m – tensão média à compressão em MPa de $F_{z,dmín}$.

Os valores de projeto dos coeficientes de atrito para a condição de deslizamento são relativamente baixos para permitir efeitos em longo prazo. No entanto, mais valores onerosos de μ_e do que os mencionados podem ser especificados para estruturas com solicitações dinâmicas, como por exemplo, pontes ferroviárias.

Quando um aparelho de apoio não satisfaz os requisitos para estabilidade ao deslizamento, meios positivos de localização devem ser criados para resistir a todas as forças horizontais.

3.8.7 Forças, momentos e deformações exercidas sobre a estrutura

- Pressão sobre a superfície de contato

O aparelho de apoio elastomérico exerce uma pressão não uniforme sobre a superfície de contato com a estrutura. É suficiente para garantir que a pressão média não excede capacidade de suporte do material, (EN 1337-3:2005).

- Força atuante na estrutura pelo movimento translação resistência do aparelho

A força R_{xy} exercida sobre a estrutura pelo movimento de resistência de um aparelho de apoio é dada por:

$$R_{xy} = \frac{AGv_{xy}}{T_e} \qquad \text{Equação 3.118}$$

onde

R_{xy} – resultante das forças de oposição ao movimento de translação;

A – área plana total do aparelho de apoio;

G – módulo de cisalhamento do aparelho de apoio;

T_e – espessura total do elastômero em cisalhamento.

A força R_{xy} não deve exceder o valor especificado.

- Resistência à rotação

O valor de projeto do momento restaurador devido à rotação sobre um eixo através do centro do aparelho de apoio, paralelo ao comprimento (direção b), é dado por:

$$M = G\frac{\alpha {a'}^5 b'}{n{t_i}^3 K_s} \qquad \text{Equação 3.119}$$

A força R_{xy} exercida sobre a estrutura pelo movimento de resistência de um aparelho de apoio é dada por:

$$M = G\frac{\alpha \pi {D'}^6}{512n{t_i}^3} \qquad \text{Equação 3.120}$$

Para se determinar o fator K_s têm-se os valores da Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Determinação do fator Ks.

b/a	**0,5**	**0,75**	**1**	**1,2**	**1,25**	**1,3**	**1,4**	**1,5**
K_s	137	100	86,2	80,4	79,3	78,4	76,7	75,3
b/a	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,5	10	∞
K_s	74,1	73,1	72,2	71,5	70,8	68,3	61,9	60

Fonte: EN 1337-3:2005.

Se $b < a$ a expressão é ainda aplicável para rotação em torno do eixo paralelo a b, mas nesse caso b é a menor dimensão e a é a maior dimensão, em contraste com as definições dadas no item 3.2 da EN 1337-3:2005.

O valor calculado do momento restaurador é suficiente para a maioria dos efeitos, mas se necessário um conhecimento preciso do seu valor, então o valor deve ser determinado experimentalmente.

- Flecha vertical

A flecha vertical total V_c de um aparelho de apoio de neoprene fretado é a soma da flecha vertical das camadas individuais dada pela expressão:

$$V_C = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5G{S_1}^2} + \frac{1}{E_b}\right) \qquad \text{Equação 3.121}$$

A flecha vertical dos aparelhos de apoio elastoméricos deve ser estimada a partir as expressões anteriores, para uso em conjunto com 5.3.3.6 da EN 1337 caso seja necessário a adoção de um valor exato deve ser verificada por meio do teste de aparelhos de amostra, (EN 1337-3:2005).

O valor do módulo em massa geralmente usado é $E_b = 2000\ MPa$.

A flecha real de um aparelho de apoio inclui um afundamento inicial que pode produzir desvios de aproximadamente 2mm. Depois disso a rigidez do aparelho de apoio aumenta com o aumento da carga. Onde a flecha vertical sob carga é fundamental para o projeto da estrutura, a rigidez do aparelho deve ser determinada por ensaios. No entanto, uma variação de ± 20% do principal valor observado ainda pode ocorrer. Quando um número de aparelhos de apoio similares é usado em um suporte e a rigidez diferencial entre os aparelhos é fundamental para a estrutura, admite-se uma variação de rigidez à compressão igual a ± 15% do valor estimado a partir da expressão (3.121), ou ± 15% do valor médio observado em experimentos.

4. ANÁLISE DOS APARELHOS DE APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI

4. 1 GENERALIDADES

Neste capítulo são apresentados os dados de monitoramento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói. Esses dados servem de base para uma análise que permite identificar as patologias existentes e verificar o do dimensionamento desses aparelhos.

Esta análise visa elaborar um quadro patológico de um aparelho de apoio e/ou conjunto de aparelhos num determinado trecho baseado nas informações de vistoria realizada anualmente pela empresa Concessionária Ponte Rio-Niterói, e dessa forma descrever o comportamento estrutural desses elementos num período de 10 anos (2004 – 2013). Pretende-se também identificar o nível de ameaça à integridade estrutural dessas patologias nos aparelhos e prever a sua evolução com o tempo. Finalmente, comparar o desempenho estrutural dos aparelhos de apoio com os resultados esperados baseados nas normas e metodologias de dimensionamento apresentadas, e igualmente comparar as metodologias usadas adotando como metodologia padrão a EN 1337-3:2005.

4. 2 TRECHO CENTRAL

A Ponte Rio-Niterói está localizada sobre a Baía de Guanabara e é a principal ligação rodoviária entre as cidades Rio de Janeiro e Niterói. Trata-se de uma obra de aproximadamente 13.000 m de extensão com 3.250 aparelhos de apoio dispostos em três trechos principais, PFEIL (1975):

– acesso Niterói (AN);

– acesso Rio (AR);

– trecho central (TC).

Diante do número relativamente elevado de aparelhos de apoio existentes na ponte, seria inviável analisá-los a todos. Por essa razão, optou-se pela análise duma amostra representativa de 416aparelhos de apoio localizados no Trecho Central.

A escolha do Trecho Central como trecho de estudo deve-se ao fato de existir uma constância na quantidade e na geometria dos apoios por pilar nesse trecho.

O Trecho Central é destacado na Figura 4.1 onde está representado o traçado da Ponte Rio-Niterói.

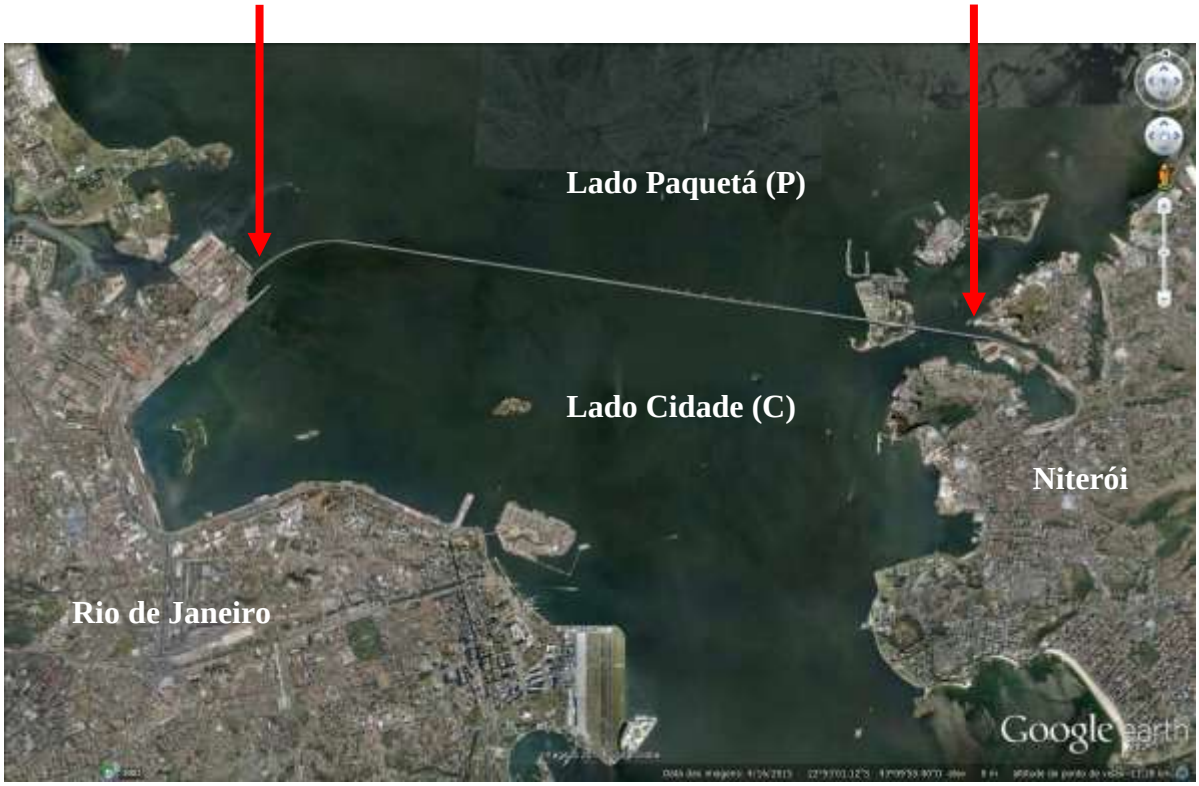


Figura 4.1: Traçado da Ponte Rio-Niterói. (Fonte: Google Earth, 2015).

4.2.1 Características geométricas

O Vão Central constitui o mais extenso trecho da obra com cerca de 8000 m de comprimento e 26 m de largura total. A seção transversal é formada por duas vigas-caixão, cada uma com 6,86 m de largura, sendo a distância livre entre as almas internas de 6,34 m, conforme mostrado na Figura 4.2, PFEIL (1975).

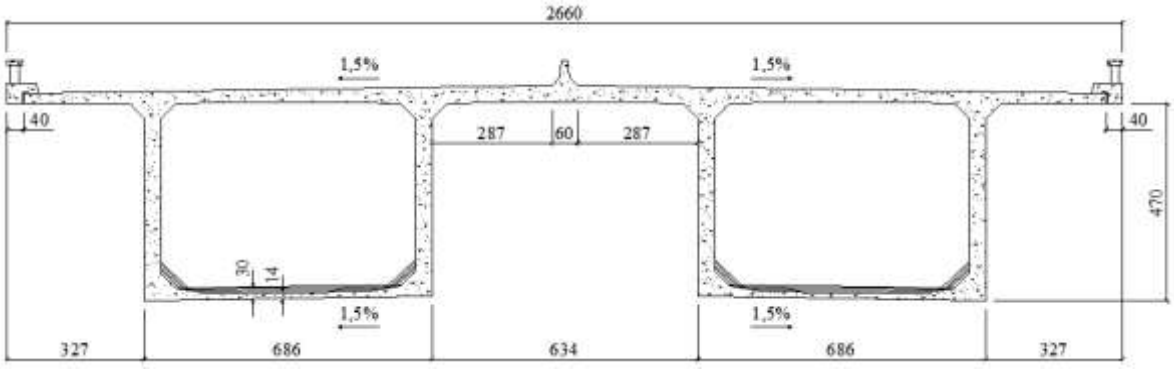


Figura 4.2: Seção transversal típica do trecho central. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975).

4. 3 PILARES

Trecho Central é composto por 103 pilares de corpo duplo onde cada uma das colunas do pilar suporta as reações de uma viga-caixão. Transversalmente as dimensões

externas dos pilares são constantes, iguais à largura da viga-caixão. Longitudinalmente a dimensão externa é variável, dando ao pilar a forma de pirâmide.

Os pilares são ocos e engastados na base em blocos maciços. Esses blocos têm altura de 2,00 m a 2,50 m. A configuração dos pilares do Vão Central é mostrada na Figura 4.3.

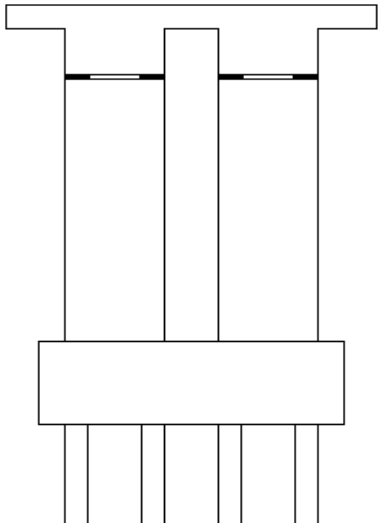


Figura 4.3: Pilar típico do trecho central da Ponte Rio-Niterói. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975).

4.3.1 Nomenclatura dos pilares

Os pontos de apoio da estrutura no Vão Central foram numerados em ordem crescente do rio para Niterói, tendo sido escolhido o número 100 para o apoio, no lado Rio, do vão central de 300 m. O trecho principal sobre o mar estende-se do pilar P-38 (Cais do Porto) até o pilar P-123 (encontro na ilha de Mocanguê). A travessia entre as ilhas de Mocanguê e Caju abrange os pilares P-124 (encontro) até o pilar P-141 (encontro). A ligação entre a ilha do Caju com o aterrado Niterói é constituída por dois vãos de 52 m apoiados nos extremos dos encontros 142 e 144.

4. 4 APARELHOS DE APOIO

Cada pilar é composto por quatro aparelhos de apoio de neoprene fretado. No topo de cada coluna existem dois aparelhos de apoio onde cada aparelho é composto por duas almofadas de neoprene, então tem-se no topo de cada coluna quatro almofadas e no eixo de cada pilar oito aparelhos. Esses aparelhos têm base retangular e dimensões externas de 70,6 cm x 70,6 cm x 6,4 cm, dimensões de cálculo de neoprene 70 cm x 70 cm x 48 cm dispostos dois a dois na direção transversal e um a um na direção longitudinal da ponte, o que configura dimensões de 140 cm x 70 cm nas direções transversal e longitudinal da ponte,

respectivamente. Cada um dos apoios corresponde às almas das vigas-caixão da superestrutura. Cada aduela de apoio repousa sobre quatro almofadas posicionadas como se vê na Figura 4.4, PFEIL (1975).

Os aparelhos de apoio estudados nesta dissertação localizam-se entre os pilares P-38 até o pilar P-144.

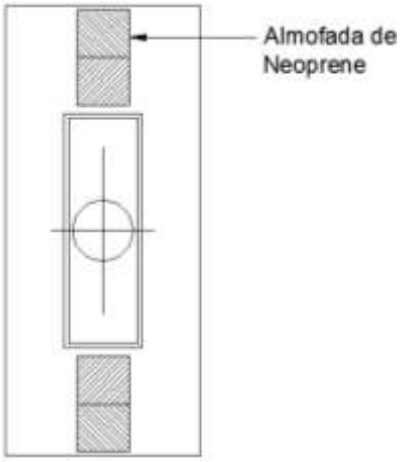
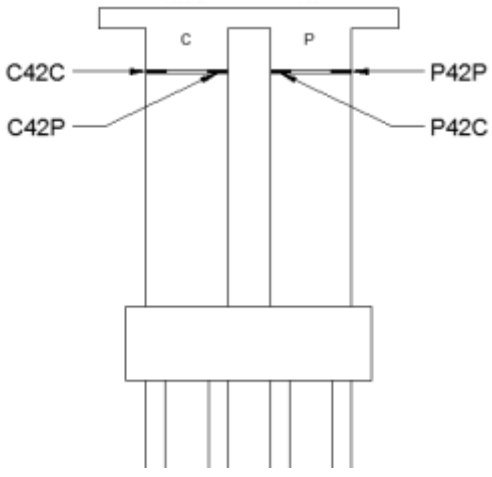


Figura 4.4: Aparelhos de apoio sobre o pilar. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975).

4.4.1 Nomenclatura dos aparelhos de apoio

A nomenclatura dos aparelhos de apoio do VC segue a configuração mostrada na Figura 4.1. A título de exemplo tomam-se os aparelhos localizados no pilar P-42. O pilar tem quatro pontos de apoio, dois em cada caixão. A primeira letra representa o caixão onde o aparelho se encontra localizado, o número refere-se ao pilar em causa e a última letra representa a posição em que o aparelho se encontra no caixão, CPRN (2015).

Lado Cidade (C)



Lado Paquetá (P)

Figura 4.1: Localização e nomenclatura dos aparelhos de apoio. (Fonte: adaptado de PFEIL, 1975).

4. 5 INSPEÇÃO E ANÁLISE DE RISCOS

O Programa de Exploração da Ponte Rio-Niterói (PEP) *apud* CPRN (2014) estabelece condições para a execução do contrato com a especificação de obras e serviços a serem realizados pela concessionária. De acordo com o item 065 da adequação 10 do PEP, os aparelhos de apoio da ponte passaram a ser inspecionados anualmente a partir do ano de 2003. Essas inspeções têm como objetivo apresentar os principais aspectos referentes ao estado de conservação dos aparelhos de apoio dos pilares, encontros e aduelas de articulação do vão central.

As etapas da monitoração dos aparelhos de apoio são:

– vistoria dos aparelhos de apoio fixos localizados no TC, caixões Cidade e Paquetá;

– verificação dimensional dos aparelhos de apoio;

– verificação das eventuais anomalias dos apoios e registro em planilhas específicas;

– verificação do posicionamento dos aparelhos de apoio sobre os berços de assentamento;

– verificação do estado dos berços de assentamento em concreto;

– verificação das condições do concreto adjacente das estruturas;

– registro fotográfico;

– elaboração de relatórios de vistoria.

A análise qualitativa dos defeitos existentes nos aparelhos de apoio, segundo a CPRN contempla a verificação da existência ou não das seguintes anomalias:

– bojamento excessivo;

– rompimento da superfície de cobrimento;

– fretagem exposta e oxidada;

– fissuração superficial ou generalizada do neoprene;

– esmagamento do neoprene;

– descolamento do aparelho de apoio;

– deformação do aparelho de apoio;

– berço de assentamento defeituoso, quebrado ou trincado;

– rotação do aparelho de apoio;

– obstáculo ao trabalho do aparelho;

– detritos na região do apoio.

Ora verificadas as condições do aparelho de apoio é necessário quantificar e classificar as anomalias encontradas.

A CPRN criou um parâmetro de avaliação de risco à integridade estrutural dos aparelhos de apoio bem como das estruturas de concreto adjacentes. Denominado GUT, esse parâmetro contempla a gravidade, urgência e a tendência dos problemas identificados no elemento e serve para auxiliar na tomada de decisões para saná-los. No Quadro 4.1são apresentados os critérios relativos à urgência na solução e a tendência na evolução das anomalias de acordo com o valor do GUT.

Quadro 4.1: Critérios relativos à urgência e tendência.

VALOR	URGÊNCIA	TENDÊNCIA
1	Não há pressa.	Mantém-se.
2	Pode esperar.	Piora em longo prazo.
3	O mais cedo possível.	Deteriora em médio prazo.
4	Alguma urgência.	Deteriora em pouco tempo, sem garantia de recuperação.
5	Necessidade e imediata.	Deteriora rapidamente se nada for feito, com danos irreparáveis.

Fonte: Concessionária Ponte Rio-Niterói, 2015.

A classificação e priorização dos problemas para tomada de decisão seguem o critério mostrado no Quadro 4.2:

Quadro 4.2: Escala GUT.

Estado	Ação	Classificação
Leve	Acompanhamento	1 < GUT < 7
Moderado	Intervenção em até um ano	8 < GUT < 26
Grave	Intervenção em até seis meses	27 < GUT < 63
Muito grave	Intervenção em até dois meses	64 < GUT < 124
Crítico	Intervenção imediata	GUT = 125

Fonte: Concessionária Ponte Rio-Niterói (2015).

A CPRN estabelece os seguintes critérios para regimentar a manutenção e/ou substituição dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói:

– aparelhos de apoio fixos em elastômero fretado que apresentem anomalias sem acarretar vínculos negativos estruturais, ou desnivelamento na superfície de rodagem não necessitam ser imediatamente substituídos, devendo ser monitorados permanentemente até que haja alteração do quadro patológico.

– aparelhos de apoio fixos em elastômero fretado que apresentam anomalias, acarretando vínculos negativos às estruturas, ou proporcionando desnível no tabuleiro que provoquem impactos indesejáveis, devem ser substituídos.

4. 6 PATOLOGIAS EXISTENTES

Durante os 10 anos de inspeção poucas foram as alterações observadas nos aparelhos de apoio dos vãos de acesso sobre o mar da Ponte Rio-Niterói. Para facilitar a visualização dessas inspeções foi criada uma tabela contendo todos os dados de medição das dimensões dos aparelhos de apoio. De posse desses dados (tabela criada e relatórios de vistoria)verificou-se que as patologias mais frequentes foram fissuração superficial do neoprene, fissuração generalizada do neoprene, rompimento da superfície de cobrimento, bojamento excessivo e deformação. Dentre os casos analisados o que mais se destaca é o dos aparelhos do pilar P-136, que devido à ocorrência de patologias com o GUT relativamente elevado desde o início do acompanhamento em 2004 tiveram que ser substituídos (Figura 4.5 e Figura 4.6).

As patologias identificadas nesses aparelhos de apoio foram as seguintes:

– rompimento da superfície de cobrimento,

– fretagem exposta e oxidada;

– fissuração generalizada do neoprene.

Figura 4.5: Defeitos encontrados no aparelho C136P, CPRN (2015).

Figura 4.6: Defeitos encontrados no aparelho C136C, CPRN (2015).

4. 7 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

A partir das expressões apresentadas no Capítulo 5 foram desenvolvidos dois programas aptos a dimensionar e verificar ao carregamento à compressão, à rotação e tangencial nos aparelhos de apoio de neoprene fretado, com base em algumas das metodologias de cálculo aqui apresentadas.

O programa P1 serve exclusivamente para dimensionar aparelhos de apoio em dimensões comerciais de acordo com a da fabricante nacional http://www.neoprex.com.br/manuais_tecnicos.php, Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dimensões comerciais de aparelhos de apoio de neoprene fretado.

			Espessuras (mm)				Nº de chapas	
Dimensões a x b (mm^2)	**Altura do aparelho**		**Cobrimento**		**Camadas de elastômero**	**Chapas de aço**	**Máx.**	**Mín.**
	Mín.	**Máx.**	**Vertical**	**Lateral**				
100 x 100	14	35	2,5	4	5	2	1	4
100 x 150	14	35	2,5	4	5	2	1	4
100 x 200	14	35	2,5	4	5	2	1	4
150 x 200	14	42	2,5	4	5	2	2	5
150 x 250	21	42	2,5	4	5	2	2	5
150 x 300	21	42	2,5	4	5	2	2	5
200 x 250	30	63	2,5	4	8	3	2	5
200 x 300	30	63	2,5	4	8	3	2	5
200 x 350	30	63	2,5	4	8	3	2	5
200 x 400	30	63	2,5	4	8	3	2	5
250 x 300	30	74	2,5	4	8	3	2	6
250 x 400	30	74	2,5	4	8	3	2	6
300 x 400	47	86	2,5	4	10	3	3	6
300 x 500	47	86	2,5	4	10	3	3	6
300 x 600	47	86	2,5	4	10	3	3	6
350 x 450	47	86	2,5	4	10	3	3	6
400 x 500	57	105	2,5	4	12	4	3	6
400 x 600	57	105	2,5	4	12	4	3	6
450 x 600	57	105	2,5	4	12	4	3	6
500 x 600	73	105	2,5	4	12	4	4	6
600 x 600	90	150	2,5	4	15	5	4	7
600 x 700	90	150	2,5	4	15	5	4	7
700 x 700	90	150	2,5	4	15	5	4	7
700 x 800	90	150	2,5	4	15	5	4	7
800 x 800	102	171	2,5	4	18	5	4	7
900 x 900	102	171	2,5	4	18	5	4	7

Fonte: Catálogo da NEOPREX http://www.neoprex.com.br/manuais_tecnicos.php,2015.

No programa P2 verifica-se o dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói. A tabela utilizada nessa verificação contendo as informações sobre os aparelhos de apoio encontra-se disponível no próprio programa; a Tabela 4.2 mostra apenas os dados do pilar P-38.

Tabela 4.2: Tabela utilizada na verificação dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói.

		Espessuras (m)					
Aparelho	Dimensões a x b (m)	Altura do aparelho		Cobrimento		Camadas de elastômero	Chapas de aço
		Mín.	Máx.	Vertical	Lateral	0,012	0,007
C38C	0,71 x 1,42	0,05	0,09	0,70	0,50	0,012	0,007
C38P	0,71 x 1,42	0,05	0,09	0,70	0,50	0,012	0,007
P38C	0,71 x 1,42	0,05	0,09	0,70	0,50	0,012	0,007
P38P	0,71 x 1,42	0,05	0,09	0,70	0,50	0,012	0,007

Esses programas foram criados por intermédio de planilhas eletrônicas desenvolvidas utilizando-se a ferramenta computacional Microsoft Office Excel 2010.

Essas planilhas limitam-se ao dimensionamento de aparelhos de apoio de neoprene fretado em forma retangular em apenas quatro métodos:

– metodologia de MASON (1977);

– metodologia de PFEIL (1983);

– metodologia de MARCHETTI (2008);

– EN 1337-3:2005.

Em cada um desses métodos a verificação é efetuada com base na análise de carregamento vertical, horizontal e rotacional.

Antecedendo à elaboração das planilhas de dimensionamento, utilizando-se o Microsoft Office Visio 2007, foi definido um fluxograma de cálculo para auxiliar a etapa do desenvolvimento do algoritmo utilizado na concepção dessas planilhas. O fluxograma encontra-se disponível no Anexo B.

Após a etapa que definiu os dados de entrada o fluxograma facilitou o desenvolvimento das planilhas, uma vez que apresenta toda a sequência de utilização da formulação necessária ao dimensionamento segundo os métodos aqui apresentados.

4.7.1 Apresentação do programa de dimensionamento

A título de ilustração apresenta-se neste item o programa desenvolvido para dimensionar os aparelhos de apoio de neoprene fretado apresentados em dimensões comerciais na tabela da fabricante nacional NEOPREX.

A planilha 1 é a planilha principal do programa, onde são escolhidos as dados de entrada como as dimensões do aparelho e a metodologia de cálculo desejada, (Figura 4.7).

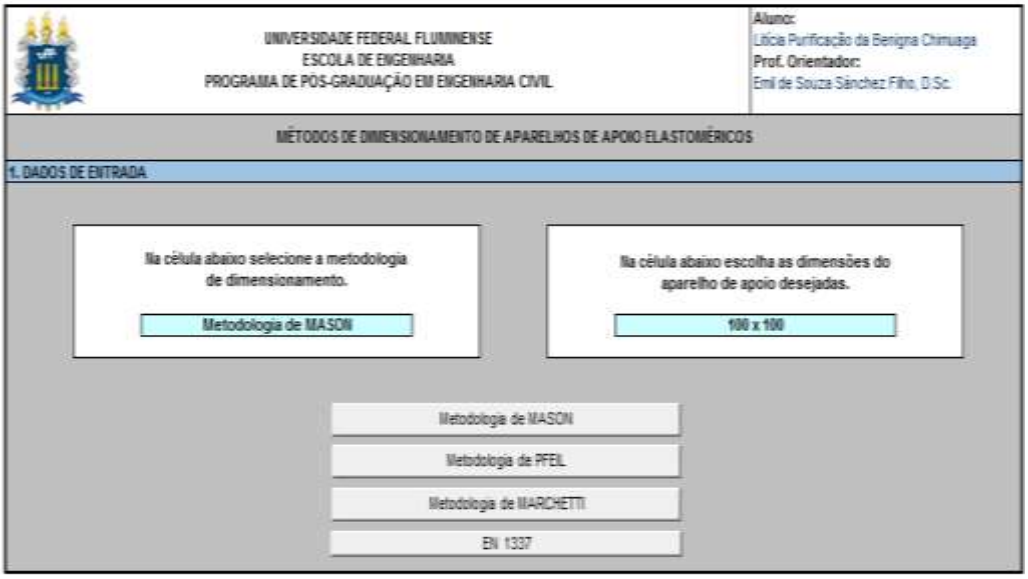


Figura 4.7: P1– Planilha 1: página inicial.

Nas planilhas de 2 a 5 (MASON, 1977 a EN 1337-3:2005) dados como o número de chapas de aço, as forças solicitantes vertical e horizontal, bem como as de aplicação lenta e rápida, o ângulo inicial de rotação e as componentes de rotação de aplicação lenta e rápida precisam ser inseridos pelo usuário, (Figura 4.8).

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Aluno:
Lúcia Purificação da Benigna Chimuaga
Prof. Orientador:
Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.

Início
Metodologia de PFEIL
Metodologia de MARCHETTI
EN 1337

DIMENSIONAMENTO DE APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS DE ACORDO COM A METODOLOGIA DE MASON (1977)

1. DADOS DE ENTRADA

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

ELASTÔMERO				AÇO DE FRETAGEM			
E	4,00	MPa	Módulo de elasticidade	f_u	500,00		Resistência à ruptura
G	0,85	MPa	Módulo de cisalhamento	f_y	345,00		Limite de escoamento

DIMENSÕES DO APARELHO DE APOIO

100 x 100

a	100	mm	Largura do aparelho de apoio
b	100	mm	Comprimento do aparelho de apoio
d	5	mm	Espessura da camada de elastômero
e	2	mm	Espessura da camada de aço
n	2	-	Número de chapas de aço
n_t	1	-	Número de camadas de elastômero
h	14	mm	Altura total do aparelho de apoio

Figura 4.8: P1– Planilha 2: dados de entrada.

A Figura 4.9 mostra os critérios e as condições necessárias para que de dimensionamento à compressão seja atendido. A sequência de verificações segue os critérios de cada método. A título de ilustração é mostrada apenas a metodologia de MASON (1977).

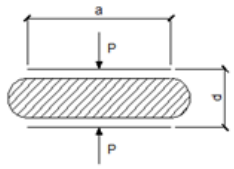
1.1 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À COMPRESSÃO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÉDIA NO APARELHO			
COMPRESSÃO 	P	10000	kN	Força de compressão aplicada
	A	100,00	cm^2	Área do aparelho de apoio em planta
	σ_m	10,00	MPa	Tensão média no aparelho de apoio
	TENSÃO MÁXIMA NORMAL			
	k_1	2,1	-	Coeficiente de majoração da carga atuante
	$\sigma_{máx.}$	21,00	MPa	Tensão média no aparelho de apoio
	TENSÃO TANGENCIAL			
	k_2	4,55	-	Coeficiente de majoração da carga atuante
	$\tau_{máx.}$	2,28	MPa	Tensão tangencial
1.1.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO				
$10 \leq \sigma_m \leq 12$ MPa	OK!			

Figura 4.9: P1– Planilha 2: verificação das tensões devido à compressão.

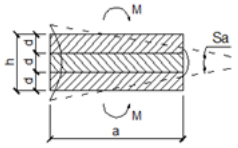
1.2 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À ROTAÇÃO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÁXIMA NORMAL			
ROTAÇÃO 	I	833,33	cm^4	Momento de inércia da seção em relação ao eixo de maior lado
	k_4	0,049	-	Coeficiente de majoração da carga atuante
	E_i	78,4	MPa	Módulo de elasticidade aparente de uma camada de elastômero cintada
	M	130,67	kN.cm	Momento assoicado à rotação
	$\sigma'_{máx.}$	0,08	kN/cm	Tensão máxima normal
	TENSÃO MÁXIMA CISALHANTE			
	k_5	0,13	-	Coeficiente de majoração da carga atuante
	α	0,01	rad	Ângulo de rotação imposto ao aparelho de apoio
	$\tau'_{máx.}$	2,08	MPa	Tensão máxima cisalhante
1.2.1 VERIFICAÇÃO À ROTAÇÃO				
$h \leq \frac{a}{5}$	OK!			

Figura 4.10: P1–Planilha 2: verificação das tensões devido à rotação.

1.3 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À FORÇA HORIZONTAL				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO TANGENCIAL			
FORÇA HORIZONTAL	H	100	kN	Força horizontal aplicada
	A	100,00	cm²	Área do aparelho de apoio em planta
	τ	0,10	MPa	Tensão tangencial
	DISTORÇÃO CISALHANTE			
	γ	0,15	-	Distorção cisalhante
	DESLOCAMENTO RELATIVO DAS FACES DO APARELHO			
	ΔH	21,54	mm	Deslocamento relativo das faces do aparelho
	TENSÕES DE TRAÇÃO NA CHAPA E NOS PLANOS DE COLAGEM			
	σ_n	21,08	MPa	Tensão normal no elastômero
	σ_s	52,69	MPa	Tensão de tração na chapa de aço
1.3.1 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES NAS CHAPAS E NOS PLANOS DE COLAGEM				
$\gamma = \frac{\tau}{G} \leq 0{,}7$	OK!			

Figura 4.11: P1–Planilha 2: verificação das tensões devido à força horizontal.

1.4 CONDIÇÕES DE NÃO DESLIZAMENTO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO				
FORÇA HORIZONTAL	P_o	2000	kgf	Força vertical de aplicação lenta
	H_o	250	kgf	Força horizontal de aplicação lenta
	P_s	3000	kgf	Força vertical de aplicação rápida
	H_s	200	kgf	Força horizontal de aplicação rápida
	H_o+H_s	450	kgf	Soma das forças horizontais de aplicação lenta e rápida
	Δ_{Ho}	1,08	cm	Deslocamento horizontal do aparelho devido à Hc
	Δ_{Ho+s}	1,94	cm	Deslocamento horizontal do aparelho devido às cargas Hc
	A	89,23	cm²	Área descontando o deslocamento horizontal do aparelho
	A'o	80,62	cm²	Área descontando o deslocamento horizontal do aparelho
	f	0,14	-	Coeficiente de atrito
	f'	0,18	-	Coeficiente de atrito
	σ_m	56,03	kgf/cm²	Tensão média devida à soma das cargas verticais de aplic
	σ'_m	24,81	kgf/cm²	Tensão média devida à carga vertical de aplicação lenta
1.4.1 VERIFICAÇÃOAO AO NÃO DESLIZAMENTO				
$\sigma'_m = \frac{P_c}{A'_m} > 20$ kgf/cm²	OK!			OK!
$H_c < f' P_c$	OK!			
$H_c + H_s < f(P_c + P_s)$	OK!			

Figura 4.12: P1–Planilha 2: condições de não deslizamento.

1.5 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES			
S_1	5000000	-	-
τ_P	0,0000195	kgf/cm²	Tensão cisalhante devido as cargas verticais de aplicação lenta e rápida
τ_H	3,92	kgf/cm²	Tensão cisalhante devido as cargas horizontais de aplicação lenta e rápida
τ_α	0,13	kgf/cm²	Tensão cisalhante devido à rotação
α_o	1	rad	Componente de rotação de aplicação lenta
α_s	1,2	rad	Componente de rotação de aplicação rápida
1.5.1 VERIFICAÇÃOAO DA SOMA DAS TENSÕES CISALHANTES			
$\tau = \tau_p + \tau_H + \tau_\alpha < 5G$	NÃO PASSA		

Figura 4.13: P1– Planilha 2: verificação das tensões cisalhantes.

4.7.2 Apresentação do programa de verificação

O programa P2 serve exclusivamente para verificar o dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói conforme as exigências da EN 1337-3:2005.

Dispõe-se de 10 medidas obtidas anualmente (2004 - 2013) para as dimensões de cada aparelho de apoio da ponte. Além disso, também é conhecida a carga vertical atuante nos

aparelhos localizados no trecho analisado. A verificação à compressão será a única realizada nesse caso.

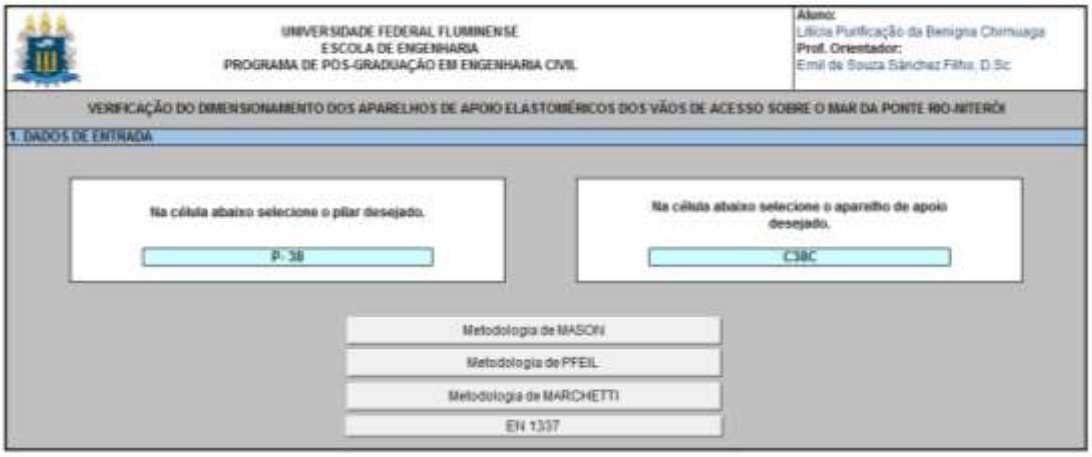


Figura 4.14: P2 – página inicial.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Aluno: Liticia Purificação da Benigna Chimuaga
Prof. Orientador: Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.

VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS DA PONTE RIO-NITERÓI DE ACORDO COM A NORMA EUROPEIA 1337-3:2005

1. DADOS DE ENTRADA

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

ELASTÔMERO				AÇO DE FRETAGEM			
E	4,00	MPa	Módulo de elasticidade do elastômero	f_u	500,00	N/mm²	Resistência à ruptura
G	0,65	MPa	Módulo de cisalhamento do elastômero	f_y	345,00	N/mm²	Limite de escoamento

SEÇÃO TRANSVERSAL

C38C			
a	710	mm	Largura do aparelho de apoio
b	1420	mm	Compeimento do aparelho de apoio
t_i	12	mm	Espessura de uma camada de elastômero
t_s	7	mm	Espessura de uma chapa de aço
n	3	-	Número de chapas de aço
n_t	2	-	Número de camadas de elastômero
h	50	mm	Altura total do aparelho de apoio
c_v	0,7	mm	Espessura do cobrimento vertical
c_l	0,5	mm	Espessura do cobrimento lateral
a'	708,6	mm	Largura útil do aparelho de apoio
b'	1419	mm	Comprimento útil do aparelho
T	46,4	mm	Espessura total do aparelho de apoio

1.1 LIMITAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO

SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÉDIA DE COMPRESSÃO			
COMPRESSÃO	$F_{z,d}$	11347	kN	Força normal de projeto
	A	10.082,00	cm²	Área total do aparelho em planta
	σ_m	11,25	MPa	Tensão média de compressão

1.1.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO

$\sigma_m \leq 15MPa$	OK!

Figura 4.15: P2 – Planilha 4: dados de entrada.

4.7.3 Dados disponíveis

A Concessionária Ponte Rio-Niterói (CPRN), empresa responsável pelo monitoramento e ensaios dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói, disponibilizou dados referentes a10 anos (2004 – 2013) de acompanhamento do desempenho estrutural desses aparelhos. Relatórios anuais contendo informações sobre o estado de conservação dos aparelhos de apoio dos vãos de acesso sobre o mar, acompanhados de fotografias e variações das suas dimensões (deformações) foram analisados para que se pudesse chegar a uma conclusão sobre o desempenho estrutural desses elementos. Essas informações encontram-se na planilha 7 "Dados_AA_Ponte" do programa de dimensionamento. Foram também disponibilizados dados sobre o carregamento vertical no pilar P-136 obtidos em 2014, quando da suspensão da ponte para instalação dos aparelhos de apoio no eixo do pilar. O carregamento vertical nos aparelhos de apoio localizados nos demais pilares do trecho foi obtido a partir de cálculos sugeridos por PFEIL (1975), conforme será mostrado.

Foram também analisados os resultados dos ensaios de compressão simples, distorção e propriedades do elastômero, realizados em 2014.

4.7.4 Análise dos dados

4.7.4.1 Dados de Monitoramento

Numa primeira fase optou-se por efetuar um processo de eliminação de dados espúrios dos conjuntos amostrais (comprimento, largura e altura) de cada aparelho de apoio, e após a aplicação desse filtro encontrar-se a média desses conjuntos. Feito isso com a dimensão dos aparelhos de apoio iniciar o processo de verificação. Para tal foi usado o critério de CHAUVENET mostrado no ANEXO B, (Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18).

Constatou-se que todos os aparelhos de apoio localizados nos pilares dos vãos de acesso sobre o mar apresentavam dimensões aceitáveis por CHAUVENET, ou seja, inexistiam dados espúrios. Embora esses dados fossem aceitáveis verificou-se um uma inconsistência nos mesmos devido a um comportamento tecnicamente impossível de ocorrer, identificado na sua variação. Observa-se na Figura 4.16a variação do comprimento do aparelho de apoio C38C localizado no pilar P38 do trecho em estudo. O aparelho que desde o ano de 2004 ao de 2007 media 1,42 m de comprimento, em 2008 passou a medir 0,71 m e após três anos sem alteração na medição voltou a aos 1,42 metros iniciais. Esse

comportamento foi registrado em 412 aparelhos de apoio de um total de 416 pertencentes ao trecho em análise, ou seja, 99% dos aparelhos de apoio.

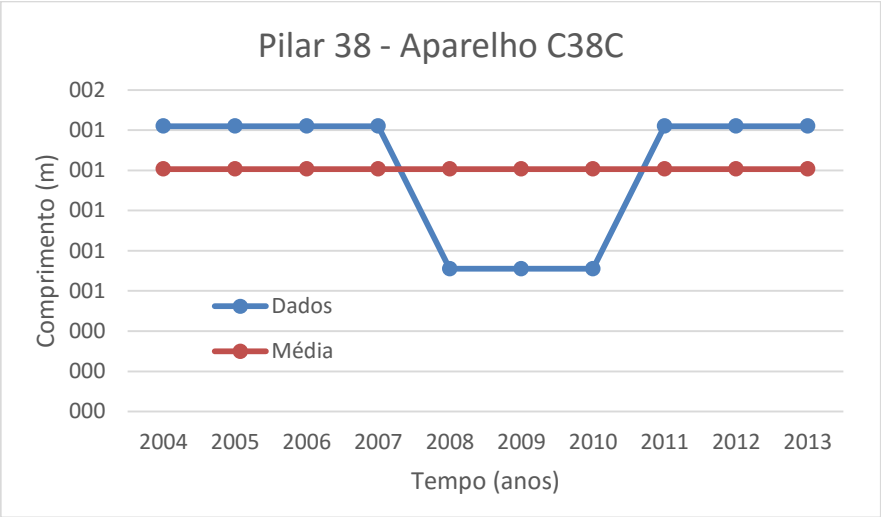


Figura 4.16: Variação do comprimento com o tempo, P38.

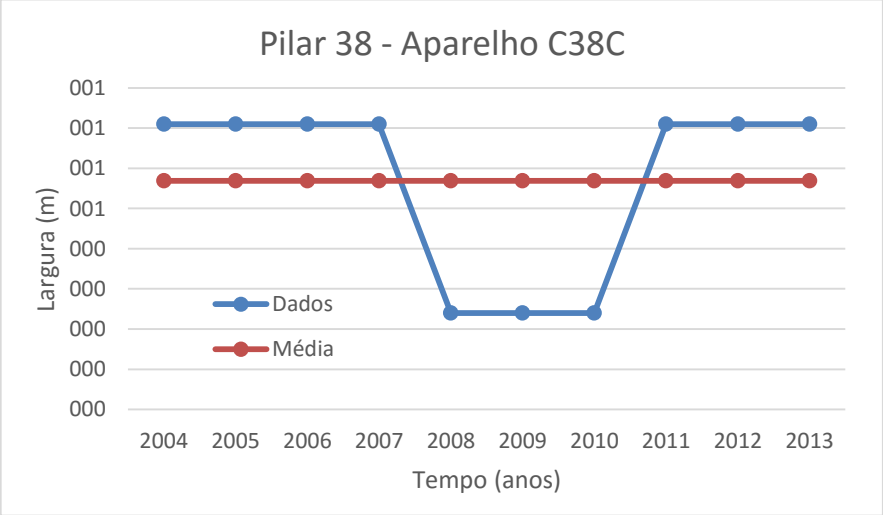


Figura 4.17: Variação da largura com o tempo, P38.

A variação da altura foi a mais significativa, tendo ocorrido com a redução de 4 cm no ano de 2008, sem que houvesse qualquer alteração no seu valor até a última medição. Um esmagamento pode ter sido a causa principal para ocasionar uma perda significativa como essa num período de um ano, (Figura 4.18).

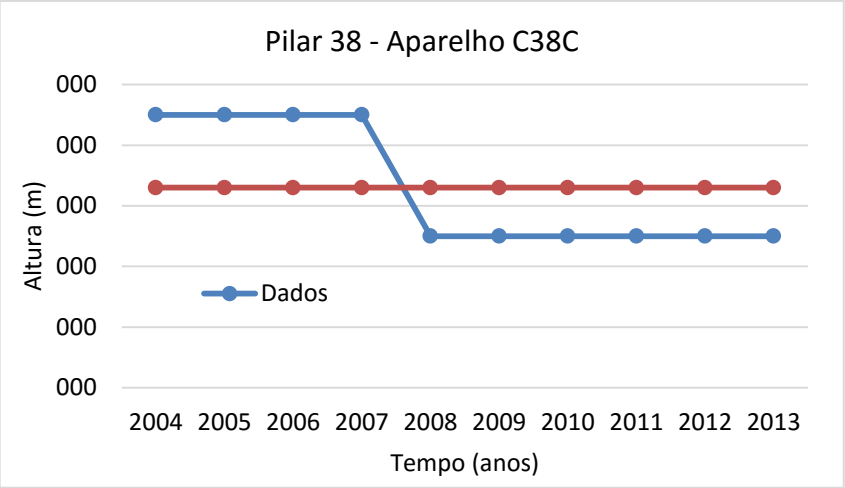


Figura 4.18: Variação da altura com o tempo, P38.

Os pilares P123 e P124 foram os únicos cujos aparelhos de apoio apresentaram variação no comprimento e na largura diferente da dos demais aparelhos (Figura 4.19, Figura 4.20). A variação da altura foi igual em todos os aparelhos, (Figura 4.21).

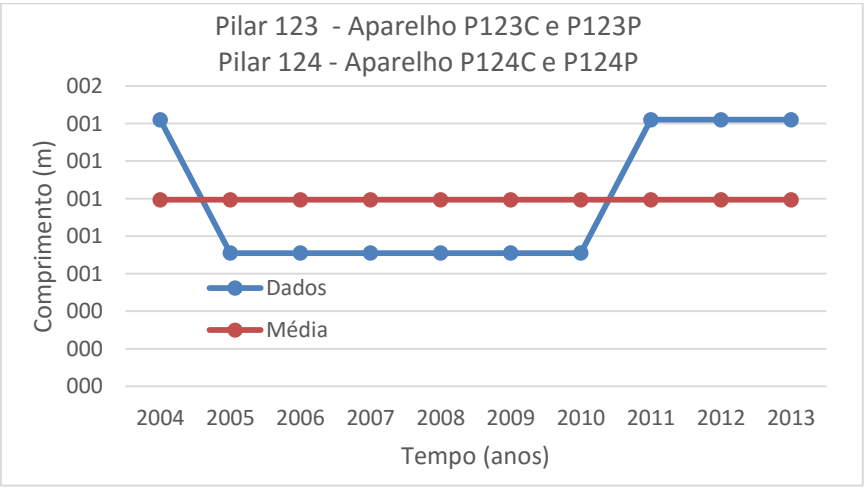


Figura 4.19: Variação do comprimento com o tempo, P123 e P124.

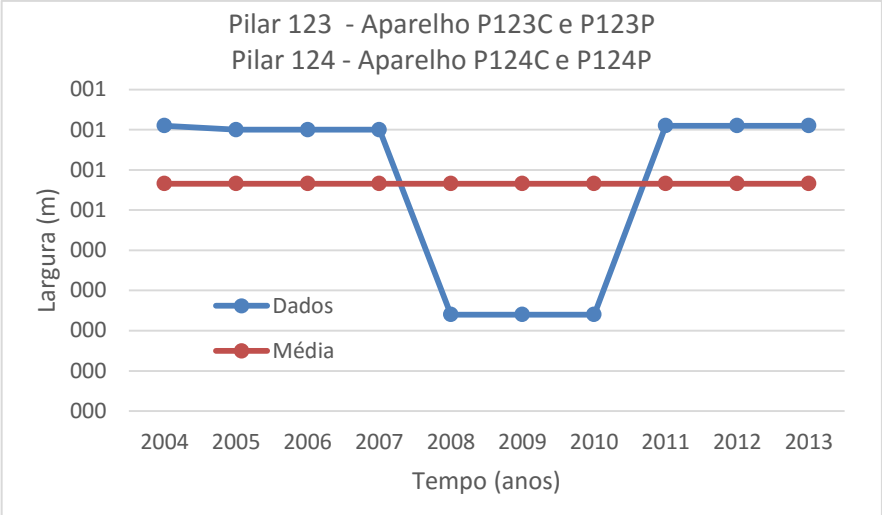


Figura 4.20: Variação da largura com o tempo, P123 e P124.

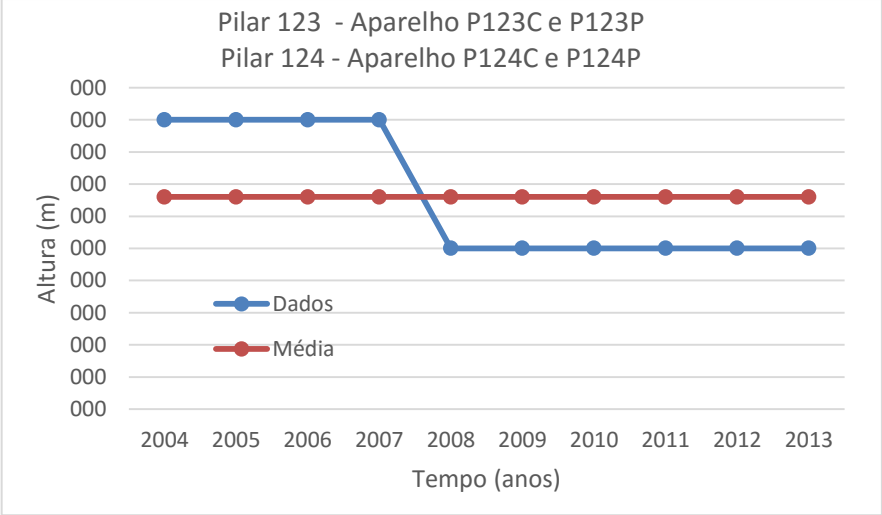


Figura 4.21: Variação da altura com o tempo, P123 e P124.

A inconsistência dos dados foi então reportada a CPRN que por sua vez classificou as falhas ocorridas entre os anos de 2008 e 2010 como erros de leitura, e sugeriu que esses dados fossem alterados para os valores iniciais.

A análise posterior à alteração dos dados fornece os seguintes resultados:

– comprimento inalterado, (Figura 4.22);

– largura inalterada, (Figura 4.23);

– altura quatro centímetros inferior, (Figura 4.24).

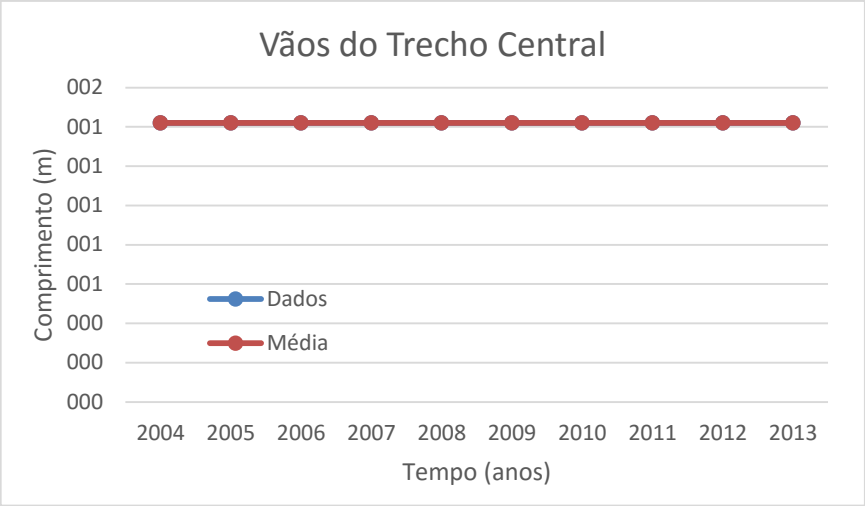


Figura 4.22: Variação do comprimento com o tempo.

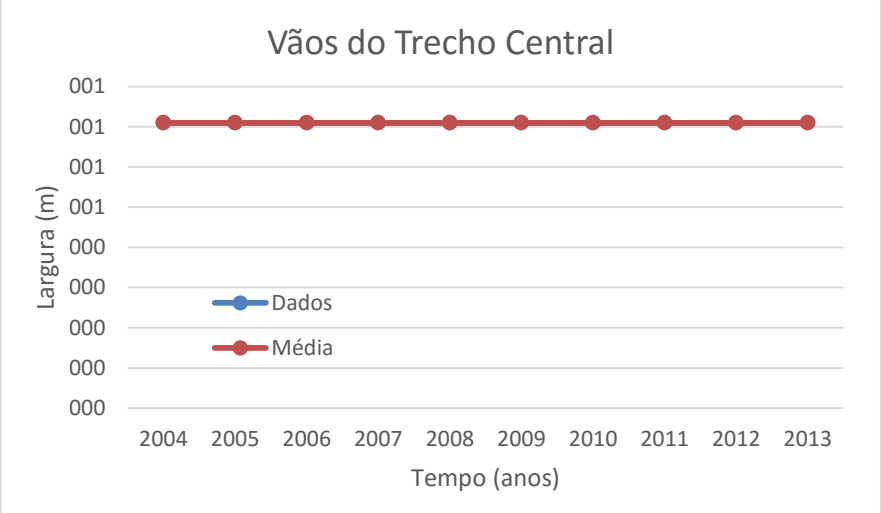


Figura 4.23: Variação do comprimento com o tempo.

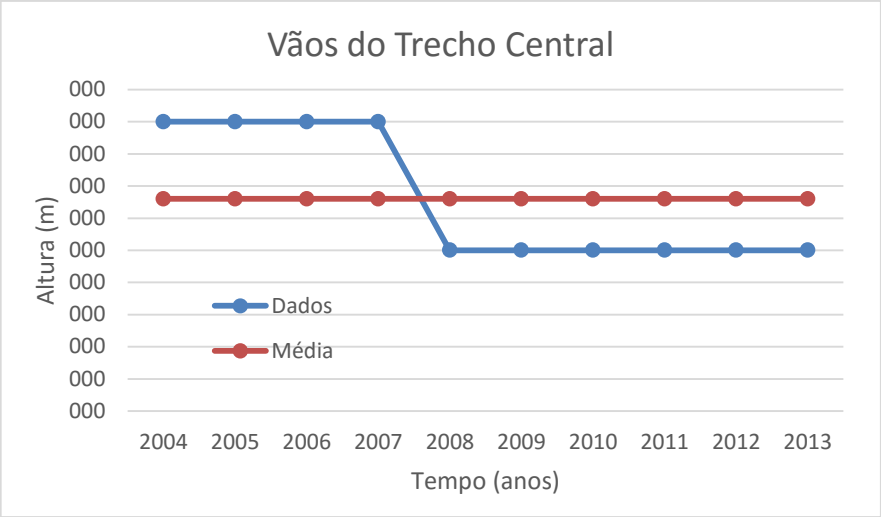


Figura 4.24: Variação da altura com o tempo.

4.7.4.2 Carga Vertical Atuante

Em 2014 houve a necessidade de instalação de novos aparelhos de apoio no pilar P136. Para a instalação foi necessário que a ponte fosse içada sem interrupção do fluxo rodoviário. Para tal foram instalados oito macacos hidráulicos, quatro na face Rio e quatro na face Niterói, conforme mostra o esquema da Figura 4.25.

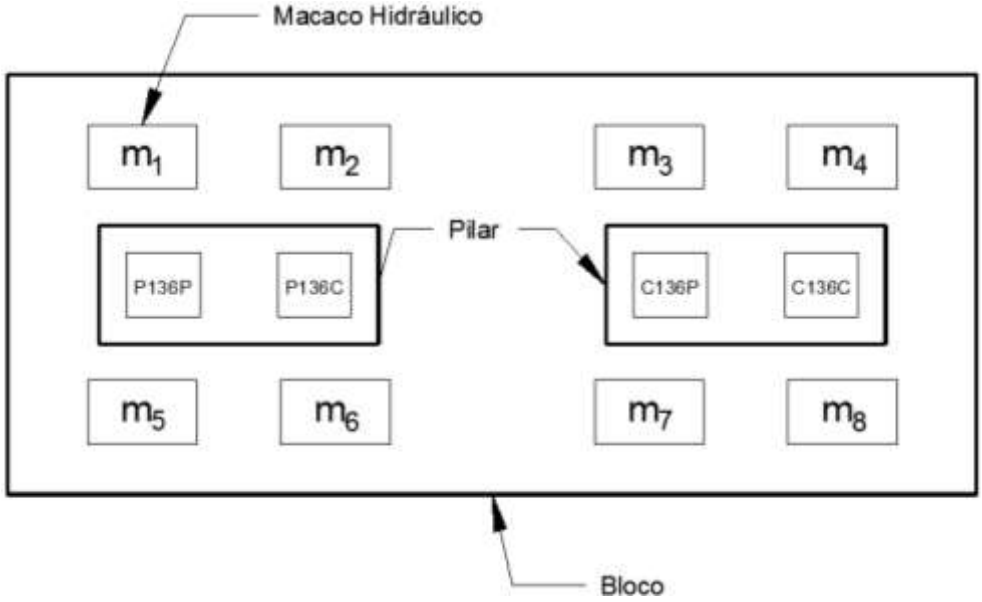


Figura 4.25: Disposição dos macacos no pilar. (Fonte: CPRN, 2015).

Todos os macacos tinham o seu desempenho registrado numa central computadorizada que acompanhava as leituras de carregamento vertical e o deslocamento de cada um. A carga total do trecho içado é de 4.453,5 tf, (Figura 4.26). Pela disposição dos macacos, assume-se que cada par de macacos suporta a carga sobre um aparelho de apoio

(duas almofadas). Os macacos m_3,m_4, m_7 e m_8 foram posicionados na face Cidade; e na face Paquetá os macacos m_1, m_2, m_5 e m_6.

Figura 4.26: Leitura dos macacos no pilar. (Fonte: CPRN, 2015).

Para a obtenção do valor das cargas em cada aparelho Tabela 4.3 somou-se as leituras de cada par de aparelhos conforme as seguintes expressões:

$$CC = m_4 + m_8 \qquad \text{Equação 4.1}$$

$$CP = m_3 + m_7 \qquad \text{Equação 4.2}$$

$$PC = m_2 + m_6 \qquad \text{Equação 4.3}$$

$$PP = m_1 + m_5 \qquad \text{Equação 4.4}$$

onde m_i é a leitura do macaco i.

Tabela 4.3: Resultados da leitura dos macacos hidráulicos.

PILAR	APARELHO DE APOIO	CARGA VERTICAL (tf)
P136	C136C	1134,7
	C136P	970,7
	P136C	1134,7
	P136P	1012,1

PFEIL (1975) apresenta uma tabela que contém os valores das cargas atuantes num bloco corrente no acesso sobre o mar (10tubulões) que serviu para calcular a carga atuante nos demais pilares desse trecho, uma vez que esses não foram contemplados na leitura dos macacos hidráulicos. Portanto, para se obter a carga total sobre os aparelhos de apoio desses

pilares basta subtrair do valor da carga total da fase final da obra os valores do bloco e do pilar também da fase final da obra Tabela 4.4.

$$P_{total} = 6.650 - (930 + 500)$$

$$P_{total} = 5.220\ tf$$

Tabela 4.4: Cargas verticais atuantes num bloco corrente no acesso sobre o mar.

CARGA	FASE CONSTRUTIVA (tf)	FASE FINAL (tf)
Bloco	930	930
Pilar	500	500
Superestrutura	3500	4400
Carga móvel	–	820
Total	4930	6650

Fonte: PFEIL (1975).

A leitura efetuada nos manômetros indicou uma carga total de $P_{total} = 4.453{,}5\ tf$ que representa 85% da carga verificada por PFEIL (1975).

4.7.4.3 Ensaios de Laboratório

Os aparelhos de apoio do pilar P-136 foram trocados no ano de 2014. Os ensaios de verificação dimensional, compressão simples, distorção, propriedades do elastômero e da chapa de aço são ensaios que fazem parte do controle de recebimento de aparelhos de apoio, de acordo com as normas brasileiras sobre o assunto válidas à época. Ressalta-se que os ensaios e a instalação dos novos aparelhos do eixo 136 ocorreram antes do cancelamento dessas normas pela ABNT em outubro de 2014.

A comprovação das expressões e das sistemáticas utilizadas nesta dissertação foi avaliada com os resultados obtidos nesses ensaios a serem aceites para utilização na Ponte Rio-Niterói.

Foi ensaiada uma amostra de aparelhos de apoio de neoprene fretado com dimensões 800 mm x 700 mm x 61 mm. Os resultados de interesse neste trabalho são os dos ensaios de compressão simples e de distorção.

- Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples foi realizado nas seguintes condições:

– temperatura ambiente de 23ºC;

– dimensões do corpo de prova 180 mm x 160 mm;

– deformação vertical residual de 0,03%.

Os resultados obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 4.5, de onde se pode concluir que as exigências normativas são atendidas nos quesitos analisados.

Tabela 4.5: Resultados do ensaio de compressão simples.

Tensão Aplicada (MPa)	Ensaio	Valor Encontrado	Valor Especificado
40	Rasgamento do elastômero	Não houve	Não deve haver
60	Deslocamento nas interfaces de ligação	Não houve	Não deve haver
60	Escoamento ou ruptura da chapa de aço	Não houve	Não deve haver

Fonte: Concessionária Ponte Rio-Niterói, 2015.

- Ensaio de distorção

O ensaio de distorção foi realizado nas seguintes condições:

– temperatura ambiente de 23ºC;

– temperatura do pré-condicionamento dos corpos de prova de 23ºC;

– dimensões do corpo de prova 200 mm x 150 mm;

Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se na Tabela 4.6, de onde se pode concluir que os aparelhos ensaiados atendem às exigências normativas nos quesitos analisados.

Tabela 4.6: Resultados do ensaio de distorção.

Verificação	Ensaio	Valor encontrado	Valor especificado
Módulo de elasticidade transversal	G	0,87	0,85 a 1,15
Deslocamento elastômero-aço	Deslocamento na $tg\gamma = 0{,}9$	Não houve	Não deve haver
	Deslocamento na $tg\gamma = 2{,}0$	Não houve	Não deve haver
Rasgamento do elastômero	Deslocamento na $tg\gamma = 0{,}9$	Não houve	Não deve haver
	Deslocamento na $tg\gamma = 2{,}0$	Não houve	Não deve haver

Fonte: Concessionária Ponte Rio-Niterói, 2015.

4. 8 VERIFICAÇÕES

Nesta dissertação os aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói foram verificados à apenas duas situações de carregamento: compressão e rotação. Na verificação à compressão foi considerada a carga vertical calculada a partir da Tabela 4.4.

$$P_{total} = 5.220\ tf$$

4.8.1 Verificações à compressão

Na verificação à compressão considerou-se que cada aparelho de apoio suporta uma carga igual a um quarto da carga total vertical considerada, ou seja,

$$P_i = \frac{5.220}{4}$$

$$P_i = 1.305\ t$$

onde P_ié a carga vertical atuante no aparelho i.

As verificações à compressão pelos métodos de MASON (1977), PFEIL (1983), MARCHETTI (2008) e EN 1337-3:2005 são apresentadas (Figura 4.27, Figura 4.28,Figura 4.29e Figura 4.30).

Figura 4.27: Verificação à compressão por MASON (1977).

1.1 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À COMPRESSÃO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÉDIA ATUANTE			
COMPRESSÃO	N	13050	kN	Força de compressão aplicada
	A	10.082,00	cm²	Área do aparelho de apoio em planta
	σ_c	12,94	MPa	Tensão média no aparelho de apoio
	FATOR DE FORMA			
	F_f	19,20	-	Coeficiente de majoração da carga atuante
	TENSÃO DE CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM			
	τ_o	1,01	MPa	Tensão de cisalhamento no plano de colagem
1.1.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO				
$\sigma_c \leq 15MPa$	OK!			OK!
$\tau_c = 1{,}5\frac{\sigma_c}{F_f} \leq 3G_n$	OK!			

Figura 4.28: Verificação à compressão por PFEIL (1983).

1.1 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS , CISALHANTE E DO RECLAQUE À COMPRESSÃO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÁXIMA NORMAL			
COMPRESSÃO	$N_{máx}$	13050	kN	Força máxima de compressão
	A	9813,6	cm²	Área útil do aparelho de apoio
	$\sigma_{c,máx}$	13,30	MPa	Tensão normal máxima de compressão
	TENSÃO MÍNIMA NORMAL			
	$N_{mín}$	26	kN	Força mínima de compressão
	$\sigma_{c,mín}$	0,03	MPa	Tensão mínima de compressão
	TENSÃO DE CISALHAMENTO			
	F_f	19,72	-	Fator de forma
	τ_q	1,01	MPa	Tensão de cisalhamento média
	RECALQUE À COMPRESSÃO			
	D_L	2,63	-	Recalque à compressão
1.1.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO				
$\sigma_{c,máx} \leq 10MPa$	NÃO PASSA			NÃO PASSA
$\sigma_{c,mín} \leq 3MPa$	OK!			
$\tau_r \leq 3G_n$	OK!			

Figura 4.29: Verificação à compressão por MARCHETTI (2008).

1.1 LIMITAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO				
SITUAÇÃO DE CARREGAMENTO	TENSÃO MÉDIA DE COMPRESSÃO			
COMPRESSÃO	$F_{z,d}$	13050	kN	Força normal de projeto
	A	10.082,00	cm²	Área total do aparelho em planta
	σ_m	12,94	MPa	Tensão média de compressão
1.1.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO				
$\sigma_m \leq 15MPa$	OK!			

Figura 4.30: Verificação à compressão pela EN 1337-3:2005.

4.8.2 Verificações à rotação

A verificação à rotação foi realizada apenas utilizando-se a norma EN 1337-3:2005.

A rotação dos aparelhos de apoio no eixo vertical é menor do que a rotação dos mesmos nos eixos horizontais (sentido longitudinal e transversal da ponte); e a rotação no eixo transversal pode ser maior que a rotação no eixo longitudinal, (VIEIRA, 2013).

Para atender aos requisitos da EN 1337-3:2005 concernentes à rotação do aparelho de apoio é necessário que a expressão (3.112) seja satisfeita.

KORDINA e OSTEROTH (1983) sugere para a obtenção de $\alpha_{a,d}$ e $\alpha_{b,d}$ adote-se a seguinte expressão:

$$e = \frac{a^2}{2t}\left(\frac{1}{150} + \alpha\right) \qquad \text{Equação 4.5}$$

onde

e– excentricidade da carga vertical;

t–espessura da camada de elastômero;

a–comprimento ou a largura do aparelho de apoio;

α–ângulo de rotação admissível do aparelho.

Sendo $\alpha_{adm} = 0{,}0067\,\text{rad}$ o ângulo de rotação admissível de uma camada de elastômero, e substituindo-se o seu valor na expressão (4.5)tem-se:

$$e_a = \frac{71^2}{2 \times 1{,}2}\left(\frac{1}{150} + 0{,}0067\right)$$

$$e_a = 28{,}08\ \text{cm}$$

$$e_b = \frac{142^2}{2 \times 1{,}2}\left(\frac{1}{150} + 0{,}0067\right)$$

$$e_b = 112{,}30\ \text{cm}$$

Com os valores da excentricidade em cada eixo do plano de assentamento do aparelho, pode-se então calcular $\alpha_{a,d}$ e $\alpha_{b,d}$, isolando-seα na expressão (4.5).

$$\alpha_{a,d} = \frac{2 \times 1{,}2 \times 28{,}08}{2 \times 71^2} - \frac{1}{150}$$

$$\alpha_{a,d} = 1{,}77 \times 10^{-5}\text{rad}$$

$$\alpha_{a,d} = 0{,}0001^{\circ}$$

$$\alpha_{b,d} = \frac{2 \times 1{,}2 \times 112{,}30}{2 \times 112{,}30^2} - \frac{1}{150}$$

$$\alpha_{b,d} = 4{,}02 \times 10^{-3}\text{rad}$$

$$\alpha_{b,d} = 0{,}23^{\circ}$$

Finalmente, efetua-se a verificação à compressão segundo a EN 1337-3:2005 a partir da expressão (3.112):

$$\sum V_{z,d} = 4 \text{ cm}$$

$$\frac{\left(a'\alpha_{a,d} + b'\alpha_{b,d}\right)}{K_{r,d}} = \frac{69{,}6 \times 1{,}77 \times 10^{-5} + 141 \times 4{,}02 \times 10^{-3}}{3}$$

$$\frac{\left(a'\alpha_{a,d} + b'\alpha_{b,d}\right)}{K_{r,d}} = 0{,}19 \text{ cm}$$

Então

$$4 \text{ cm} \geq 0{,}19 \text{ cm OK!}$$

4. 9 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na compressão, dos quatro métodos utilizados na verificação apenas um apresentou o resultado diferente (MARCHETTI, 2008). Os outros três apresentaram o mesmo resultado, mas MASON (1977) não aprovou o dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói. O dimensionamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói foi aprovado pelos métodos de PFEIL (1983) e EN 1337-3:2005, obtendo-se a mesma tensão média de 12,94 MPa, e os método de MARCHETTI (2008) e MASON (1977) reprovaram o dimensionamento, obtendo-se 13,30 e 12,94 MPa, respectivamente Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Apresentação geral dos resultados.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL															ALUNA: Lúcia Purificação da Benigna Chimuaga PROFESSOR: Emil de Souza Sánchez Filho, D. Sc
APRESENTAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS															
METODOLOGIA	COMPRESSÃO			ROTAÇÃO			FORÇA HORIZONTAL			DESLIZAMENTO			TENSÕES CISALHANTES		
	CALCULADO		ESPECIFICADO	CALCULADO		ESPECIFICADO	CALCULADO		ESPECIFICADO	CALCULADO		ESPECIFICADO	CALCULADO		ESPECIFICADO
MASON (1977)	11,94	MPa	$10 \leq \sigma_m \leq 12$ MPa	11,8	cm	$h \leq \frac{a}{5} = 14,2$ cm	0,07	-	$\gamma = \frac{\tau}{G} \leq 0,7$	29,77	kgf/cm²	$\sigma'_m = \frac{F_v}{A_r} > 20$ kgf/cm²	1,11	cm	$\tau = \tau_c + \tau_a + \tau_r < 5G = 1,21$
										25	kgf	$H_1 < f'R_1 = 601,67$			
										70	kgf	$H_1 + H_2 < f'(R_1 + R_2) = 801,6$			
PFEIL (1983)	1,01	MPa	$\tau_c = 1,5\frac{\sigma_c}{\beta} \leq 3G_c = 1,95$	60	mm	$nh_e \leq \frac{1}{4}b_r = 284$	0,07	MPa	$\tau_H = \frac{H_d}{A_r} \leq 0,5G_c$	-		-	-		-
				0,43	MPa	$\tau_\alpha = \frac{G_c}{2}\left(\frac{a_r}{h_r}\right)tg\left(\frac{\alpha}{n}\right) \leq 1,5G_c$	0,10	MPa	$\tau_{Hd} = \frac{H_{2d}}{A_r} \leq 0,4G_c$	-		-	-		-
MARCHETTI (2008)	13,30	MPa	$\sigma_{c,máx} \leq 15$ MPa	1,24	MPa	$\tau_\alpha \leq 1,5G_c = 0,98$	-		-	-		-	-		-
	1,01	MPa	$\tau_c \leq 3G_c = 1,95$				-		-	-		-	-		-
EN1337-3:2005	12,94	MPa	$\sigma_m \leq 15$ MPa	4,0	cm	$\sum v_{z,d} \geq \frac{(a'\alpha_{a,d} + b'\alpha_{b,d})}{K_{r,d}}$	-		-	-		-	-		-
							-		-	-		-	-		-

4. 10 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

As metodologias de dimensionamento aqui estudadas apresentam algumas diferenças quanto às verificações e considerações realizadas em cada uma das situações de carregamento analisadas. Para efetivar a comparação a norma europeia foi considerada como metodologia padrão. Portanto, os valores calculados nas metodologias nacionais foram divididos pelos valores calculados na EN 1337-3:2005. Os resultados dessas operações servem para identificar quais os métodos que mais se aproximam da norma europeia.

Conforme mostrado no Capítulo 3, os métodos estudados nem sempre fazem as mesmas verificações, o que torna difícil a comparação entre eles. Para realizar essa comparação foram abordados os itens de dimensionamento mais comuns entre todos. O Quadro 4.3mostra os critérios de dimensionamento de cada método.

Quadro 4.3: Critérios de dimensionamento dos métodos estudados.

CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO									
MÉTODO	TENSÕES NORMAIS	TENSÕES CISALHANTES	ALTURA DO APARELHO	DISTORÇÃO	LEVANTAMENTO DE BORDAS	ESCORREGAMENTO	ESPESSURA DA CHAPA DE AÇO	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DEVIDO À CARGA DE CISALHAMENTO	FLECHA VERTICAL
MASON	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
PFEIL	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
MARCHETTI	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
EN 1337-3	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM

Nesse caso a comparação dos métodos foi efetuada a partir da análise dos resultados na compressão, pois essa é a verificação comum a todos os métodos Tabela 4. 1.

Tabela 4. 1: Comparação entre os métodos na compressão.

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS						
METODOLOGIA	COMPRESSÃO					
	TENSÃO		ESPECIFICADO	FORÇA ATUANTE		$n = \frac{\text{METODOLOGIA}}{\text{EN 1337-3:2005}}$
MASON (1977)	12,94	MPa	$10 \leq \sigma_m \leq 12$ MPa	13050	kN	1,00
PFEIL (1983)	12,94	MPa	$\sigma_c \leq 15$MPa	13050	kN	1,00
MARCHETTI (2008)	13,30	MPa	$\sigma_{c,máx} \leq 10MPa$	13050	kN	1,03
EN1337-3:2005	12,94	MPa	$\sigma_m \leq 15$MPa	13050	kN	–

Para se verificar o comportamento da tensão normal com a variação da força de compressão em cada um dos métodos, os resultados são mostrados na Figura 4.31.

Observa-se nesse gráfico que o comportamento das tensões normais nos métodos de MASON (1977) e da EN 1337-3:2005 são idênticos, uma vez que a área considerada do aparelho é a mesma para ambos os métodos (área total); o mesmo se observa para os métodos de MARCHETTI (2008) e PFEIL (1983) em que a área considerada é a área útil.

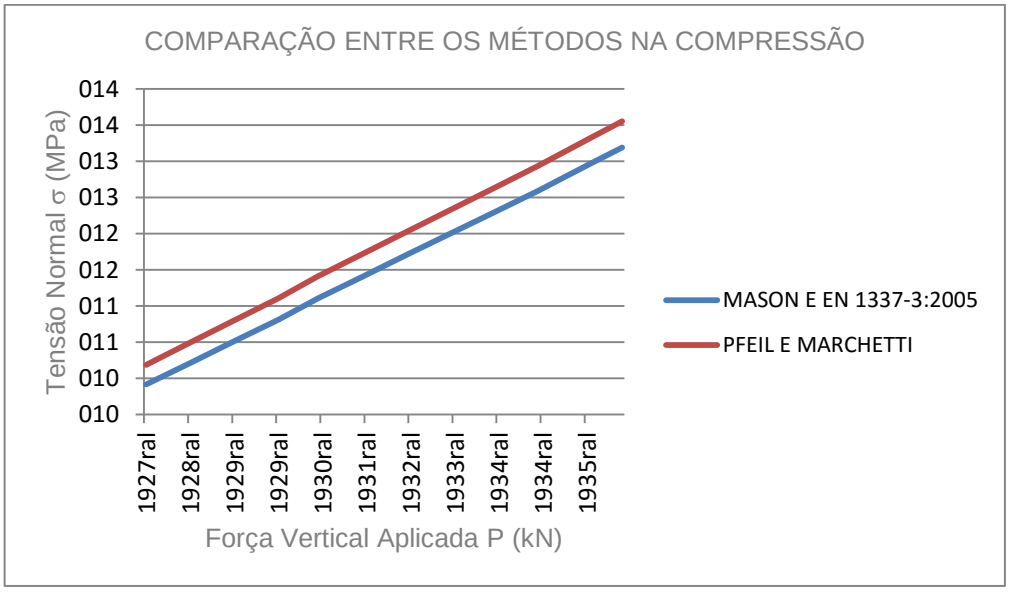


Figura 4.31: Variação da tensão normal com o aumento da carga vertical.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5. 1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados alcançados por meio dos métodos de dimensionamento conclui-se que depende do projetista a aprovação ou não de um determinado aparelho de apoio que tenha sido dimensionado por um dos métodos existentes, pois dos aparelhos de apoio estudados nenhum foi aprovado em todos os critérios de dimensionamento. Além disso, a verificação à compressão resultou no mesmo valor em três dos quatro métodos utilizados, mas esses métodos não fazem todos as mesmas verificações.

Os resultados mostram ainda que o método de MARCHETTI (2008) é o mais criterioso, pois analisa mais situações em relação aos demais, e para além de limitar a tensão de compressão máxima (menor valor de todos os métodos estudados) limita também a tensão mínima.

Ainda quanto à verificação na compressão os métodos menos conservadores são PFEIL (1983) e a EN 1337-3:2005.

Para a carga vertical adotada ($P = 13.050$ kN) na verificação à compressão, apenas o métodos de MARCHETTI (2008) e MASON (1977) não tiveram as suas especificações atendidas (Figura 5.1).

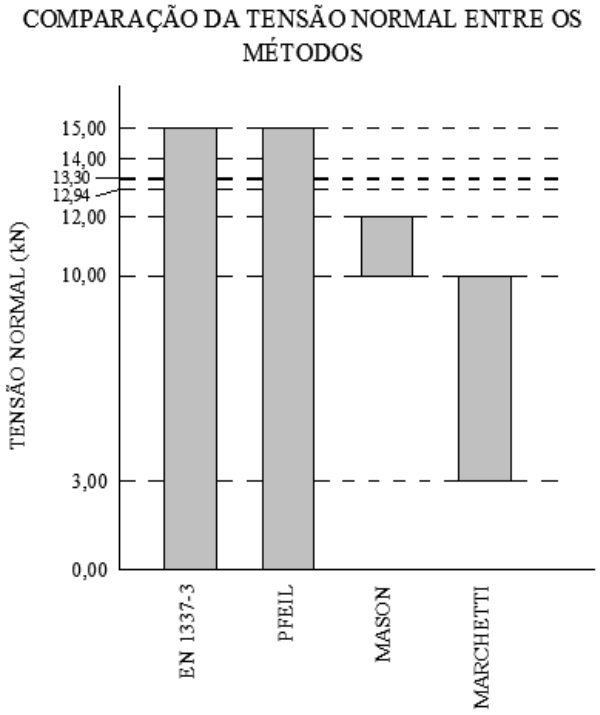


Figura 5.1: Zonas limites dos métodos na verificação à compressão.

Quanto ao estado de conservação dos aparelhos de apoio da Ponte-Rio-Niterói, embora tenham sido identificados vários sintomas patológicos em muitos deles, não houve necessidade de intervenções corretivas (exceto no pilar P-136), uma vez que os aparelhos se mantêm em serviço de forma satisfatória.

Quanto aos dados de monitoramento dos aparelhos de apoio entre os anos de 2004 e 2013, conclui-se que os valores referentes às dimensões no plano de assentamento (comprimento e largura) dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói são questionáveis, visto que para a deformação vertical de 4,0 cm observada nenhuma deformação lateral correspondente foi registrada; além disso, o valor da deformação vertical é relativamente elevado, pois segundo GUERREIRO (2003) quanto maior o fator de forma S maior a rigidez vertical K_v. A altura inicial das medições por sua vez também tem um valor questionável, pois considerando que o valor real inicial da altura dos aparelhos de apoio seja de 6,4 cm (PFEIL, 1975) com os 4,0 cm de deformação vertical os aparelhos mediriam hoje apenas 2,4 cm de altura, o que não ocorre. Parece mais coerente considerar a altura inicial de 6,4 cm e a altura final de 5,0 cm (dados das medições), o que levaria a uma deformação vertical de 1,4 cm que é um valor mais aceitável para um aparelho com 40 anos de serviço.

Finalmente, conclui-se que quanto ao comportamento estrutural os aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói atendem às solicitações para os quais foram dimensionados e também às que estão submetidos, pois durante 40 anos de uso não apresentaram variações nas suas dimensões, exceto na altura o que não comprometeu o seu funcionamento.

5. 2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de expandir e melhorar a pesquisa realizada neste trabalho são realçadas as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

– estudar o comportamento dos aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói considerando o carregamento horizontal;

– analisar o comportamento estrutural de aparelhos de apoio usando outros métodos de dimensionamento;

– relacionar as patologias observadas com o grau de agressividade do ambiente em que os aparelhos estudados se encontram;

– considerar realizar os ensaios para obtenção de propriedades físicas nos aparelhos de apoio da ponte e comparar com os resultados previstos em normas vigentes;

– realizar um estudo sobre a compatibilidade do modelo reduzido utilizado nos ensaios prescrito em normas vigentes (amostra) com os aparelhos de apoio da Ponte Rio-Niterói, para melhor verificação das condições encontradas nos ensaios;

– realizar uma verificação estrutural considerando-se a carga vertical real dos tabuleiros da ponte, visto que os valores utilizados em literatura corrente apresentam-se 15% maiores do que os valores observados em aferições sob condições reais de carregamento da estrutura;

– ampliar o estudo sobre a instabilidade dos aparelhos de apoio com base na análise realizada por TOPALOFF (1964), que é o principal estudo encontrado na literatura para a flambagem desses elementos.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9783. Aparelhos de apoio de elastômero fretado. 1ª Edição, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9785. Aparelho de apoio de elastômero – Distorção – Método de ensaio. 1ª Edição, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9786. Aparelho de apoio de elastômero – Deslizamento – Método de ensaio. 1ª Edição, 1987.

CONCESSIONÁRIA PONTE RIO-NITERÓI. Relatórios Anuais de Vistoria dos Aparelhos de Apoio da Ponte Rio-Niterói. Niterói, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 091/2006 – ES. Tratamento de aparelhos de apoio: concreto, neoprene e metálicos. 1ª Edição, 2006.

EUROPEAN NORM.EN 1337-3.Structural bearings – Elastomeric bearings.Part 3, 2005.

LEE, DAVID JOHN. Bridge Bearings and Expansion Joints. Oxford: E & FN SPON Chapman & Hall, 2nd Edition, 1994.

GÜNTER RAMBERGER. Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges.Viena: IABSE, 2002.

GUERREIRO, LUÍS. Comportamento de Blocos de Elastômero (Borrachas). 2003. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2003.

KORDINA, K.; OSTEROTH, H.Tragverhalten von AuflagernimStahlebetonfertigteilbauBeiVerdrehung und Verschiebung der AufliegendenFertigteile.ForschungBericht, T. U Braunschweig, 1983.

LOPES, PAULO AFONSO. Estatística Aplicada à Análise de Resultados de Ensaios de Proficiência na Avaliação de Laboratórios. In: Instituto Adolpho Lutz, 2003, Rio de Janeiro.

MACHADO, RAFAEL NAVALHO; SARTORI, ARTUR. Pontes; Patologias dos Aparelhos de Apoio. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 6., 2010, Córdoba.

MARCHETTI, OSVALDEMAR. Pontes de Concreto Armado.1ª edição São Paulo: Editora Blucher, 2008.

MASON, JAYME. Pontes em concreto armado e protendido: Princípios de Projeto e Cálculo. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

OLIVEIRA, ELCIO CRUZ. Comparação das Diferentes Técnicas para Exclusão de “Outliers”. In: CONGRESSO DE QUALIDADE EM METROLOGIA, Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 2008, São Paulo.

PFEIL, WALTER. Pontes em Concreto Armado: MesoestruturaInfra-estrutura e Apoios.(3ª edição) Rio de Janeiro: LTC, 1983.

PFEIL, WALTER. Ponte Presidente Costa e Silva: Métodos Construtivos. Rio de Janeiro: LTC, 1975.

SÁNCHEZ FILHO, EMIL DE SOUZA. Aparelhos de apoio. 10f. Notas de aula. Rio de Janeiro,2014.

STEIN, ALBERTO SCHEFFER. Comparação de Procedimentos de Dimensionamento de Aparelhos de Apoio Elastoméricos. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

TOPALOFF, B. GummilagerfürBrücken, Berechnung und Anwendung – Der Bauingenieur 39(1964), pp. 50-64.

VIEIRA, M. I. C. Tipologia, instalação, funcionamento e manutenção dos diversos tipos de aparelhos de apoio em obras de arte. 2013. 226 f. Dissertação de Mestrado − Área Departamental de Engenharia Civil − Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

VIVAN, MILTON EMÍLIO. Aparelhos de Apoio Estruturais. [Editorial]. Revista Concreto e Construções IBRACON, p. 112-115, Jan-Mar, 2015.

SÍTIOS VISITADOS

http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/

http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/aparelhos-de-apoio-oferecem-alta-durabilidade-a-estruturas-de-grande-porte_6090_0_1 (25.09.14 - 21:07)

http://www.tecnoflon.com.br/?gclid=COSpqp-P_sACFa_m7AodyX4Acg#/ptfe (26.09.14 - 02:20)

http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php

http://www.neoprex.com.br/manuais_tecnicos.php

http://issuu.com/neoprexsite/docs/catalogoneoprex?e=5574142/2603881

http://www.indaco.com.br/produtos.php?id_produto=52

ANEXOS

ANEXO A

A.1 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE COM RELAÇÃO À FLAMBAGEM

Os aparelhos de apoio apresentam resistência à compressão e flexão, mas na presença da força cortante deformam-se muito.

No estudo da estabilidade na resistência dos materiais considerem-se apenas deformações geradas por forças de compressão e momentos de flexão, nos aparelhos de apoio deve-se considerar também a parcela gerada por forças cortantes. Precede a análise do comportamento dos aparelhos de apoio de neoprene no estudo da estabilidade, a análise do comportamento de barras TOPALOFF (1964).

A.2 INSTABILIDADE DEVIDO AO MOMENTO DE FLEXÃO

Seja a resistência ao cortante infinitamente grande $\mathrm{FG} \rightarrow \infty$, nesse caso a deformada da barra resulta apenas do momento de flexão.

Com a força de flambagem$\mathrm{P_M}$ tem-se,

$$y'' = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{M}{EI} \qquad \text{Equação A.1}$$

$$M = P_M y \qquad \text{Equação A.2}$$

Sendo E o módulo de elasticidade do material e I o momento de inércia da seção, donde resulta a equação diferencial do problema de flambagem

$$y'' + \frac{P_M}{EI} y = 0 \qquad \text{Equação A.3}$$

cuja solução é a carga de flambagem de Euler

$$P_{CR} = EI \left(\frac{\pi}{h}\right)^2 \qquad \text{Equação A.4}$$

ondeh é a altura do aparelho de apoio.

A.3 INSTABILIDADE DEVIDO À FORÇA CORTANTE

Seja a resistência à flexão infinitamente grande, nesse caso a deformada da barra resulta apenas da força cortante.

Na flambagem tem-se a força $\mathrm{P_Q}$, assim

$$y' = tg\gamma = \frac{Q}{AG}$$ Equação A.5

$$Q = P_Q y'$$ Equação A.6

donde resulta a carga de flambagem

$$P_Q = AG$$ Equação A.7

A deformada é composta pelas parcelas devidas à força cortante e ao momento de flexão $y = y_Q + y_M$ e é dada por:

$$y_Q'' = \frac{Q}{AG} = \frac{P}{AG} y''$$ Equação A.8

e

$$y_M'' = -\frac{M}{EI} = \frac{P}{EI} y$$ Equação A.9

as parcelas devidas à influência da força cortante e do momento de flexão, então

$$y'' = y_Q'' + y_M'' = \frac{P}{AG} y'' - \frac{P}{EJ} y$$ Equação A.10

donde a equação diferencial do problema

$$y'' + \frac{EI\left(1 - \frac{P}{AG}\right)}{P} y = 0$$ Equação A.11

com a função

$$y = A \sin \frac{\pi}{h} x$$ Equação A.12

resulta a carga crítica de flambagem

$$P_{Q+M} = EI \left(\frac{\pi}{h}\right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2 \frac{EI}{AG}}$$ Equação A.13

A expressão (A.13) pode ainda ser escrita sob a forma

$$P_{Q+M} = P_M \frac{1}{1 + \frac{P_M}{P_Q}} = P_Q \frac{1}{1 + \frac{P_Q}{P_M}}$$ Equação A.14

Onde $P_M = EI\frac{\pi^2}{h^2}$e $P_Q = AG$ são as cargas de flambagem sob influência do momento de flexão e da força cortante, respectivamente.

A.4 ESTABILIDADE DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS

A análise da instabilidade realizada ilustra o comportamento de uma barra quando sujeita a solicitações de momento de flexão e cisalhamento.

Seja um aparelho de apoio com a faixa $b \to \infty$, $a = 300$ mm, $d = 5$ mm, $n = 8$ e $h = 40$ mm.

Para a parcela correspondente ao momento de flexão deve-se introduzir o módulo de elasticidade ideal para a rotação.

$$E_i = E\frac{1}{15}\left(\frac{a}{d}\right)^2 \qquad \text{Equação A.15}$$

daí tem-se

$$P_M = E_i I\left(\frac{\pi}{h}\right)^2 = E\frac{1}{15}\left(\frac{a}{d}\right)^2\frac{a^3}{12}\cdot\frac{\pi^2}{n^2 d^2} \qquad \text{Equação A.16}$$

A parcela correspondente à força cortante é,

$$P_Q = AG = E\frac{1}{3}a \qquad \text{Equação A.17}$$

onde

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

sendo o coeficiente de deformação transversal da borracha natural $\nu = 0{,}5$, assim

$$\frac{P_M}{P_Q} = \frac{1}{6}\left(\frac{a}{d}\right)^4\frac{1}{n^2}$$

$$\frac{P_M}{P_Q} = \frac{1}{6}60^4\frac{1}{64} = 34000$$

A carga de flambagem é, então,

$$P_{M+Q} = P_M\frac{1}{1+34000}$$

ou seja, a carga de flambagem é uma fração da carga crítica de Euler P_M. Essa expressão torna-se mais clara se a carga de flambagem for expressa em função da carga de flambagem devido à força cortante $P_Q = AG$.

$$P_{Q+M} = P_Q \frac{1}{1 + \frac{P_Q}{P_M}}$$

$$P_{Q+M} = P_Q \frac{1}{1 + \frac{1}{34000}} \approx P_Q$$

Pode se observar a partir daí que a borracha flamba somente sob a influência de força cortante e na para carga centrada $\mathrm{P_Q} = \mathrm{AG}$. A essa carga corresponde a tensão de flambagem

$$\sigma_K = \frac{P_Q}{A} = G \qquad \text{Equação A.18}$$

A tensão de flambagem fica entre as cargas de serviço. Os apoios em borracha, mesmo para cargas usuais, são instáveis devido a:

– alta rigidez à flexão (função de$\mathrm{E_i}$) em comparação com a pequena rigidez ao cisalhamento;

– pequena altura h em relação às outras dimensões da seção tranversala e b.

Essa instabilidade dos apoios em borracha, mesmo para pequena compressão centrada, não é progressiva e crítica, pois a altura é pequena, bastam pequenas distorções para que o apoio encontre, contudo, embora não se mantendo reto, uma posição estável.

A Figura A.1mostra o funcionamento de um apoio em processo de flambagem.

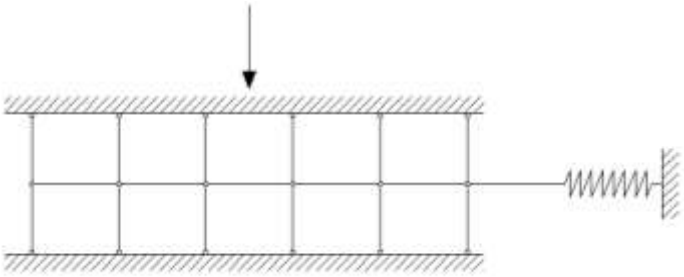


Figura A.1: Instabilidade elástica de um aparelho de apoio; adaptado de Topaloff (1964).

ANEXO B

B. 1 TESTEDEVALOR ESPÚRIO (*Chauvenet*)

O teste de Chauvenet obedece a seguinte sequência (OLIVEIRA, 2008):

– organização dos dados;

– cálculo da média aritmética dos dados amostrais;

– cálculo do desvio padrão;

– identificação dos valores extremos: maior e menor;

– determinação da diferença d entre cada valor extremo e o desvio padrão;

– cálculo da razão $r = \frac{|d|}{s}$;

– determinação do valor tabelado para o tamanho da amostra em estudo;

– se a razão for menor que o valor tabelado, aceitar o ponto extremo; senão eliminá-lo da amostra;

– eliminado o dado espúrio, refazer a análise com os dados remanescentes até que não haja mais dados espúrios.

O critério de Chauvenet estabelece que um dado x_i deve ser rechaçado caso o valor de r for maior que o valor R_c dado pela tabela abaixo em função do número de dados.

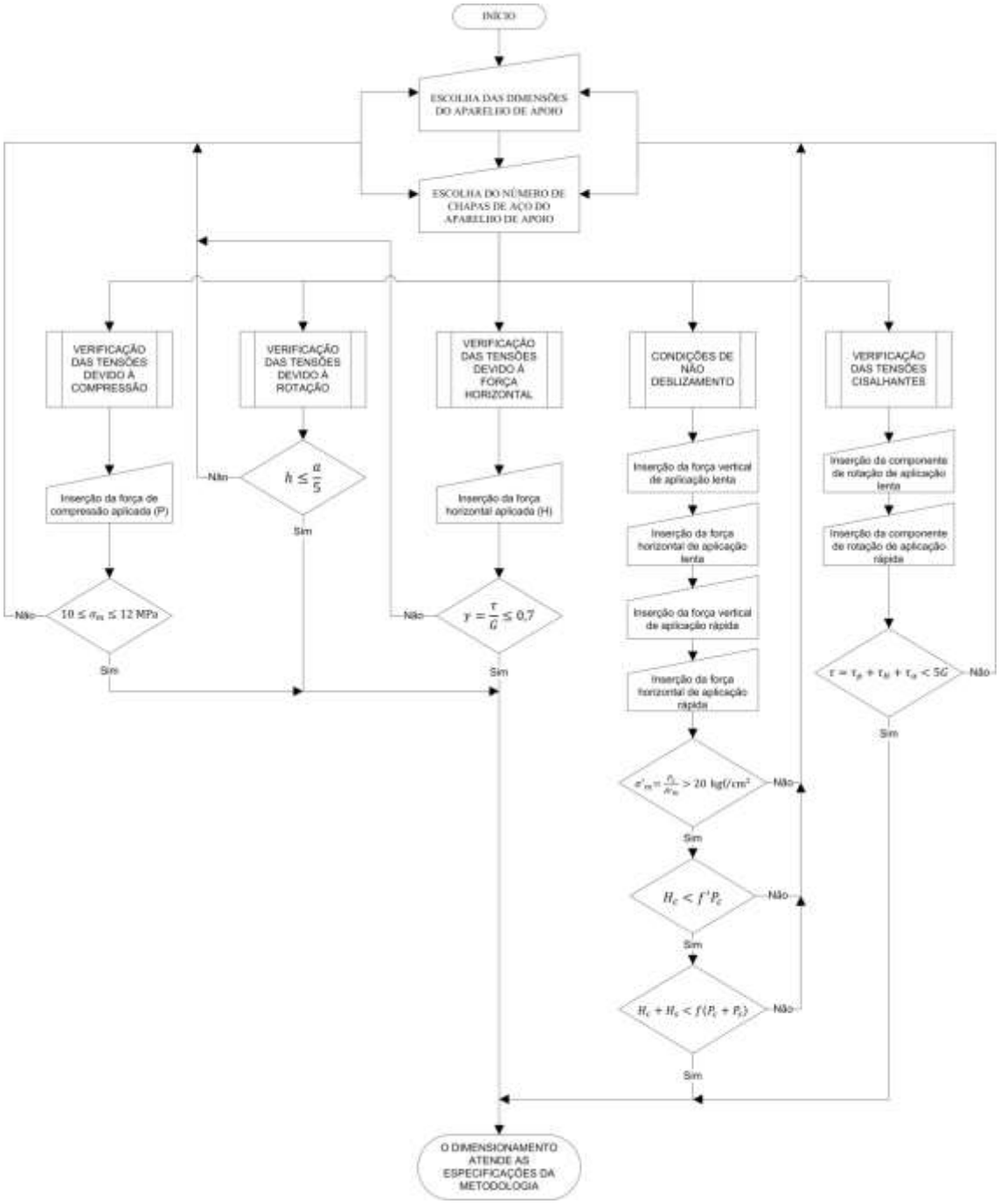
Tabela B.1: Valores típicos de Rc (P=0,005).

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
Rc	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

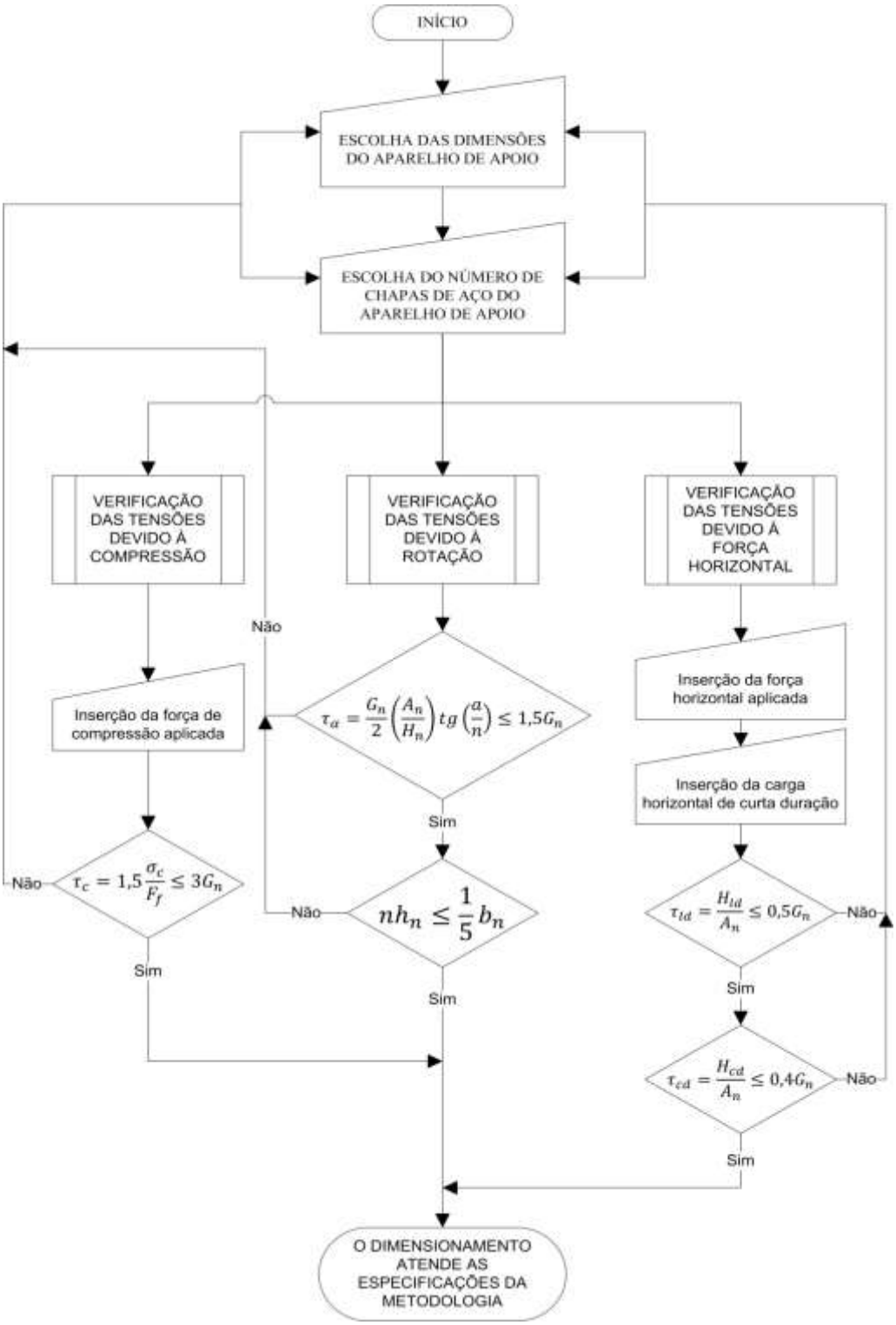
Fonte: OLIVEIRA ,2008.

APÊNDICE A

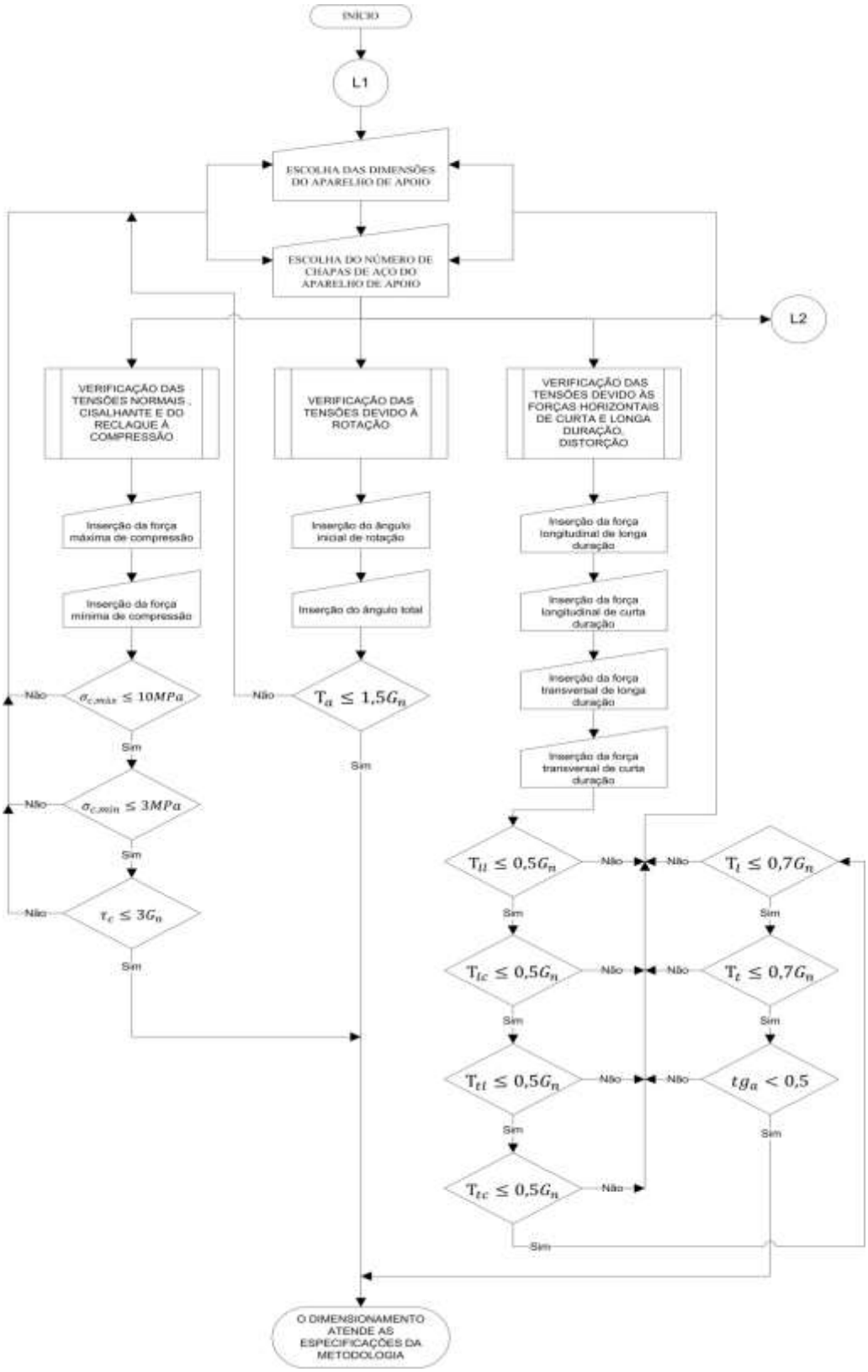
A.1 FLUXOGRAMA DE MASON (1977)

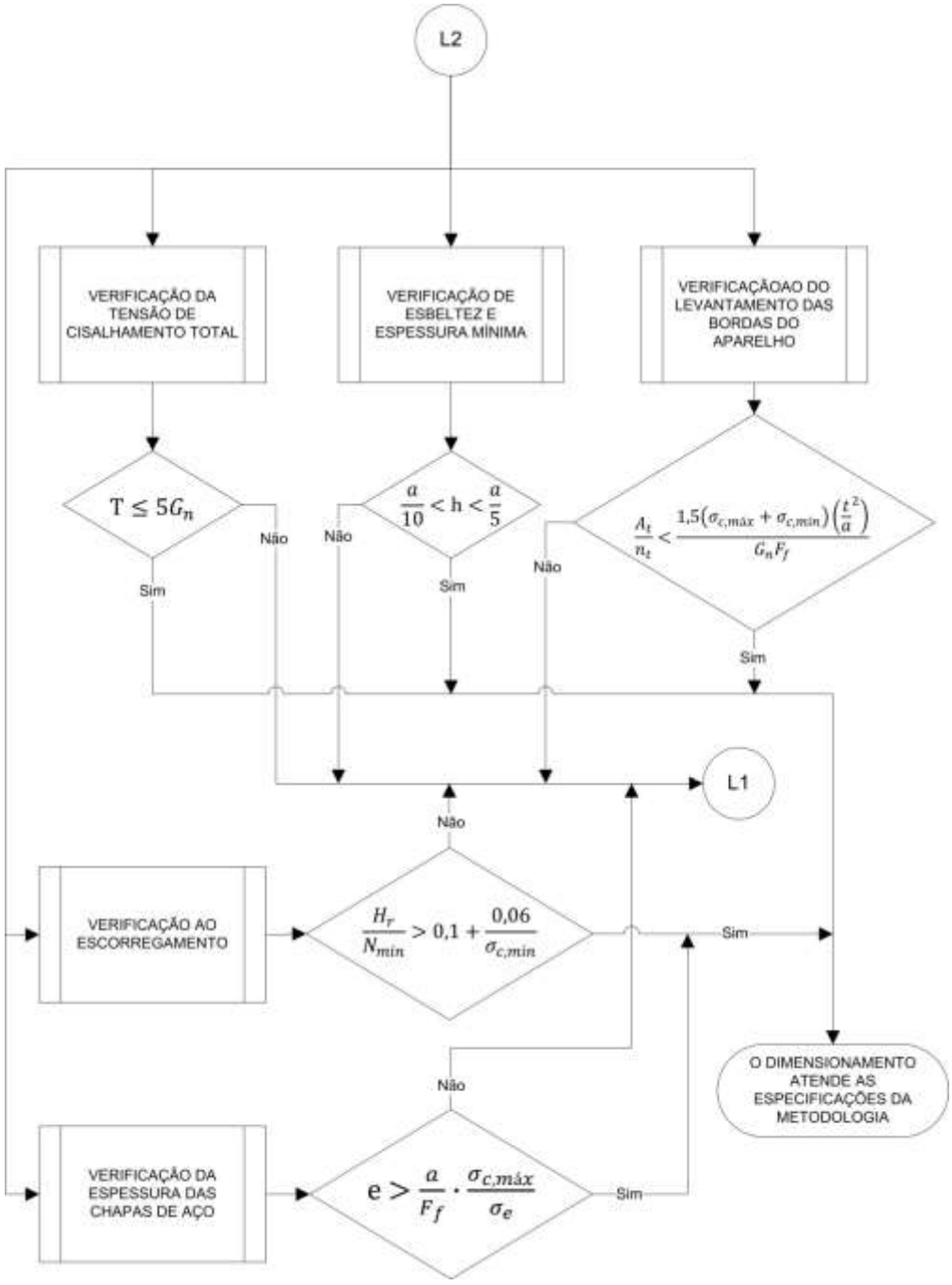
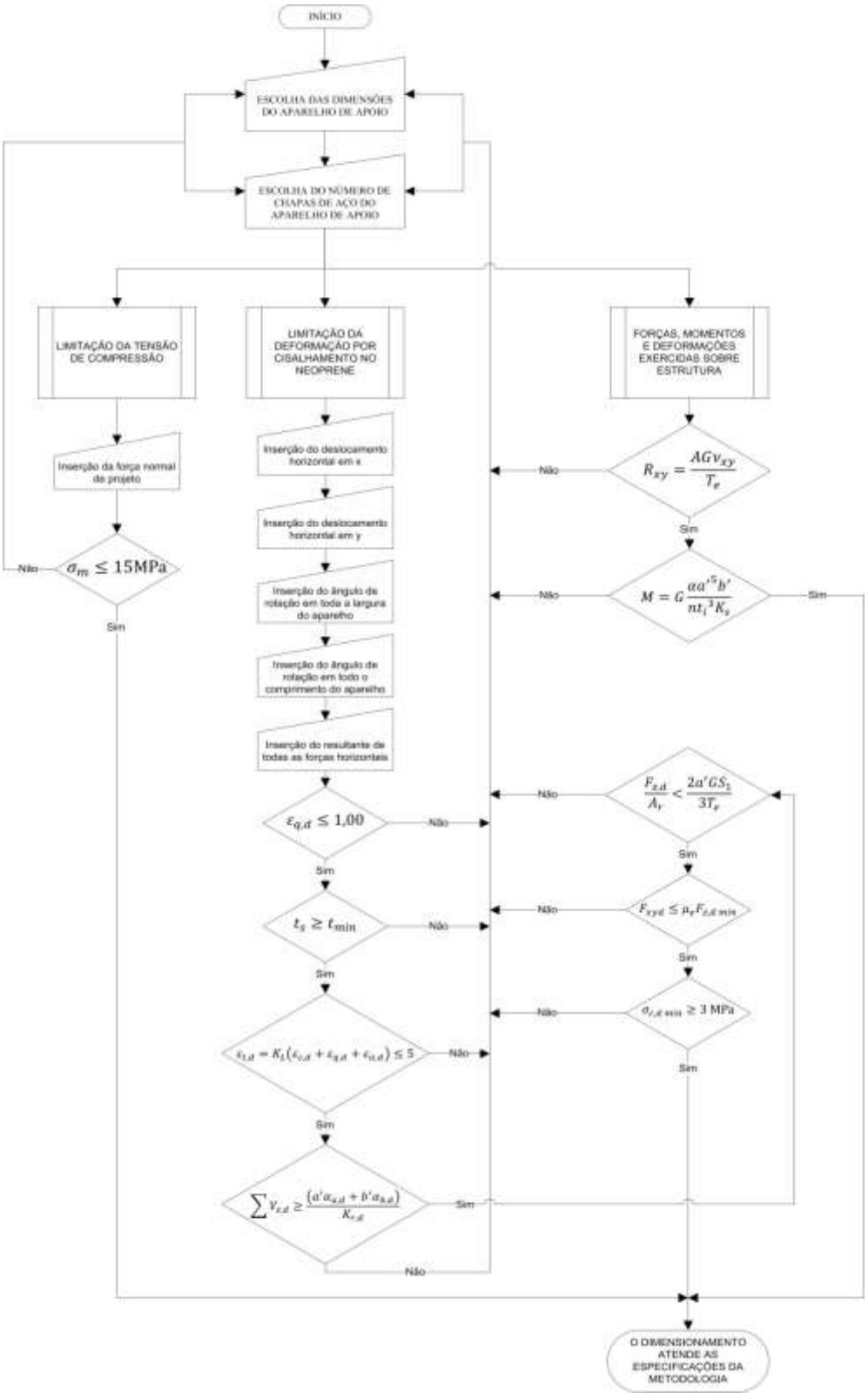


A.2 FLUXOGRAMA DE PFEIL (1983)



A.3 FLUXOGRAMA DE MARCHETTI (2008)




L2
VERIFICAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TOTAL
VERIFICAÇÃO DE ESBELTEZ E ESPESSURA MÍNIMA
VERIFICAÇÃOAO DO LEVANTAMENTO DAS BORDAS DO APARELHO
$T \leq 5G_n$
$\frac{a}{10} < h < \frac{a}{5}$
$\frac{A_t}{n_t} < \frac{1{,}5(\sigma_{c,máx} + \sigma_{c,min})\left(\frac{t^2}{a}\right)}{G_n F_f}$
Não
Não
Não
Sim
Sim
Sim
L1
Não
VERIFICAÇÃO AO ESCORREGAMENTO
$\frac{H_r}{N_{min}} > 0{,}1 + \frac{0{,}06}{\sigma_{c,min}}$
Sim
O DIMENSIONAMENTO ATENDE AS ESPECIFICAÇÕES DA METODOLOGIA
Não
VERIFICAÇÃO DA ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO
$e > \frac{a}{F_f} \cdot \frac{\sigma_{c,máx}}{\sigma_e}$
Sim

A.4 FLUXOGRAMA DA EN 1337-3:2005