

RICARDO BARBOZA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E FUNCIONALIDADE DOS APARELHOS DE
APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI APÓS 40 ANOS EM SERVIÇO**

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.

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

Niterói
2016

RICARDO BARBOZA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTENCIA E FUNCIONALIDADE DOS APARELHOS DE
APOIO DA PONTE RIO-NITERÓI APÓS 40 ANOS EM SERVIÇO**

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.

Aprovada em 10/06/2016.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro, D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Carlos Henrique Paiva Siqueira, D. Sc.
Faculdade Integrada Metropolitana de Campinas

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho, D. Sc.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Niterói
2016

A Deus.

Ao meu pai José (*in memoriam*) à minha mãe Olga (*in memoriam*).

À minha esposa Cintia, companheira de vida.

Aos meus filhos Luana e Theo.

À minha irmã Simone e meu sobrinho João Pedro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço de forma grandiosa aos meus pais, José (*in memoriam*) e Olga (*in memoriam*), que me deram a base sólida da família para que eu pudesse galgar com tranquilidade e perseverança a longa estrada da vida.

À minha esposa, Cintia, que de forma única me deu força e apoio, estando sempre ao meu lado.

Quero agradecer também aos meus filhos Luana e Theo que, embora não tivessem conhecimento disto, mas iluminaram de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos.

À minha irmã Simone e meu sobrinho João Pedro, pelo apoio de sempre.

Ao Professor Emil de Souza Sánchez Filho, por ter acreditado em minha proposta, por sua orientação com todo seu conhecimento, apoio, paciência e dedicação.

Ao grande amigo e irmão de vida Nilton Velihovetchi, que me incentivou e apoiou de forma singular, nesta empreitada.

Aos meus amigos e colegas de turma, em especial ao Manuel Fernando e a Laís Serrão pelo companheirismo.

A todos os professores do curso pela dedicação.

Aos funcionários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela acolhida e atenção.

À CCR Ponte, empresa da qual tive o privilégio e a honra de participar desde sua criação até seu encerramento, que disponibilizou todo seu acervo técnico para uso nesta pesquisa.

Ao amigo Carlos Henrique Paiva Siqueira, que juntamente comigo, participou e coordenou de todos os ensaios analisados neste trabalho e disponibilizou todo seu acervo técnico e conhecimento para ajudar no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Engenheiro Gustavo Vieira de Mello e a Neoprex pela fabricação e cessão de aparelho de apoio novo para a realização dos ensaios

E, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste estudo.

RESUMO

Este estudo apresenta a análise do programa experimental, composto de monitoração amostral e de ensaios de laboratório, que levaram a um melhor embasamento da decisão de substituição de aparelhos de apoio na ponte Rio-Niterói. Os resultados obtidos nas campanhas de monitoração dos aparelhos de apoio até 2014 mostraram que as patologias detectadas na primeira campanha realizada no ano de 2000/2001 praticamente permaneceram sem alteração. Todos os corpos de prova ensaiados em laboratório e em verdadeira grandeza não apresentaram qualquer alteração no seu quadro original no ensaio de compressão normal até 15 MPa, que é a tensão de projeto. No intervalo de 15 MPa e 30 MPa não foi identificado o surgimento de novas manifestações patológicas, mas, simplesmente, o agravamento da situação original. Em patamares superiores a 30 MPa, foram identificadas novas patologias em alguns aparelhos. Assim, os resultados da monitoração e dos ensaios indicam ser desnecessária a substituição de aparelhos de apoio por sua condição visual desfavorável. Evita-se, dessa forma, expor a estrutura aos riscos de uma operação de substituição desses aparelhos de apoio, bem como grande impacto no tráfego da via e a realização de elevado investimento.

Palavras-Chaves: Elastômeros, Aparelhos de Apoio, Neoprene.

ABSTRACT

This study presents an analysis of an experimental program composed of a prolonged sample monitoring and laboratory trials that led to a better substantiation for the decision to replace bearings in a full size bridge, such as the Rio-Niterói bridge, where the risks involved in bearings replacement operation are much higher than keeping in operation bearings with superficial defects that still have, however, reserve of enough resistance to continue in service without impair the longevity of the bridge. The results obtained on bearings monitoring campaigns showed that the defects detected on the first campaign held in 2000/2001 virtually remained without changes until the 2014 campaign. The results of the laboratory trials and in real size showed, on the normal compression trials, that the bearings of Rio-Niterói bridge, even with some visible defects, still have enough resistance to continue in service without damage the adjacent structures. All samples tested in laboratory and in real size did not present any change in their original condition on the normal compression up to 15 MPa, which is the tension of the project. At the loading interval between 15 MPa and 30 MPa, it was not identified the appearance of new defects, but simply the aggravation of the original situation. In levels above 30 MPa, it was identified new defects in some bearings and some of them kept this condition in other higher loading levels. Thus, the monitoring and trials results indicate it is not necessary to replace the bearings only by its unfavorable visual condition, which avoids exposing the structure to risks of a replacement operation of these bearings. It also avoids the big impact on the traffic of the road, as well as the implementation of high investment.

Key Words: Elastomers, Bearings, Neoprene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.4.1 – Esquema da metodologia empregada nesta dissertação.....	15
Figura 2.1 – Patente de invenção de Eugène Freyssinet	17
Figura 2.2 – Vista panorâmica da Ponte Rio-Niterói.	19
Figura 2.3 – Localização da BR101.	20
Figura 2.4 – Execução de fundação tipo “Bade-Wirth”.	21
Figura 2.5 - Vista dos caixões metálicos.	21
Figura 2.6 – Vista do acesso Rio de Janeiro formado com longarinas pré-moldadas tipo “barriga de peixe”.	22
Figura 3.1 – Encurtamento longitudinal do aparelho de apoio fretado.	24
Figura 3.2 – Rotação do aparelho de apoio fretado.	25
Figura 3.3 – Distorção do aparelho de apoio fretado.	25
Figura 3.4 – Policloroprene.	27
Figura 3.5 – Negro de fumo.	27
Figura 3.6 – Mistura inicial.	28
Figura 3.7 – Mistura inicial em repouso.....	29
Figura 3.8 – Mistura acelerada em fase de laminação.....	29
Figura 3.9 – Corte das chapas de aço em guilhotina.	30
Figura 3.10 – Mistura final laminada e pesada para montagem do aparelho de apoio.	31
Figura 3.11 – Montagem do sanduíche borracha/chapa de aço.....	32
Figura 3.12 – Colocação do sanduíche borracha/chapa de aço nos moldes metálicos.....	32
Figura 3.13 – Prensagem e vulcanização.....	33
Figura 3.14 – Aparelho repousando em estufa.	33
Figura 3.15 – Aparelho pronto e embalado para entrega do cliente.....	34
Figura 3.16 – Ensaio de dureza shore A.	36
Figura 3.17 – Ensaio de tensão e alongamento de ruptura a tração.....	36
Figura 3.18 – Ensaio de deformação permanente a compressão.	37
Figura 3.19 – Ensaio de compressão simples.	37
Figura 3.20 – Ensaio de distorção – resistência ligação elastômero - aço.....	38
Figura 3.21 – Ensaio de ruptura a tração do aço das chapas fretantes.	39
Figura 5.1 – Deformação excessiva da metade do apoio carregada, com falta de condição de apoio da outra metade.....	46
Figura 5.2 – Apoio parcial da almofada de elastômero deixando livre metade da superfície do apoio, sobrecarregando a outra parte.	47
Figura 5.3 – Aparelho de apoio com rompimento da camada de recobrimento lateral, porém, sem trazer vínculos negativos às estruturas adjacentes.	47
Figura 5.4 – Aparelhos de apoio com fretagem exposta, porém, sem comprometimento das estruturas adjacentes.	48
Figura 6.1 – Esquemático de localização na ponte Rio-Niterói dos apoios ensaiados.....	49
Figura 6.2 – Retirada de aparelho de apoio do pilar 335 rampa R2.	52
Figura 6.3 – Vista geral da obra de substituição dos aparelhos de apoio do pilar 136 da ponte Rio-Niterói.....	52
Figura 6.4 – Aparato de reação (prensa).....	56
Figura 6.5 – Extensômetros mecânicos.	57
Figura 6.6 – Marcação com giz das anomalias principais nas faces laterais dos apoios.....	58
Figura 6.7 – Aparelho de apoio dentro do aparato de ensaio, com tensão de 40 MPa.....	60
Figura 6.8 – <i>Croquis</i> do corpo de prova 1 – R2.	61
Figura 6.9 – Corpo de prova 1 – R2, antes do teste de carga – unid: cm.	62
Figura 6.10 – <i>Croquis</i> do corpo de prova 2 – R2.	63

Figura 6.11 – Corpo de prova 2 – R2, antes do teste de carga – unid: cm.	64
Figura 6.12 – Rasgamentos na face C após o teste de carga – unid: cm.	65
Figura 6.13 – <i>Croquis</i> do corpo de prova do elevado da Perimetral.	65
Figura 6.14 – Corpo de prova do elevado da perimetral, antes do teste de carga.	66
Figura 6.15 – <i>Croquis</i> do corpo de prova aparelho novo.	67
Figura 6.16 – Corpo de prova apoio novo, antes do teste de carga.	67
Figura 6.17 – Apoio novo após o teste de cargas.	68
Figura 6.18 – <i>Croquis</i> corpo de prova 1 – P136.....	69
Figura 6.19 – Corpo de prova 1 – P136, antes do teste de carga.....	69
Figura 6.20 – Corpo de prova 1 – P136, depois do teste de carga.	70
Figura 6.21 – <i>Croquis</i> corpo de prova 2 – P136.....	71
Figura 6.22 – Corpo de prova 2 – P136, antes do teste de carga (face A).	71
Figura 6.23 – Corpo de prova 2 – P136, antes do teste de carga (face B).....	72
Figura 6.24 – Corpo de prova 2 – P136 rompimento de chapa fretante e aparelho deformado.	73
Figura 7.1 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova Perimetral.	77
Figura 7.2 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova aparelho novo.	78
Figura 7.3 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 1 – R2.	79
Figura 7.4 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 2 – R2.	79
Figura 7.5 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 1 P136.....	80
Figura 7.6 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 2 P136.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Espessura da camada elementar vs. espessura mínima da chapa de aço	38
Tabela 6.1 – Resultado dos ensaios do corpo de prova do elevado Perimetral.	53
Tabela 6.2 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 1 – R2.	54
Tabela 6.3 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 2 – R2.	54
Tabela 6.4 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 1 – P136.	54
Tabela 6.5 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 2 – P136.	55
Tabela 6.6 – Sequência de carregamento para as almofadas de 700 mm x 700 mm (P136).	58
Tabela 6.7 – Sequência de carregamento para as almofadas de 700 mm x 230 mm (P335 R2).	59
Tabela 6.8 – Sequência de carregamento para almofadas de 480 mm X 250 mm (Perimetral).	59
Tabela 6.9 – Medidas do corpo de prova 1 – R2.	61
Tabela 6.10 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 1 – R2.	62
Tabela 6.11 – Medidas do corpo de prova 2 – R2.	63
Tabela 6.12 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 2 – R2.	64
Tabela 6.13 – Medidas do corpo de prova do elevado da perimetral.	65
Tabela 6.14 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova elevado da Perimetral.	66
Tabela 6.15 – Medidas do corpo de prova aparelho novo.	67
Tabela 6.16 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova aparelho novo. ...	68
Tabela 6.17 – Medidas do corpo de prova 1 – P136.	69
Tabela 6.18 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 1 – P136.	70
Tabela 6.19 – Medidas do corpo de prova 2 – P136.	71
Tabela 6.20 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 2 – P136.	72
Tabela 7.1 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de verdadeira grandeza.	81
Tabela 7.2 – Módulo de elasticidade: ensaios em verdadeira grandeza.	82
Tabela 8.1 – Comparativo da deformação (entre 5 e 15 MPa) x altura média dos corpos de prova.	84

LISTA DE SÍMBOLOS

$tg\gamma$	Coeficiente de distorção
α	Coeficiente de rotação
V	Força vertical
P	Carga
N	Força normal
σ	Tensão
M	Momento associado à rotação α
T_H	Espessura inicial
H	Força horizontal
h_m	Espessura média da camada elementar
h_p	Espessura de projeto da camada elementar
n	Quantidade de camadas elementares
h_i	Espessura da camada elementar
G	Módulo de deformação transversal
T_N	Tensão normal
T_H	Tensão tangencial
T_α	Tensão de rotação
σ_m	Tensão média de compressão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	14
1.3 METODOLOGIA.....	15
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2 HISTÓRICO	16
2.1 HISTÓRICO DOS APARELHOS DE APOIO DE ELASTÔMERO	16
2.2 HISTÓRICO DA PONTE RIO NITERÓI	18
3 FUNÇÃO, PRODUÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE	24
3.1 FUNÇÃO.....	24
3.2 PRODUÇÃO	26
3.3 CONTROLE DE QUALIDADE	34
4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....	43
4.1 DIMENSIONAMENTO PELA S.E.T.R.A.	43
5 APARÊNCIA SUPERFICIAL VS. FUNCIONALIDADE VS. RESERVAS DE RESISTÊNCIA	45
6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
6.1 NOTAS INICIAIS	49
6.2 MONITORAÇÃO	50
6.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	51
6.3.1 ENSAIOS DE ACORDO COM A NBR9783/1987	53
6.3.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM VERDADEIRA GRANDEZA.....	55
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
7.1 RESULTADOS DA MONITORAÇÃO	75
7.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS	75
7.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM VERDADEIRA GRANDEZA	76
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
8.1 CONCLUSÕES	83
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
REFERÊNCIAS	86

INTRODUÇÃO

Elastômero é um material de uso habitual na construção civil, onde sua aplicação se dá em juntas de dilatação e em aparelhos de apoio, sendo esse simples ou fretado. Nesse trabalho é abordado o comportamento dos aparelhos de apoio em elastômero fretado.

Um aparelho de apoio atualmente é dimensionado, segundo as recomendações do Eurocode, para uma tensão de compressão de 10 MPa. Anteriormente, considerava-se um valor máximo de 15 MPa, como no caso da ponte Rio-Niterói. Ressalta-se que não há norma brasileira que trate do dimensionamento e projeto de aparelhos de apoio de elastômero fretado, o que leva os projetistas a utilizarem normas internacionais para nortear seus projetos.

A NBR9783/1987, que institui as regras para o recebimento dos aparelhos de apoio em elastômero fretado, exige que o aparelho de apoio suporte, em ensaios, uma solicitação de compressão de 60 MPa, e uma distorção máxima dada por $tg\gamma = 2$. Essa distorção horizontal corresponde a duas vezes a altura do aparelho, sem que, ocorra o rasgamento do elastômero ou o descolamento das chapas fretantes. Ambas situações são impossíveis de ocorrer em condições normais de serviço. Como as solicitações exigidas nos ensaios da NBR9783/1987 são extremamente superiores às solicitações de projeto, utiliza-se essa enorme reserva de resistência existente nos aparelhos de apoio, mesmo que em inspeções visuais estejam presentes algumas anomalias superficiais.

No Brasil a cultura de vistoria de Obras de Arte Especiais (OAE) em periodicidades curtas (anuais) não é uma realidade, o que leva os gestores dessas obras a tomada de algumas decisões precipitadas, como é o caso da substituição de aparelhos de apoio de elastômero fretado, unicamente devido a sua aparência superficial. A maioria das OAE's estão sob a responsabilidade dos governos federal, estadual e municipal, que não mantêm um programa de vistorias adequado e nem têm efetivo suficiente para tal. Quando numa vistoria é detectada alguma anomalia nas faces expostas de um aparelho de apoio, recomenda-se a sua substituição imediata, mesmo que as estruturas suportes e suportadas adjacentes não apresentassem qualquer patologia oriunda do não funcionamento do aparelho de apoio pois, não se sabe quando será realizada a próxima vistoria da obra, bem como não se tem a possibilidade de manter-se uma monitoração especial do referido aparelho. Assim essa premissa passou a ser adotada como regra.

Com o surgimento das concessões de rodovias em meados de 1995, a iniciativa privada passou a ser responsável por uma grande quantidade de Obras de Arte Especiais, iniciando um tratamento diferenciado às obras sob sua responsabilidade. Dentre essas obras, está a Ponte Rio-Niterói, que será objeto principal desta dissertação.

Em contato realizado em outubro de 2013 com o Departamento de Transporte do estado do Texas, nos Estados Unidos da América, que é responsável pela gestão de mais de 700.000 aparelhos de apoio, foi questionado qual o procedimento adotado para a determinação da necessidade de substituição de aparelhos de apoio. Foi que todas as pontes são inspecionadas a cada dois anos e os aparelhos em serviço nessas pontes somente são substituídos quando esses estão comprometendo as estruturas adjacentes, e não pela sua aparência superficial, tampouco pela idade. Segundo o informado, existem somente no Texas aparelhos de apoio que estão em serviço a mais de 60 anos e sem previsão de troca, pois acredita-se que um aparelho de apoio deve durar tanto quanto a obra.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho visa mostrar que as anomalias detectadas em aparelhos de apoio, por meio de simples inspeções visuais, não devem ser o único indicativo para a substituição dos mesmos. Devem ser consideradas a evolução dessas patologias, os vínculos estruturais negativos às estruturas adjacentes e a ambiência onde o aparelho encontra-se instalado.

1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A relevância deste estudo faz-se face ao o risco a que as estruturas são expostas quando uma operação de substituição de aparelhos de apoio é realizada. Ao grande custo financeiro gerado nesse tipo de obra.

A possível utilização da grande reserva de resistência teórica dos aparelhos, uma vez que esses são dimensionados com folga de reserva no que diz respeito a resistência quando projetados.

Ainda deve-se considerar o custo social e ecológico de interrupção de tráfego em uma rodovia com elevado tráfego, como é o caso da ponte Rio-Niterói.

1.3 METODOLOGIA

Para a elaboração desta dissertação, além da utilização das normas técnicas e literaturas pertinentes, foram adotadas as seguintes metodologias para os trabalhos de campo e laboratório: acompanhamento do comportamento de um grupo de 88 aparelhos de apoio em elastômero fretado, da ponte Rio-Niterói, que representam as diversas ambiências e sistemas estruturais existentes ao longo da OAE, mediante monitoração de inspeções visuais e dimensionais anuais simplificadas e a cada cinco anos detalhadas;

Realização de ensaios, de acordo com a NBR9783/1987, em aparelhos de apoio com 40 anos de serviço, que apresentaram durante as inspeções visuais algumas anomalias;

Realização de ensaios especiais de compressão em verdadeira grandeza, com os aparelhos retirados da estrutura.

A figura 1.4.1 mostra a sequência das etapas executadas nessa pesquisa.

A influência do meio ambiente também foi levada em consideração neste estudo e para tal, foram utilizados nos ensaios aparelhos de apoio expostos a diferentes ambiências e o resultado do impacto dessas exposições também serão comentados.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

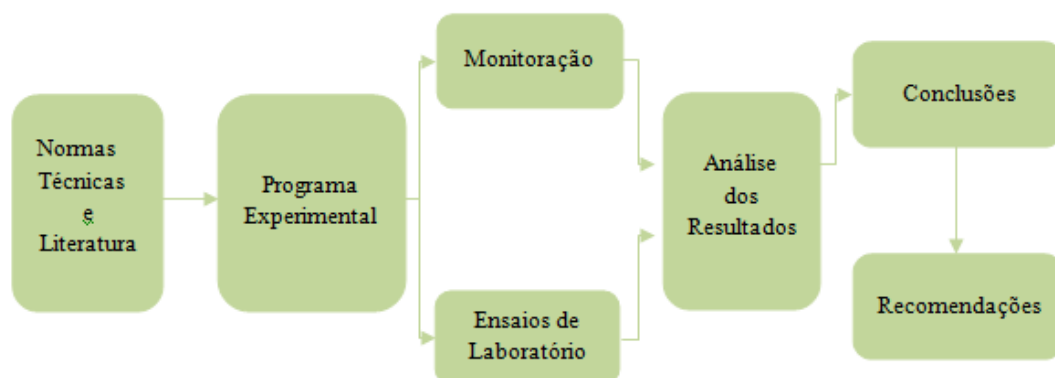


Figura 1.4.1 – Esquema da metodologia empregada nesta dissertação.

2 HISTÓRICO

2.1 HISTÓRICO DOS APARELHOS DE APOIO DE ELASTÔMERO

A necessidade de aparelhos de apoio surgiu em meados do século XIX. Até então, os vãos eram pequenos e as estruturas de alvenaria de pedra, pelas grandes dimensões, inclusive dos apoios, não impunham, na maior parte dos casos, a necessidade de cuidados especiais. Com o início do emprego de estruturas de aço vãos cada vez maiores foram projetados, e deformações e deslocamentos mais significativos foram sendo alcançados, tornando-se necessários os aparelhos de apoio.

Os aparelhos de apoio são utilizados para estabelecer a ligação entre a superestrutura e a mesoestrutura, recebendo e transmitindo, de forma adequada, as solicitações advindas da superestrutura.

Para permitir deslocamentos e rotações, adotou-se aparelhos com roletes metálicos apoiados sobre placas metálicas deslizantes. Nas primeiras décadas do século XX, com o desenvolvimento das pontes de concreto, os aparelhos de apoio metálicos se mantiveram como solução. Entretanto, além do alto custo, exigiam constante manutenção. Surgiram então os pêndulos (apoios móveis) e articulações de concreto (apoios fixos) como solução para os apoios das pontes em concreto. Em estruturas de menor responsabilidade foram empregadas placas de chumbo e até argamassas ricas em cimento.

Nos Estados Unidos, em 1930, a Du Pont desenvolveu o policloroprene, um elastômero sintético com propriedades elásticas semelhantes às da borracha natural, mas acrescida de elevada resistência ao envelhecimento. A indústria da construção logo se aproveitou dessas excelentes propriedades. Os primeiros ensaios mostraram que o elastômero dos aparelhos tendia a escoar lateralmente a partir de determinada tensão à compressão, que variava diretamente com a dureza do elastômero e com a geometria do aparelho.

Algumas tentativas com placas de elastômeros entremeadas com redes metálicas que penetravam no elastômero foram realizadas por volta de 1948, na França, com resultados insatisfatórios (Figura 2.1). Apesar das redes metálicas penetrarem na borracha e impedirem o escoamento lateral, os rasgos no elastômero não permitiam tensões de compressão significativamente maiores. Mas, obtinha-se, à custa de um confinamento transversal, uma maior resistência para a massa do elastômero, sem prejudicar a deformabilidade horizontal. Posteriormente uma nova tentativa com placas de elastômero vulcanizadas com redes

metálicas também não foi bem sucedida. Em 1957, na Alemanha, foram executadas as primeiras pontes apoiadas aparelhos de apoio de elastômeros com esse processo de fabricação. Entretanto, esse tipo de apoio apresentava, para maiores cargas, rasgos no elastômero, causados pela concentração de tensões junto aos arames da rede metálica. Ficava evidente a necessidade de maior área de aço para diminuir as tensões de contato aço-elastômero. Surgiram, então, as chapas de aço em substituição as redes.

Assim, resultou um produto combinado de elastômero e aço, onde ambos os materiais trabalhavam juntos, isto é, o aço tracionado confinava o elastômero por meio da excelente capacidade de aderência obtida pela vulcanização conjunta.



Figura 2.1 – Patente de invenção de Eugène Freyssinet

Fonte: catalogo Freyssinet

Na década de 1960, na França, utilizou-se um processo de fabricação no qual os aparelhos eram fabricados em placas de uma única camada e elastômero vulcanizado entre duas chapas de aço. Dessas placas-mãe recortavam-se, nas dimensões desejadas, as placas componentes que eram empilhadas umas sobre as outras, formando o aparelho completo. As chapas de aço eram tratadas com pintura especial para proteção contra oxidação, processo que já não é mais permitido.

No processo mais empregado atualmente, os aparelhos de apoio são moldados um a um, com placas de aço alternadas com camadas de elastômero e vulcanizadas em conjunto, nas dimensões finais do projeto. O aparelho já é retirado dos moldes com as camadas de

recobrimento lateral e superficial incorporadas. Desse modo, as chapas de aço dispensam tratamento posterior, pois não ficam aparentes em contato com o ar. A AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) proibiu nos Estados Unidos o uso de elastômeros naturais em aparelhos de apoio no início de 1968. No Brasil, tem-se usado, quase que exclusivamente, elastômeros sintéticos.

No Brasil, na época das grandes obras da década de 1970 e início da década de 1980, alguns aparelhos fabricados apresentavam diversos problemas que envolviam significativas variações das propriedades do elastômero e até das chapas de aço, tais como: variações dimensionais, falta de paralelismo nas chapas de aço, descolamento do elastômero das chapas de aço, descolamento das chapas de teflon das chapas de aço e coeficientes de atrito aço inox-teflon muito superiores aos especificados. Esses fatores causaram atraso de obras pela rejeição de diversos lotes quando os resultados dos ensaios eram confrontados com as exigências de normas estrangeiras, daí a necessidade de troca de diversos aparelhos de apoio.

No início de 1980 a ABNT criou uma comissão para elaborar a Norma Brasileira de Recepção de Aparelhos de Apoio. Essa norma, NBR9783/1987, entrou em vigor a partir de 1987 e, desde então, tem sido uma das principais causas da melhoria de qualidade oferecida pelos fabricantes de aparelhos de apoio. No mesmo ano de 1987 entrou em vigor a NBR7187/1987, que apresenta em seu item 12.9.3 a exigência de previsão de dispositivos para troca dos aparelhos de apoio nas pontes.

Conforme a Eurocode EN 1337, parte 1, item 4, princípios dos sistemas estruturais, “aparelhos e estruturas devem ser projetados de maneira a permitir que os aparelhos **cumpram sua função durante toda a vida útil da estrutura**”, ou seja, o projeto de qualquer tipo de aparelho, quer seja metálico, aparelhos de apoio confinados em caixas “potbearing” ou de elastômero, deve prever eventual troca.

2.2 HISTÓRICO DA PONTE RIO NITERÓI

Remonta à época do Império Brasileiro o sonho da ligação das cidades do Rio de Janeiro e Niterói, quer fosse por meio de um túnel submerso ou por meio de uma ponte sobre as águas da Baía de Guanabara. No final da década de 1960 iniciou-se a construção da Ponte Presidente Costa e Silva, conhecida como Ponte Rio-Niterói (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Vista panorâmica da Ponte Rio-Niterói.

Fonte: CCR Ponte

Muitas tentativas de estabelecer a ligação entre as cidades do Rio de Janeiro e Niterói foram realizadas, incluindo-se, dentre essas, a autorização concedida pelo Imperador Dom Pedro II ao engenheiro Inglês Hamilton Lindsay para a construção e exploração por 50 anos de um túnel ferroviário sob as águas da Baía de Guanabara, porém, nenhuma obteve êxito. Até que, após cinco anos de construção, no dia 4 de Março de 1974, portanto, com mais de 40 anos de serviço, foi inaugurada e passou a ser, e ainda é, a maior OAE do hemisfério sul, com seus 13,2 km de extensão. A ponte Rio-Niterói é parte integrante da BR101, rodovia que liga longitudinalmente o Brasil desde a cidade de Touros no Rio Grande do Norte até Osório no Rio Grande do Sul, conforme mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Localização da BR101.

Segundo PFEIL (1975), mesmo tendo sido projetadas estacas tipo “Franki” para todas as fundações dos acessos em terra, na primeira fase da construção, a empreiteira executora utilizou estacas metálicas no trecho do elevado sobre a Avenida Rio de Janeiro. As fundações do trecho sobre o mar são constituídas de diversos tipos, sendo: camisas metálicas perdidas (utilizadas na primeira fase da obra), tubulões a ar comprimido, tubulões mistos com estacas metálicas e tubulões tipo “Bade–Wirth”. No trecho dos vãos centrais as fundações são compostas exclusivamente por tubulões tipo “Bade–Wirth”. A Figura 2.4, mostra a plataforma utilizada para a execução das fundações tipo “Bade-Wirth”.

A superestrutura dos acessos em terra é constituída por longarinas pré-moldadas e protendidas (tipo barriga de peixe) e por lajes moldadas no local. Um pequeno trecho do elevado sobre a Avenida Rio de Janeiro é constituído por transversinas pré-moldadas e protendidas e incorporadas à viga principal em caixa moldada no local. A superestrutura do trecho sobre o mar é composta de aduelas pré-moldadas de concreto, coladas com resina epóxi, protendidas longitudinalmente e transversalmente, o trecho do vão central é composto por caixões metálicos, com mesa superior ortotrópica, que constitui um recorde em viga reta contínua com um vão livre de 300 m. A Figura 2.5, mostra as vigas metálicas do vão central durante o processo de içamento para posicionamento em sua posição final de serviço.



Figura 2.4 – Execução de fundação tipo “Bade-Wirth”.

Fonte: CCR Ponte



Figura 2.5 - Vista dos caixões metálicos.

Fonte: CCR Ponte

As cidades do Rio de Janeiro e Niterói acessam a ponte por meio de rampas, sendo 18 rampas em Niterói das quais oito são viaduto e três rampas no Rio de Janeiro, todas compostas por viadutos. Uma nova ligação com a cidade do Rio de Janeiro deverá ser em breve concretizada por meio da ligação, em via elevada, da Ponte Rio-Niterói com a Linha

Vermelha. Esse novo trecho seguirá padrões similares aos adotados nos trechos de acesso em terra.

A Figura 2.6 ilustra a construção do acesso à ponte, na cidade do Rio de Janeiro, formado com longarinas pré-moldadas, tipo “barriga de peixe”.



Figura 2.6 – Vista do acesso Rio de Janeiro formado com longarinas pré-moldadas tipo “barriga de peixe”.

Fonte: CCR Ponte

O fluxo atual da Ponte Rio-Niterói é de aproximadamente 150.000 veículos por dia, em duas pistas de tráfego com 12,50 m de largura cada, sendo uma no sentido Rio e outra no sentido Niterói, e ambas atendidas por quatro faixas de rolamento, formando um tabuleiro com 25 m de largura.

Para ilustrar a grandeza desta obra, seguem alguns dados dimensionais, apresentados no livro comemorativo dos 10 anos de inauguração da ponte Rio-Niterói publicado pelo extinto DNER.

- custo atualizado de construção: US\$ 5,000,000,000;
- extensão total sem acessos: 13,3 km; com acessos 23 km;
- fluxo de tráfego: 150.000 veículos/dia;
- volume de concreto: 560.000 m³;

- resina Epóxi: 234.800 kg;
- aduelas pré-moldadas
 - 3000 unidades correntes;
 - 182 unidades de apoio;
 - 68 unidades de articulação.
- face exposta de concreto: 1.400.000 m²;
- vigas pré-moldadas: 1.142 unidades;
- fundações: 1.138 tubulões;
- protensão: 43.000 cabos protendidos, equivalentes a 140.000 km de fios;
- peso da estrutura metálica: 13.000 t;
- altura máxima sobre o nível do mar: 72 m;
- juntas de dilatação: 5.000 m;
- aparelhos de apoio em elastômero fretados: 3.200 unidades.

Com dimensões e condições estruturais diferenciadas, considerando-se a ambiência onde está exposta devida à sua localização e ao grande fluxo de veículos que trafegam diariamente na Ponte Rio-Niterói, sua manutenção, necessariamente, recorre a procedimentos, técnicas e equipamentos não usuais na manutenção de outras obras de artes especiais, tanto no Brasil quanto no mundo, em especial após sua concessão à iniciativa privada em 1995. Assim, a manutenção da Ponte Rio-Niterói, em diversos aspectos, ultrapassa, em muito, as prescrições das normas técnicas, garantindo assim a longevidade da estrutura.

3 FUNÇÃO, PRODUÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

3.1 FUNÇÃO

Segundo a NBR 9783/1987, aparelho de apoio de elastômero fretado é um produto constituído por uma ou mais camadas elementares de elastômeros, recobrimento e chapas de aço, revestido ou não com politetrafluoretileno (PTFE), cuja finalidade é a de estabelecer vinculação entre elementos estruturais distintos.

Os aparelhos de apoio de elastômero fretado podem ser projetados e fabricados para acomodar movimentos de translação em qualquer direção e movimentos rotacionais em torno de qualquer eixo por deformação elástica, de modo a transmitir corretamente, de um corpo estrutural para outro, as forças de projeto e acomodar os deslocamentos da estrutura. Usualmente tem-se utilizado nas camadas elementares e recobrimento o policloroprene, um elastômero sintético, com propriedades elásticas semelhantes às da borracha natural, porém mais resistente ao envelhecimento.

Um aparelho de apoio de elastômero fretado, quando bem projetado, bem produzido e, que em ensaios laboratoriais, atenda a todos os limites impostos na norma técnica e especialmente bem instalados, devem ter a mesma vida útil que a obra.

Quando submetidos às solicitações atuantes na estrutura um aparelho de apoio em elastômero fretado deforma-se como ilustrados nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3.

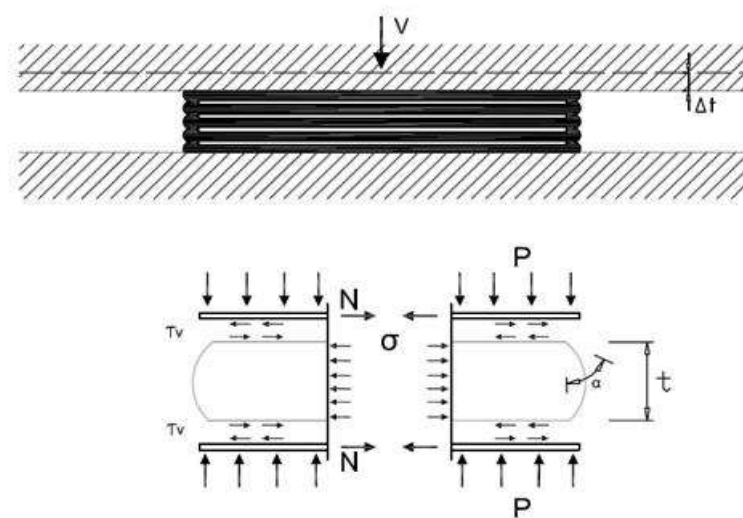


Figura 3.1 – Encurtamento longitudinal do aparelho de apoio fretado.

Fonte: catálogo Freyssinet

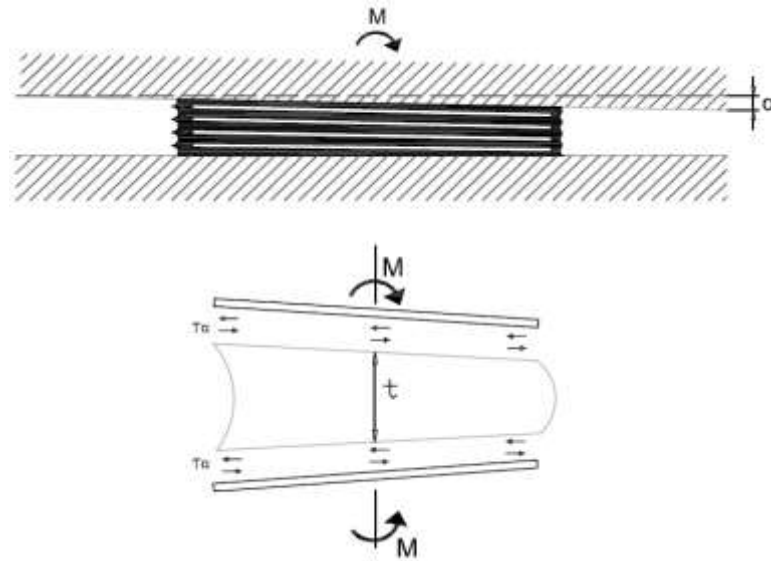


Figura 3.2 – Rotação do aparelho de apoio fretado.

Fonte: catálogo Freyssinet

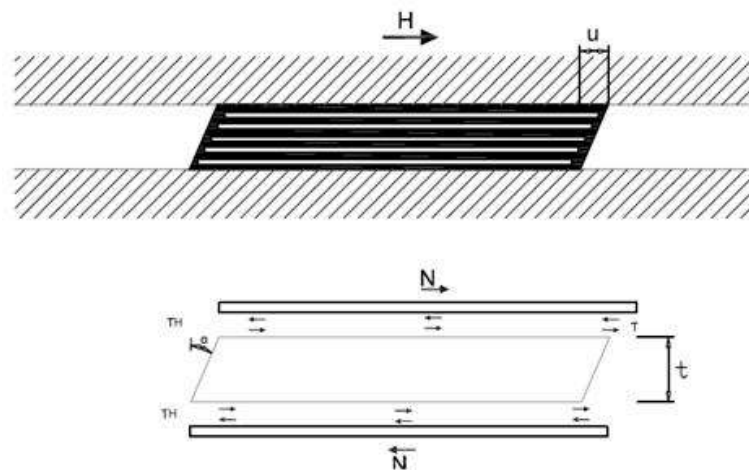


Figura 3.3 – Distorção do aparelho de apoio fretado.

Fonte: catálogo Freyssinet.

Os aparelhos de apoio em elastômero fretado são divididos em fixos e deslizantes. Os aparelhos fixos resistem às solicitações, somente valendo-se de suas propriedades elásticas, mantendo-se solidários à superestrutura.

Os apoios deslizantes permitem a superestrutura movimentar-se sobre sua superfície superior, revestida por uma placa de politetrafluoretileno (teflon) vulcanizada, evitando a transmissão de grandes solicitações à estrutura suporte. Complementando o conjunto de um apoio deslizante, é instalada na estrutura suportada uma grossa chapa de aço revestida por

uma fina lâmina de aço inox, superfície que fará contato com o politetrafluoretileno, gerando um coeficiente de atrito extremamente baixo, admitindo-se como praticamente inexistente.

3.2 PRODUÇÃO

A garantia de que o aparelho de apoio cumprirá fielmente a função para a qual foi projetado virá do cuidado na sua fabricação, que compreende o controle e acompanhamento de todas as matérias primas que farão parte da produção, quer seja do elastômero ou das chapas fretantes, e que permitam o rastreio durante ou após a fabricação.

O principal componente de um aparelho de apoio de elastômero fretado é o policloroprene (Figura 3.4) que responde por 60% a 65% do peso dos materiais que compõem a mistura do elastômero, segundo formulação de referência apresentada no relatório/catálogo da Elastotec. O Brasil não fabrica policloroprene, ficando os fabricantes de aparelhos de apoio brasileiros obrigados a importar esta matéria prima. Os principais fabricantes mundiais são a americana DuPont (Neoprene), a alemã Bayer (Baypren) e as japonesas Toyo Soda (Skyprene) e Denka (Denkachloroprene).

Outro importante componente de um aparelho de apoio de elastômero fretado é o negro de fumo (Figura 3.5), que corresponde por 10% a 15% do peso dos materiais que compõem a mistura do elastômero, também segundo formulação de referência apresentada no relatório/catálogo da Elastotec. Outros componentes, como os aceleradores enxofre, MBT (mercaptop-benzo-tiazol), os ativadores óxido de zinco, ácido esteárico, antiozonantes e antioxidantes, entram na composição da mistura do elastômero para garantir principalmente uma melhor resistência ao ozônio, oxigênio, calor, luz e intempéries. O resultado dessa mistura é uma massa de coloração negra que, quando vulcanizadas junto com as chapas de aço, formam os aparelhos de apoio.



Figura 3.4 – Policloroprene.

(Fonte: <http://tecnoadhesivos.com/images/policloropreno.jpg>).



Figura 3.5 – Negro de fumo.

(Fonte: <http://www.quimica.com.br/pquimica/produtos-quimicos-e-especialidades>).

A etapa inicial do processo de fabricação do elastômero é a pesagem dos materiais em balanças eletrônicas, devidamente aferidas, com precisão de 20 g para o policloroprene e o negro de fumo, 5 g para os ativadores e 2 g para os aceleradores.

Após a pesagem, parte dos materiais é colocada em misturadores abertos ou fechados (*banburys*), onde a mistura inicial ocorre com o policloroprene, negro de fumo e ativadores, indispensáveis a realização da vulcanização. O tempo de mistura varia entre 30 e 40 minutos em misturadores abertos e 15 e 20 minutos nos fechados. O produto resultante da mistura

inicial permanece em repouso por 24 horas sobre uma grande mesa (Figuras 3.6 e 3.7). Após esse prazo a mistura inicial volta para os misturadores onde recebe a agregação dos aceleradores, que têm a função de agilizar a reação interna dos componentes durante a vulcanização. Nessa nova fase de mistura os cilindros dos misturadores vão sendo ajustados, de tal forma que a massa adquira uma espessura final adequada à sua utilização nas camadas elementares dos aparelhos de apoio (Figura 3.8). Uma vez acelerada, a mistura está pronta para ser submetida ao processo de vulcanização.



Figura 3.6 – Mistura inicial.



Figura 3.7 – Mistura inicial em repouso.



Figura 3.8 – Mistura acelerada em fase de laminação.

O controle da mistura é feito durante todo o processo de fabricação, e é realizado por um reômetro computadorizado, que elabora as curvas reológicas do elastômero, sempre que uma amostra do material é inserida no equipamento. O reômetro é um aparelho que determina

o tempo e a temperatura em que o aparelho de apoio permanecerá na prensa para vulcanização.

Simultaneamente à produção do elastômero, uma guilhotina hidráulica de grandes dimensões corta as chapas de aço nas medidas exatas especificadas em projeto (Figura 3.9). Em sequência, essas chapas passam pelo processo de decapagem, mediante jateamento abrasivo com granalha de aço, com posterior pintura com primer antioxidante com adesivo especial, que auxiliará na aderência chapa/elastômero durante o processo de vulcanização.

Após o corte das camadas elementares nas dimensões de projeto, utilizando-se o apoio de grandes mesas metálicas, procede-se a montagem do aparelho com o empilhamento alternado de placas de elastômero e chapas de aço, conforme Figura 3.11. Posteriormente são colocados em moldes metálicos exatamente nas medidas exigidas no projeto, conforme Figura 3.12. Para garantir a uniformidade na espessura das camadas elementares, realiza-se um controle secundário, baseado no peso específico do elastômero, onde cada camada é pesada separadamente e tem exatamente o mesmo peso das outras, conforme ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.9 – Corte das chapas de aço em guilhotina.

Em seguida, os moldes carregados com o sanduíche pré-montado de chapas de elastômero e chapas de aço é colocado num dos pratos móveis da prensa eletro-hidráulica, e então é comprimido energicamente contra o outro prato e aquecido, processando-se assim à

vulcanização do aparelho de apoio (Figuras 3.13). O tempo de vulcanização pode variar de uma hora até quatro horas, dependendo das dimensões do aparelho de apoio, bem como a temperatura e pressão, que podem variar de 125°C a 135°C e 800 lb/in² a 3000 lb/in², respectivamente. A determinação do tempo e temperatura ideal de vulcanização é definida pela curva reométrica do lote de elastômero utilizado para fabricação do aparelho de apoio.

Concluída a vulcanização, os excessos são removidos e as rebarbas aparadas, e então o aparelho de apoio é colocado numa estufa, onde permanece por aproximadamente três horas a uma temperatura de 100°C (Figura 3.14). Após ser retirado da estufa é embalado para ser enviado ao seu comprador (Figura 3.15). Durante e após todo o processo de fabricação, o fabricante realiza várias verificações em seu próprio laboratório, anexo à unidade fabril, para garantir que o produto final atenda às prescrições da NBR 9783/1987.



Figura 3.10 – Mistura final laminada e pesada para montagem do aparelho de apoio.



Figura 3.11 – Montagem do sanduíche borracha/chapa de aço.



Figura 3.12 – Colocação do sanduíche borracha/chapa de aço nos moldes metálicos.



Figura 3.13 – Prensagem e vulcanização.



Figura 3.14 – Aparelho repousando em estufa.



Figura 3.15 – Aparelho pronto e embalado para entrega do cliente.

3.3 CONTROLE DE QUALIDADE

A NBR9783/1987 fixa as condições exigíveis para aceitação ou rejeição de aparelhos de apoio em elastômero fretado, para: limites dimensionais, tanto do apoio integral quanto das camadas elementares; paralelismo das chapas fretantes; propriedades físicas envolvendo dureza Shore A; tensão e alongamento de ruptura à tração e deformação permanente de compressão simples; módulo de deformação transversal; para a resistência de ligação elastômero-aço; resistência ao rasgamento do elastômero e alteração das propriedades originais após ensaios de envelhecimento em estufa e em câmara de ozônio.

Fixa, também, a proporção de número de amostras a serem ensaiadas em laboratório, em função do número de peças do lote e tipos de defeito. O lote definido na NBR9783/1987 é o conjunto de até 20 aparelhos, ou de quantidade maior estabelecida em comum acordo entre o consumidor e o fabricante, em função do volume de elastômero utilizado, desde que de mesmas dimensões e procedência, e fabricados de maneira sistemática e contínua.

Condições específicas segundo a NBR9783/1987**Para o elastômero**

- Dureza Shore A.

O valor da dureza deve ser 60 Shore A, com tolerância de ± 5 pontos. A figura 3.16 ilustra o ensaio de Dureza Shore A.

- Tensão e alongamento de ruptura à tração, conforme ilustrado na figura 3.17.

Os valores mínimos da tensão e do alongamento de ruptura à tração devem ser respectivamente 12 MPa e 350%, devendo o produto dos dois valores ser maior ou igual a 5.250.

- Envelhecimento acelerado em estufa

As variações máximas permissíveis para as características originais após envelhecimento devem satisfazer às seguintes condições:

- | | | |
|----|---------------------------------|--------------|
| a) | dureza Shore A | + 10 pontos; |
| b) | tensão de ruptura à tração | - 15%; |
| c) | alongamento de ruptura à tração | - 40%. |

- Envelhecimento acelerado em ozônio

Não deve apresentar fendas visíveis através de lupa com aumento de sete vezes.

- Deformação específica permanente à compressão, conforme figura 3.18.

O valor máximo da deformação específica permanente à compressão é de 25%.



Figura 3.16 – Ensaio de dureza shore A.



Figura 3.17 – Ensaio de tensão e alongamento de ruptura a tração.



Figura 3.18 – Ensaio de deformação permanente a compressão.



Figura 3.19 – Ensaio de compressão simples.



Figura 3.20 – Ensaio de distorção – resistência ligação elastômero - aço.

Para as chapas de aço

O comprimento, largura ou diâmetro devem ser iguais às dimensões externas de projeto do aparelho, reduzidas em mm e com tolerância de mais ou menos 1 mm. A espessura mínima de projeto deve atender aos limites especificados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Espessura da camada elementar vs. espessura mínima da chapa de aço

Espessura de projeto da camada elementar (h_p)	Espessura mínima de projeto da chapa de aço
$h_p \leq 5 \text{ mm}$	2 mm
$5 \text{ mm} < h_p \leq 10 \text{ mm}$	3 mm
$10 \text{ mm} < h_p \leq 15 \text{ mm}$	4 mm

- **Chapas de aço carbono**

Devem ser satisfeitos os requisitos da NBR6649/2014 e NBR6650/2014 para as chapas finas, e da NBR6648/2014 para chapas grossas, no que se refere às tolerâncias de medidas de espessura, tensão de escoamento, tensão de ruptura à tração e alongamento de ruptura à tração; quando não especificado no projeto, o aço deve atender à classificação CF-21 da NBR6649/2014 e NBR6650/2014 ou CG-21 da NBR6648/2014.



Figura 3.21 – Ensaio de ruptura a tração do aço das chapas fretantes.

- **Chapas de aço inoxidável**

Devem satisfazer ao especificado na NBR5601/2011; quando não especificado no projeto, o aço inoxidável deve ser do tipo 304 da norma supracitada.

Para a lâmina de politetrafluoretileno (PTFE)

Deve satisfazer às seguintes condições:

- | | |
|--|-----------------|
| a) densidade relativa a 293/293Kelvin (20/20°C): | 2,14 a 2.17 |
| b) tensão de ruptura à tração: | $\geq 17,5$ MPa |
| c) alongamento de ruptura à tração: | $\geq 275\%$ |

Para o Aparelho de Apoio

Camada elementar.

Considera-se camada elementar a camada de elastômero situada entre duas chapas de aço.

$$h_m = h_p \pm 0,05h_p \sqrt[3]{n} \quad (3.1)$$

tal que,

$$0,05h_p \sqrt[3]{n} \leq 1mm \quad (3.2)$$

onde,

h_p = espessura de projeto da camada elementar;

h_m = espessura média da camada elementar;

$n = \text{quantidade de camadas elementares de elastômero.}$

- **Paralelismo das chapas de aço**

$$h_i = h_m \pm 0,05h_p \sqrt[3]{n} \quad (3.3)$$

tal que,

$$0,05h_p \sqrt[3]{n} \quad (3.4)$$

onde h_i é a espessura da camada elementar de elastômero medida em qualquer ponto.

- **Recobrimento com elastômero das superfícies em contato com a estrutura**

O recobrimento é a camada superficial de elastômero, cuja finalidade principal é a de proteger as chapas de aço contra a exposição direta ao meio ambiente.

O recobrimento medido em qualquer ponto deve estar entre 2 e 4 mm.

- **Recobrimento com elastômero das superfícies externas laterais**

O recobrimento medido em qualquer ponto deverá estar compreendido entre 2 e 8 mm.

- **Comportamento à compressão simples**

O aparelho de apoio não deve apresentar descolamento nas interfaces de ligação, nem escoamento ou ruptura das chapas de aço, quando submetido à tensão de compressão simples de até 60 MPa. Além disso, não deve apresentar rasgamento do elastômero, quando submetido à tensão de compressão simples de até 40 MPa, conforme ilustrado na figura 3.19.

- **Módulo de deformação transversal, conforme figura 3.20.**

$$G = 1,00 \pm 0,15 GPa \quad (3.5)$$

- **Resistência da ligação elastômero-aço e resistência ao rasgamento do elastômero**

Não deve apresentar descolamentos nas ligações elastômero-aço ou rasgamento do elastômero, quando, no ensaio de distorção, for solicitado até que: $\tan \gamma = 2$, onde γ é o ângulo de distorção. No caso dos aparelhos deslizantes esse ensaio deve ser realizado após a retirada da camada deslizante.

- **Coeficiente de atrito dos aparelhos deslizantes**

Deve ser igual ou inferior a 4% para uma tensão de compressão de 8 MPa.

- **Adesão nas interfaces PTFE – aço e aço inoxidável – aço carbono**

A adesão nas interfaces não deve ser inferior a 2 MPa.

Em função das condições anteriormente descritas e das considerações a seguir, a aceitação e rejeição é processada.

Os aparelhos de apoio devem trazer na sua superfície lateral, de forma clara e indelével, os seguintes dados: nome do fabricante, data de fabricação, número do lote e número de sequência da peça no lote.

Os aparelhos de apoio não devem apresentar chapas de aço oxidadas ou de aço-carbono aparentes, bolhas, rasgos, cortes, furos ou ondulações visíveis.

Define-se como defeito crítico aquele que impede o funcionamento do aparelho de apoio como projetado, podendo reduzir a segurança da estrutura.

- **São considerados defeitos críticos nos aparelhos de apoio:**
 - dimensões fora dos limites;
 - deficiência nas ligações das interfaces elastômero/aço;
 - coeficiente de atrito dos aparelhos deslizantes acima do limite;
 - módulo de deformação transversal fora do recomendado;
 - ocorrência de rasgamentos nos ensaios de compressão simples, ensaios do módulo de elasticidade transversal, ensaios de distorção até $tg\gamma = 2$;
 - ocorrência de escoamento ou ruptura das chapas de aço.
- **São considerados defeitos críticos nas chapas de aço:**
 - limite de escoamento das chapas de aço abaixo dos valores especificados.

Define-se como defeito grave aquele que pode reduzir a vida útil do aparelho de apoio.

- **São considerados defeitos graves nos aparelhos de apoio:**
 - recobrimento superior e lateral com elastômero fora dos limites.
- **São considerados defeitos graves nas chapas de aço:**
 - composição química das chapas de aço inoxidável diferente da especificada;
 - alongamento ou tensão de ruptura abaixo dos limites;
 - comprimento ou largura fora dos limites.
- **São considerados defeitos graves no elastômero:**
 - tensão de ruptura ou alongamento de ruptura ou o produto dos dois valores abaixo dos limites;

- ocorrência de fendilhamento;
- valor da deformação específica permanente à compressão acima do limite;
- variação da tensão de ruptura, ou alongamento de ruptura, ou da dureza shore A após envelhecimento, acima dos limites.

- **São considerados defeitos graves no politetrafluoretileno (PTFE):**

- densidade relativa fora dos limites;
- tensão de ruptura ou alongamento de ruptura abaixo dos limites.

Define-se como defeito tolerável aquele que não reduz a vida útil do aparelho de apoio nem afeta a segurança da estrutura.

- **É considerado defeito tolerável no elastômero:**

- dureza shore A fora dos limites.

A cada defeito crítico é atribuído o valor 3, a cada defeito grave é atribuído o valor 2 e 1 para defeito tolerável.

Determina-se o número de recebimento como a soma dos valores atribuídos aos defeitos observados em primeira ou em segunda amostragem, conforme determinado na especificação.

Na primeira amostragem o lote é aceito se o número de recebimento for menor igual a 1. O lote é rejeitado se o número de recebimento for maior ou igual a 3. Se o número de recebimento for igual a 2, é necessária uma segunda amostragem. Na segunda amostragem o lote é aceito se o número de recebimento for menor ou igual a 1, e rejeitado em caso contrário.

O lote é aceito ou não de acordo com o número de recebimento obtido numa primeira amostragem, ou após a segunda amostragem, caso se faça necessária, de acordo com o determinado na especificação.

Segundo o item 7.1.2 da NBR9783/1987, caso constatada a não conformidade com as exigências da norma, a aceitação definitiva do lote pode ficar a critério do engenheiro responsável pelo projeto. Ressalta-se que, quando ocorrer a revisão da norma esse item deve ser rigorosamente analisado, pois sua permanência na norma invalida a mesma.

4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de aparelhos de apoio deve atender às recomendações das normas vigentes para que o mesmo tenha seu funcionamento satisfatório. Sendo assim, é necessário seguir às especificações de projeto baseadas nas normas. Além das normas, existem métodos que foram desenvolvidos por pesquisadores que também auxiliam nesse processo.

Uma vez que não existe norma brasileira que oriente o dimensionamento de aparelhos de apoio são apresentadas as normas internacionais que orientam os projetistas no dimensionamento dos aparelhos de apoio usados nas obras brasileiras, sendo elas a norma francesa do S.E.T.R.A., a norte americana da AASHTO e o Eurocode. Apresenta-se, a seguir, alguns poucos detalhes de dimensionamento segundo a norma francesa do S.E.T.R.A (Service d'Etudes Techniques des Routes ET Autoroutes), pois essa foi a norma utilizada no dimensionamento dos aparelhos de apoio da ponte Rio-Niterói.

4.1 DIMENSIONAMENTO PELA S.E.T.R.A.

Segundo SIQUEIRA (2003), o dimensionamento baseia-se na limitação das tensões de cisalhamento que se desenvolvem e/ou das deformações impostas aos aparelhos de apoio.

As solicitações e deformações consideradas são as que resultem da aplicação de dispositivos regulamentares de cálculo das estruturas e também as verificações a serem realizadas são para as diversas combinações previstas.

Cálculo das tensões de cisalhamento.

- Força normal: N

$$T_N = \frac{1,5 \sigma_m}{\beta} \quad (4.1)$$

sendo

$$\beta = \frac{ab}{2t(a+b)} \quad (4.2)$$

$$\sigma_m = \frac{N}{ab} \quad (4.3)$$

- Força e deslocamento tangencial: H e u .
 - para um deslocamento lento u_1 (variação de temperatura, retração, fluência) ou sob a força estática H_1 :

$$TH_1 = \frac{H_1}{ab} = G \frac{u_1}{T} = G \tan T_1 \quad (4.4)$$

- para um deslocamento rápido u_2 , ou sob forças dinâmicas H_2 :

$$TH_2 = \frac{H_2}{ab} = \frac{2Gu_2}{T} = 2G \cdot \tan T_2 \quad (4.5)$$

- sob as forças e os deslocamentos somados:

$$T_H = T_{H1} + \frac{T_{H2}}{2} = \frac{H_1 + 0,5H_2}{ab} = G \frac{u_1 + u_2}{T} \quad (4.6)$$

- Rotação: α (em torno de um eixo paralelo a maior dimensão do apoio)

$$T_\alpha = \frac{G}{2} \left(\frac{a}{T} \right)^2 \alpha_T \quad (4.7)$$

sendo

$$\alpha_T = \frac{\alpha_T}{n} \quad (4.8)$$

Limitação das tensões de cisalhamento.

- Os limites admissíveis são:

$$\rightarrow T = T_N + T_H + T_\alpha \leq 5 G \quad (4.9)$$

$$\rightarrow T_{H1} \leq 0,5 G \quad (4.10)$$

$$\rightarrow T_H \leq 0,7 G \quad (4.11)$$

- As condições de não levantamento sobre um bordo é equivalente a:

$$\rightarrow T_\alpha \leq T_N \quad (4.12)$$

A tensão média de compressão está limitada a

$$\rightarrow \sigma_m \leq 15 \text{ MPa, para pontes rodoviárias, equivalente a}$$

$$T_N \leq \frac{22,5}{\beta} \quad (4.13)$$

$$\rightarrow \sigma_m \leq 11 \text{ MPa, para pontes ferroviárias, equivalente a}$$

$$T_N \leq \frac{16,5}{\beta} \quad (4.14)$$

5 APARÊNCIA SUPERFICIAL VS. FUNCIONALIDADE VS. RESERVAS DE RESISTÊNCIA

Apesar de não existir um número oficial, estima-se que o Brasil tenha em torno de 80.000 obras de arte especiais e, que sua maioria esteja sob a gestão do Poder Público. Os materiais fabricados em elastômero não são muito empregados na construção civil, tendo sua utilização praticamente restrita aos perfis extrudados utilizados nas juntas de dilatação e aos aparelhos de apoio simples ou fretados. Baseados nas assertivas anteriores, foram adotados, ao longo dos anos, alguns critérios de recuperação das obras de arte especiais, que muitas vezes são demasiadamente excedentes às necessidades reais da obra, mas que por não se ter uma periodicidade constante na realização das vistorias, estes critérios acabaram por virar prática comum.

A partir do ano de 1995, com a concessão à iniciativa privada de parte do patrimônio rodoviário nacional, esses critérios começaram a ser questionados pelas concessionárias e um tratamento diferenciado passou a ser dado às obras de arte especiais sob suas responsabilidades.

A ponte Rio-Niterói, inaugurada a mais de 40 anos faz parte desse grupo de obras concessionadas à iniciativa privada. Há um processo diferenciado de vistoria e manutenção de todas as suas estruturas, incluindo os aparelhos de apoio em neoprene fretado, que somam mais de 3.200 unidades ao longo de toda a ponte.

Uma das premissas adotadas antes de 1995, e que ainda hoje é admitida em algumas obras de arte especiais sob gestão do Poder Público, é a substituição do aparelho de apoio de neoprene fretado que apresentasse, em vistorias, aparência visual diferente da original.

Os aparelhos de apoio projetados para aplicação em obras no Brasil são baseados em normas de projeto internacionais (Francesas, Americanas e Eurocode) uma vez que não há norma brasileira que regule o projeto. Porém, existe no Brasil a NBR9783/1987, que regulamenta a recepção de aparelhos de apoio. Essa norma é bastante rígida. Os critérios de aceitação dos aparelhos de apoio são superiores aos adotados em projeto. Uma vez que os aparelhos de apoios são projetados baseados nas normas internacionais, e para também atender aos requisitos da NBR9783/1987, toda a sua capacidade resistente é majorada, conferindo-lhe uma altíssima resistência.

A função de um aparelho de apoio é fazer a ligação entre a superestrutura e mesoestrutura recebendo e transmitindo, de forma adequada, as solicitações advindas da superestrutura. Um aparelho de apoio está funcionando de forma adequada quando os elementos estruturais, por ele ligados, não apresentarem defeitos. Porém, existem casos em que a substituição do aparelho deve ser realizada o quanto antes, conforme ilustrado nas Figuras 5.1 e 5.2, mesmo que os elementos estruturais ligados não estejam apresentando nenhuma anomalia.

Contudo, na maioria dos casos o que se tem são aparelhos de apoio que apresentam em seu perímetro algumas patologias como fissuras, bojamentos, rompimento da camada de cobrimento, fretagem exposta, conforme exemplificado nas Figuras 5.3 e 5.4, sem, no entanto, causar prejuízos às estruturas adjacentes, o que indica que o aparelho continua cumprindo sua função. Por meio de uma inspeção visual, não é possível detectar se as anomalias são profundas ou superficiais. Entende-se que, nesse momento, o aparelho está em sua reserva de resistência, oriunda da majoração de sua capacidade resistente no projeto para atendimento aos requisitos da NBR9783/1987.

Uma operação de substituição de aparelhos de apoio de neoprene fretado, além de ser uma operação de custo elevado, é sempre uma operação de alto risco onde a estrutura é submetida a solicitações não usuais. Deve-se considerar que dependendo do tipo de estrutura e da localização da obra, um elevado custo social poderá estar envolvido na operação, uma vez que se tem a necessidade de interrupção, mesmo que parcial, do tráfego na região.



Figura 5.1 – Deformação excessiva da metade do apoio carregada, com falta de condição de apoio da outra metade.

Fonte: Carlos Henrique Siqueira



Figura 5.2 – Apoio parcial da almofada de elastômero deixando livre metade da superfície do apoio, sobrecarregando a outra parte.

Fonte: Carlos Henrique Siqueira



Figura 5.3 – Aparelho de apoio com rompimento da camada de recobrimento lateral, porém, sem trazer vínculos negativos às estruturas adjacentes.



Figura 5.4 – Aparelhos de apoio com fretagem exposta, porém, sem comprometimento das estruturas adjacentes.

Fonte: Carlos Henrique Siqueira

As pontes projetadas antes da entrada em vigor da NBR6118/2003 não consideravam a previsão de acesso para vistoria e manutenção das estruturas, inclusive dos aparelhos de apoio, o que eleva a substituição dos mesmos nessas obras a um patamar de risco, dificuldades e custos muito superiores as demais que preveem acesso para as vistoria e manutenção.

Faz-se necessário um estudo aprofundado do comportamento dos aparelhos de apoio que apresentem anomalias em suas faces expostas, por meio de um extenso programa experimental que compreenda inspeções visuais e dimensionais e ensaios de laboratório, baseados na NBR9783/1987.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1 NOTAS INICIAIS

O programa experimental consiste no acompanhamento do comportamento de um grupo de 88 aparelhos de apoio em elastômero fretado, da ponte Rio-Niterói, mediante a uma campanha de monitoração que inclui inspeções visuais e dimensionais detalhadas, realizadas nos anos de 2000, 2005, 2010 e 2014.

Foram também realizados ensaios, à luz da NBR9783/1987, em aparelhos de apoio com mais de 40 anos de serviço que apresentaram durante as inspeções visuais algumas anomalias. Esses aparelhos estavam localizados no trecho sobre o mar (pilar 136 – Niterói – duas unidades), no acesso Rio de Janeiro (pilar 335 rampa R2 – Acesso Av. Brasil – duas unidades). Complementou-se o ensaio com um aparelho de apoio do elevado da Perimetral, demolido em 2014, por ter sido produzido pelo mesmo fabricante e ter idade aproximada.

Outro número igual de aparelhos com a mesma origem dos anteriormente citados e um aparelho novo, escolhido aleatoriamente em lote produzido para substituir os do pilar 136, porém, recusado por não apresentar paralelismo entre as chapas fretantes dentro dos limites da NBR9783/1987, também foram objeto de ensaios especiais de compressão em verdadeira grandeza.

A Figura 6.1 ilustra a localização dos aparelhos ensaiados na ponte Rio-Niterói.

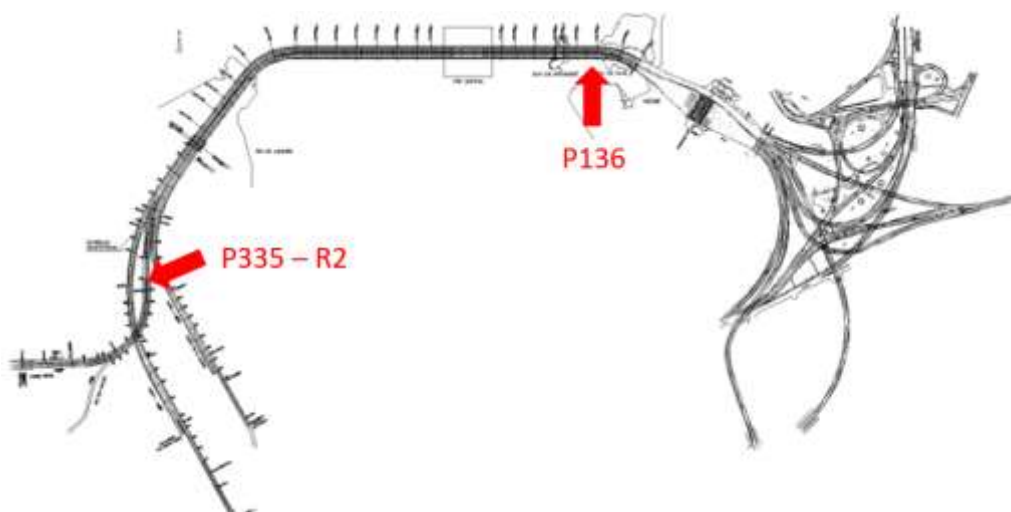


Figura 6.1 – Esquemático de localização na ponte Rio-Niterói dos apoios ensaiados.

6.2 MONITORAÇÃO

Essa monitoração apresenta a condição de 88 aparelhos de apoio de elastômero fretado instalados na ponte Rio-Niterói, sendo eles, 76 aparelhos fixos e 12 aparelhos deslizantes, selecionados para representar todo o universo de cerca de 3200 aparelhos de apoio de elastômero fretado existentes entre as super e mesoestruturas de toda a obra. Esta monitoração foi realizada em um período de 12 meses nos anos de 2000, 2005, 2010 e 2014.

O procedimento adotado para a realização foi o seguinte:

- 1 – Vistoria pormenorizada das superfícies frontal e laterais expostas dos aparelhos de apoio fixos, e de todas as quatro faces expostas dos aparelhos deslizantes;
- 2 – Identificação completa de todas as anomalias visíveis dos apoios, marcando-se no elastômero e/ou no concreto os devidos comprimentos das principais descontinuidades;
- 3 – Verificação dimensional dos aparelhos de apoio, atentando-se com cuidados para a obtenção da altura. Todas as dimensões das almofadas e seus defeitos foram medidos com precisão milimétrica;
- 4 – Vistoria do estado físico dos berços de assentamento em concreto;
- 5 – Identificação de eventuais anomalias nos berços de assentamento;
- 6 – Observação quanto ao assentamento dos aparelhos de apoio sobre os berços em concreto, no que se refere à centralização, anotando-se os espaçamentos laterais e frontais entre o apoio e as bordas do berço;
- 7 – Observação quanto à plenitude de assentamento entre as superfícies dos aparelhos de apoio e os berços, e dos aparelhos de apoio e das estruturas nele assentadas;
- 8 – Observação quanto ao nivelamento das bordas das fendas de dilatação, principalmente quando detectadas deformações verticais muito acentuadas dos aparelhos de apoio;
- 9 – Vistoria das estruturas de concreto suporte e suportada pelos aparelhos de apoio;
- 10 – Identificação e marcação dos eventuais defeitos nas estruturas de concreto;
- 11 – Vistoria do engaste bloco/pilar anotando-se as eventuais não conformidades detectadas. Para a realização deste item da monitoração foi eleito um único pilar, onde foi realizada escavação em seu perímetro de forma a expor a área a ser vistoriada e permitir o perfeito acesso do inspetor;

- 12 – Verificações diárias, pelo menos três vezes ao dia, da temperatura ambiente próxima a região de vistoria dos aparelhos de apoio;
- 13 – Catalogação dos dados em planilhas específicas;
- 14 – Documentação fotográfica de todas as etapas do trabalho.

6.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Nos ensaios de laboratório verificou-se as propriedades físicas e mecânicas dos aparelhos de apoio em serviço na ponte Rio-Niterói há mais de 40 anos para compará-las com os limites estabelecidos pela NBR9783/1987. Dois aparelhos de apoio são do trecho sobre o mar da ponte Rio-Niterói, com dimensões de 700 mm x 700 mm (pilar 136 – Niterói); outros dois aparelhos de apoio são do acesso Rio com dimensões de 700 mm x 230 mm (pilar 335 – Rampa R2 – Acesso Av. Brasil) e um espécime do elevado da Perimetral, com dimensões 480 mm x 250 mm.

Para a execução dos ensaios de laboratório para a comparação com os limites da NBR9783/1987, é necessária a modulação de corpos de prova em dimensões menores que as originais dos aparelhos de apoio a serem ensaiados. Este fato suscitou a dúvida de que a redução das dimensões do aparelho pudesse mascarar o real estado de funcionalidade dos aparelhos, uma vez que as patologias periféricas são descartadas quando da produção do corpo de prova.

Assim, foi proposta a execução de ensaios de compressão em verdadeira grandeza, utilizando-se os aparelhos exatamente nas mesmas dimensões e condições que estavam em serviço na estrutura. Para isso, construiu-se um aparato especial, conforme Figura 6.4, uma vez que não existe no Brasil prensa com capacidade suficiente para promover o carregamento necessário à realização do ensaio.

Foram então realizados ensaios de compressão em verdadeira grandeza com amostras similares às anteriores e coletadas dos mesmos locais.

A Figura 6.2 ilustra a retirada de um dos aparelhos de apoio do pilar 335 – R2.



Figura 6.2 – Retirada de aparelho de apoio do pilar 335 rampa R2.

A Figura 6.3 ilustra a estrutura de apoio construída para suporte ao macaqueamento da ponte, uma vez que a mesma por ter sido projetada anteriormente a NBR 6118, não é dotada de dispositivos de apoio à sua manutenção.



Figura 6.3 – Vista geral da obra de substituição dos aparelhos de apoio do pilar 136 da ponte Rio-Niterói.

6.3.1 ENSAIOS DE ACORDO COM A NBR9783/1987

Os ensaios de laboratório foram, fundamentalmente, para verificar o comportamento dos aparelhos de apoio extraídos, quando submetidos a carregamentos compressivos de 15, 40, e 60 MPa, de modo a possibilitar a comparação com os dados captados nos ensaios de compressão em verdadeira grandeza.

Cabe ressaltar que o objetivo desta pesquisa é averiguar a capacidade resistente e funcionalidade de aparelhos de apoio com mais de 40 anos em serviço e, portanto, não são tratados outros resultados constantes dos laudos desses ensaios, além da compressão simples.

Os ensaios constantes da NBR9783/1987 são executados como forma de avaliar a qualidade de aparelhos de apoio novos, ou seja, são testes para recebimento de almofadas recém produzidas. O uso dessa especificação para controle de apoios em serviço, como indicador da qualidade direta do material, não procede. Pode-se considerar os indicadores numéricos como fatores referenciais, não havendo obrigatoriedade de se atingir os dados ali exigidos com apoios que já foram solicitados em serviço por mais de 40 anos.

Os resultados apresentados nas tabelas 6.1 a 6.5 foram obtidos nos ensaios de compressão simples com os aparelhos de apoio substituídos.

Tabela 6.1 –Resultado dos ensaios do corpo de prova do elevado Perimetral.

Tensão aplicada MPa	Reação do apoio
15	Sem anomalias
40	Sem anomalias
60	Rasgamento do elastômero e descolamento entre a interface aço/borracha

Tabela 6.2 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 1 – R2.

Tensão aplicada MPa	Reação do apoio
15	Ampliação do rasgamento do elastômero e do descolamento entre aço/metal
30	Agravamento da situação anterior
40	Agravamento da situação anterior
60	Agravamento da situação anterior

Tabela 6.3 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 2 – R2.

Tensão aplicada MPa	Reação do apoio
15	Ampliação do rasgamento do elastômero e do descolamento entre aço/metal
30	Agravamento da situação anterior
40	Agravamento da situação anterior
60	Agravamento da situação anterior

Tabela 6.4 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 1 – P136.

Tensão aplicada MPa	Reação do apoio
15	Ampliação do rasgamento do elastômero e do descolamento entre aço/metal
30	Agravamento da situação anterior
40	Agravamento da situação anterior, com destruição de camadas de elastômero
60	Agravamento da situação anterior, com destruição de camadas de elastômero

Tabela 6.5 – Resultado dos ensaios do corpo de prova 2 – P136.

Tensão aplicada MPa	Reação do apoio
15	Ampliação do rasgamento do elastômero e do descolamento entre aço/metal
30	Agravamento da situação anterior
40	Agravamento da situação anterior, com ruptura de chapa fretante
60	Agravamento da situação anterior, com destruição de camadas de elastômero.

6.3.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM VERDADEIRA GRANDEZA

O ensaio consiste na aplicação de forças de compressão normais à maior superfície do corpo de prova, para verificação de eventuais ocorrências de: ruptura, deslocamentos, rasgamentos, escoamento das chapas de aço, deformação vertical residual.

As informações apresentadas e procedimentos adotados estão de acordo com as recomendações da NBR 9783/1987.

O ensaio foi executado com uma série de incrementos de carga de compressão simples (5 MPa/min), com intervalos em 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, para registro dos principais aspectos observados no aparelho.

Em todos os intervalos entre incrementos de carga foram registradas as leituras dos extensômetros mecânicos instalados na prensa, com o objetivo de registrar os deslocamentos médios.

Para que fosse possível impor aos apoios as tensões exigidas no ensaio, foi concebida uma estrutura especial de reação para acomodar um conjunto de quatro macacos hidráulicos, cada um com poder de aplicação de força de compressão de 10.000 kN, perfazendo, portanto, a carga máxima de 40.000 kN, superior a força necessária a atingir a tensão de 60 MPa, que é de 29.400 kN no aparelho de 700 mm x 700 mm x 55 mm.



Figura 6.4 – Aparato de reação (prensa).

Na aferição da deformação dos corpos de prova, os ensaios utilizaram dois relógios comparadores analógicos (extensômetros mecânicos), com precisão de 0,01 mm, posicionados de forma diametralmente opostas. Um terceiro relógio foi instalado ao lado dos macacos hidráulicos para acompanhamento do curso do êmbolo dos mesmos.

Os resultados deste ensaio são, também, para elucidar a existência de alguma alteração significativa com os resultados obtidos em laboratório, para as tensões de 40 e 60 MPa, com os corpos de prova com dimensões menores, da ordem de 20 cm x 20 cm, retirados das almofadas substituídas que foram submetidas aos testes preconizados pela NBR9783/1987.



Figura 6.5 – Extensômetros mecânicos.

Fonte: acervo do autor

Antes da aplicação da carga nos apoios foram tomadas as seguintes medidas preliminares necessárias a boa condução do ensaio:

- 1 – Aferição dos macacos e guarda de suas calibrações, para que se pudesse acompanhar com precisão as etapas de carga a serem aplicadas;
- 2 – Averiguação das condições das bombas hidráulicas;
- 3 – Checagem da sanidade plena da estrutura de reação, na tentativa de evitar qualquer contratempo durante o ensaio;
- 4 – Observação do estado de cada apoio, principalmente no que concerne às eventuais anomalias existentes;
- 5 – Marcação com giz das anomalias mais relevantes das superfícies laterais dos apoios, para comparação de eventuais alterações durante e após o teste;
- 6 – Anotações e registros fotográficos dos subitens anteriores.

A Figura 6.6 mostra a marcação, com giz, das anomalias existentes para o acompanhamento de eventuais alterações no decorrer do ensaio.



Figura 6.6 – Marcação com giz das anomalias principais nas faces laterais dos apoios.

Conforme mencionado, a aplicação das forças de compressão nos apoios se deu por incrementos de carga com patamares variando em 5 MPa, que foi a tensão inicial do teste. Os macacos agiram igualitariamente em todos os apoios, de forma que as forças fossem uniformemente distribuídas em toda a área das almofadas, tanto superior, quanto inferior. A sequência de carregamento está mostrada nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8.

Tabela 6.6 – Sequência de carregamento para as almofadas de 700 mm x 700 mm (P136).

Carga total (kN)	Carga por macaco (kN)	Tensão (MPa)
2.450	612,50	5
4.900	1.225,00	10
7.350	1.837,50	15
9.800	2.450,00	20
12.250	3.062,50	25
14.700	3.675,00	30
17.150	4.287,50	35
19.600	4.900,00	40
22.050	5.512,50	45

24.500	6.125,00	50
26.950	6.737,50	55
29.400	7.350,00	60

Tabela 6.7 – Sequência de carregamento para as almofadas de 700 mm x 230 mm (P335 R2).

Carga total (kN)	Carga por macaco (kN)	Tensão (MPa)
850	210	5
1.700	430	10
2.560	640	15
3.410	850	20
4.260	1.070	25
5.110	1.280	30
5.960	1.490	35
6.820	1.710	40
7.670	1.920	45
8.520	2.130	50
9.370	2.340	55
10.220	2.560	60

Tabela 6.8 – Sequência de carregamento para almofadas de 480 mm X 250 mm (Perimetral).

Carga total (kN)	Carga por macaco(kN)	Tensão (MPa)
600	150	5
1200	300	10
1800	450	15
2.400	600	20
3.000	750	25
3.600	900	30
4.200	1.050	35

4.800	1.200	40
5.400	1.350	45
6.000	1.500	50
6.600	1.650	55
7.200	1.800	60

Nos intervalos entre incrementos de carga sempre foi dada uma pausa para que se observasse o estado do apoio em todas as quatro faces laterais, com a finalidade de detectar em que fase ocorreram as primeiras anomalias decorrentes da aplicação da força, independentemente das que já se encontravam instaladas, ou a variação dessas. Nos estágios de carregamento correspondentes a 15, 40 e 60 MPa, os apoios foram minuciosamente averiguados quanto ao seu estado físico.

A Figura 6.7 mostra um aparelho de apoio durante ensaio de compressão simples em verdadeira grandeza com carregamento de 40 MPa.



Figura 6.7 – Aparelho de apoio dentro do aparato de ensaio, com tensão de 40 MPa.

Isto posto, esta pesquisa contemplou adicionalmente, sem ser o foco principal, o conhecimento da influência do não paralelismo das chapas fretantes, indicado pela NBR9783/1987, um dado que poderá ser muito útil na atualização dessa especificação.

Nos apoios com dimensões menores como os extraídos do pilar 335 R2 e do elevado da Perimetral, o equipamento de aplicação do carregamento funcionou sem qualquer inconveniente. Todavia, quando da execução dos ensaios nos apoios maiores, que são do pilar 136 e do apoio novo, a prensa mostrou-se instável na introdução de tensões mais elevadas, evidenciado por deformação do prato superior. Paralisou-se o teste e fez-se o reforço de todo o conjunto reativo, tanto no prato superior quanto no inferior. Os ensaios foram realizados com sucesso em data posterior.

Os resultados dos ensaios realizados em campo com aparelhos de apoio em escala natural são apresentados nas Tabelas 6.9 a 6.20.

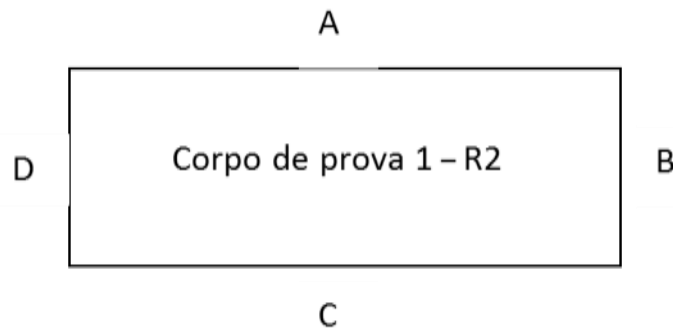


Figura 6.8 – Croquis do corpo de prova 1 – R2.

Tabela 6.9 – Medidas do corpo de prova 1 – R2.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação (%)
A	71,70	72,20	+ 0,50	+ 0,70
B	23,80	24,00	+ 0,20	+ 0,84
C	71,80	72,40	+ 0,60	+ 0,84
D	23,90	24,20	+ 0,30	+ 1,25
ALTURA	5,21*	5,04**	- 0,17	- 3,26

* Memória de cálculo: $(5,20 + 5,24 + 5,19 + 5,20) / 4 = 5,2075 \cong 5,21\text{cm}$.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(5,144 + 4,990 + 5,075 + 4,945) / 4 = 5,0385 \cong 5,04\text{ cm}$.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

- Estado original do apoio:
 - duas regiões (9,00 cm e 20,50 cm) com bojamento e fissura generalizada, na face C, conforme Figura 6.9.

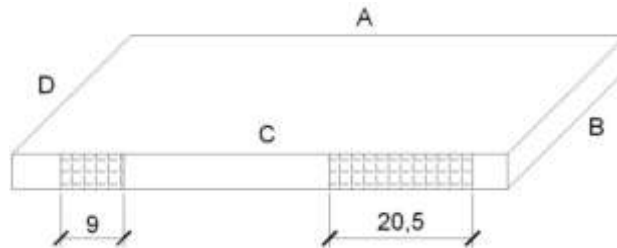


Figura 6.9 – Corpo de prova 1 – R2, antes do teste de carga – unid: cm.

Tabela 6.10 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 1 – R2.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	Situação original não alterada	3,60
10	Situação original não alterada	7,07
15	Situação original não alterada	10,16
20	O bojamento de 20,5 cm se acentuou sem avançar horizontalmente.	13,36
25	O bojamento de 9,00 cm se acentuou sem avançar horizontalmente.	16,54
30	Bojamentos em todo o apoio (trabalho normal).	20,89
35	Situação anterior não alterada	26,26
40	Novo bojamento entre os dois já existentes, sem rompimento.	32,85
45	Situação anterior não alterada	37,30
50	Rompimento vertical na mesma face dos bojamentos originais.	39,78

- O apoio, após alívio do carregamento, apresentou novas lesões, tais como:
 - rompimento vertical de 3,50 cm na face C;
 - bojamento de 9,00 cm na face A.

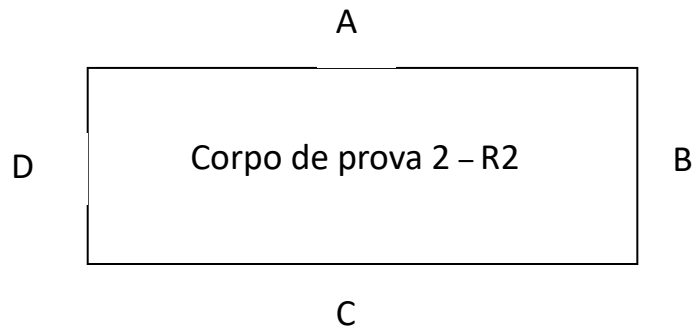


Figura 6.10 – Croquis do corpo de prova 2 – R2.

Tabela 6.11 – Medidas do corpo de prova 2 – R2.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação (%)
A	71,40	71,50	+ 0,10	+ 0,14
B	23,50	23,50	—	—
C	71,40	71,60	+ 0,20	+ 0,28
D	23,50	23,60	+ 0,10	+ 0,42
ALTURA	5,17*	4,91**	- 0,26	- 5,29

* Memória de cálculo: $(5,19 + 5,13 + 5,15 + 5,20) / 4 = 5,1675 \cong 5,17$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(47,79 + 49,07 + 49,93 + 49,50) / 4 = 4,90725 \cong 4,91$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

- Estado original do apoio:
 - bojamento com fissura generalizada em 17,30 cm na face C, conforme Figura 6.11.

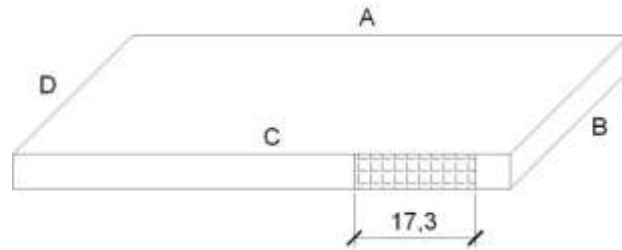


Figura 6.11 – Corpo de prova 2 – R2, antes do teste de carga – unid: cm.

Tabela 6.12 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 2 – R2.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	Situação original não alterada	1,21
10	Situação original não alterada	4,40
15	O bojamento na face C se acentuou sem avançar horizontalmente. Bojamentos em toda a face C (trabalho normal do apoio)	8,62
20	Situação anterior não alterada	11,94
25	Situação anterior não alterada	16,30
30	Os bojamentos inferiores da face C se acentuaram.	20,62
35	Situação anterior não alterada	25,03
40	Situação anterior não alterada	29,58
45	Rasgamento da anomalia já existente (face C). Bojamentos nas faces B e D (trabalho normal do apoio).	33,53
50	Situação anterior não alterada	37,20

- O apoio, após alívio do carregamento, apresentou novas lesões, ilustradas na Figura 6.12, tais como:
 - rasgamento de 14,60 cm sobre a anomalia já existente na face C;
 - rasgamentos de 3,90 cm e 2,00 cm no centro da face C.

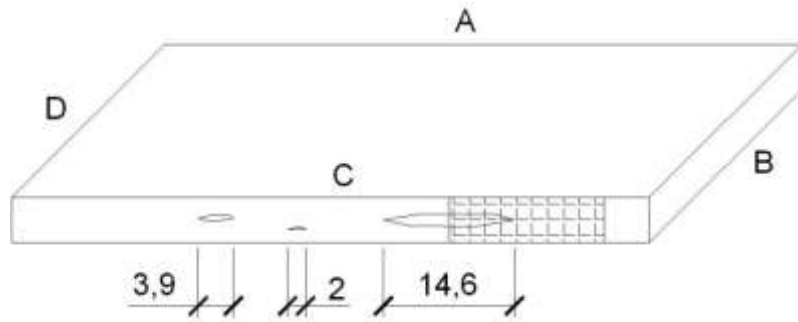


Figura 6.12 – Rasgamentos na face C após o teste de carga – unid: cm.

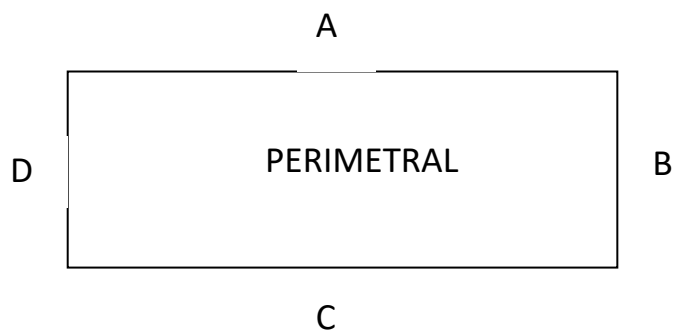


Figura 6.13 – Croquis do corpo de prova do elevado da Perimetral.

Tabela 6.13 – Medidas do corpo de prova do elevado da perimetral.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação (%)
A	48,50	49,40	+ 0,90	+ 1,86
B	25,50	26,40	+ 0,90	+ 3,51
C	48,40	49,70	+ 1,30	+ 2,69
D	25,10	25,90	+ 0,80	+ 3,19
ALTURA	4,14*	3,94**	- 0,50	- 4,83

* Memória de cálculo: $(4,207 + 4,284 + 4,015 + 4,051) / 4 = 4,13925 \cong 4,14$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(4,051 + 3,828 + 4,010 + 3,870) / 4 = 3,93975 \cong 3,94$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

- Estado original do apoio:
 - sem anomalias.

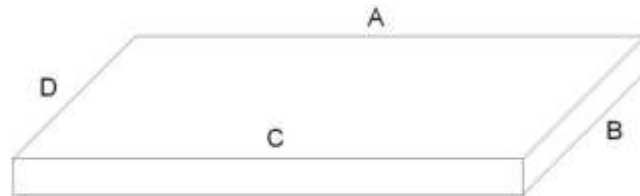


Figura 6.14 – Corpo de prova do elevado da perimetral, antes do teste de carga.

Tabela 6.14 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova elevado da Perimetral.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	Situação original	3,39
10	Situação original	6,15
15	Situação original	9,42
20	Situação original	12,98
25	Bojamento em todas as faces (trabalho normal do apoio)	17,10
30	Situação anterior não alterada	20,09
35	Situação anterior não alterada	22,57
40	Situação anterior não alterada	25,35
45	Situação anterior não alterada	27,98
50	Situação anterior não alterada	30,11

- Estado do apoio após alívio do carregamento:
 - sem anomalias.

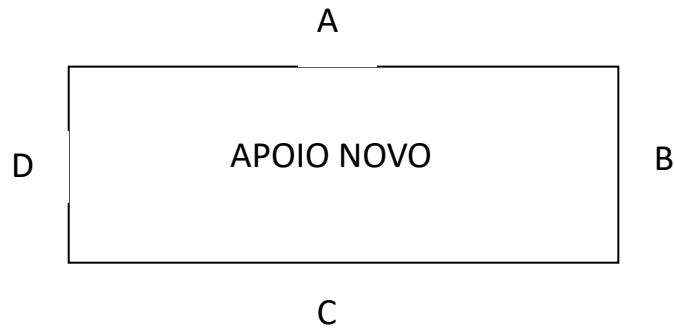


Figura 6.15 – *Croquis* do corpo de prova aparelho novo.

Tabela 6.15 – Medidas do corpo de prova aparelho novo.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação(%)
A	70,00	70,60	+ 0,60	+ 0,86
B	80,50	80,90	+ 0,40	+ 0,50
C	70,00	70,50	+ 0,50	+ 0,71
D	80,50	80,60	+ 0,10	+ 0,12
ALTURA	6,13	6,03	- 0,10	- 1,63

* Memória de cálculo: $(6,162 + 6,015 + 6,213 + 6,145) / 4 = 6,13375 \cong 6,13$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(6,024 + 6,023 + 6,057 + 6,018) / 4 = 6,0305 \cong 6,03$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

- Estado original do apoio:
 - sem anomalias.

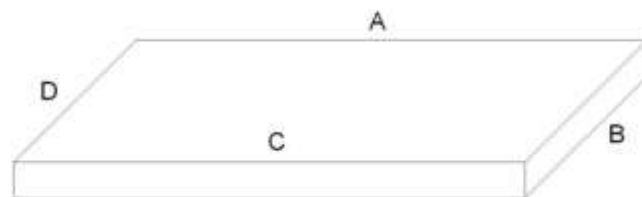


Figura 6.16 – Corpo de prova apoio novo, antes do teste de carga.

Tabela 6.16 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova aparelho novo.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	—	3,06
10	—	5,53
15	—	7,98
20	—	10,07
25	—	12,20
30	—	14,30
35	—	16,82
40	—	18,41
45	—	20,24
50	—	21,74
55	—	25,50
60	—	27,87

- Estado do apoio após alívio do carregamento:
 - o aparelho se manteve intacto.

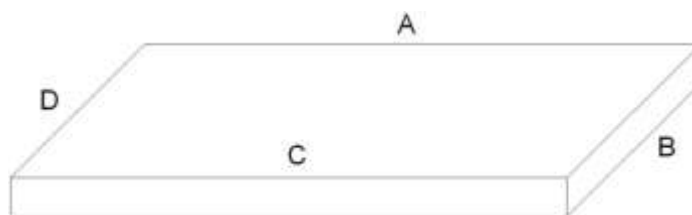


Figura 6.17 – Apoio novo após o teste de cargas.

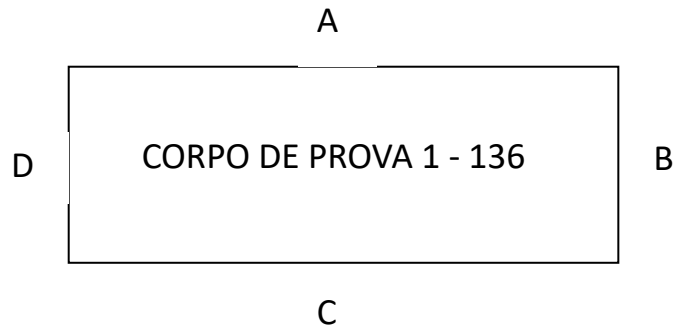


Figura 6.18 – Croquis corpo de prova 1 – P136.

Tabela 6.17 – Medidas do corpo de prova 1 – P136.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação (%)
A	70,90	71,00	+ 0,10	+ 0,14
B	70,40	71,00	+ 0,60	+ 0,85
C	71,90	72,50	+ 0,60	+ 0,83
D	71,00	71,70	+ 0,70	+ 0,99
ALTURA	5,23	5,09	- 0,14	- 2,68

* Memória de cálculo: $(5,123 + 5,240 + 5,025 + 5,547) / 4 = 5,23375 \cong 5,23$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(4,926 + 5,050 + 4,869 + 5,510) / 4 = 5,08875 \cong 5,09$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

- Estado original do apoio, conforme Figura 6.19.
 - fissuras de 13,5 cm, 6,5 cm, 16,5 cm e 5 cm na face A;
 - encontros entre faces A/B, B/C e C/D com rompimentos.

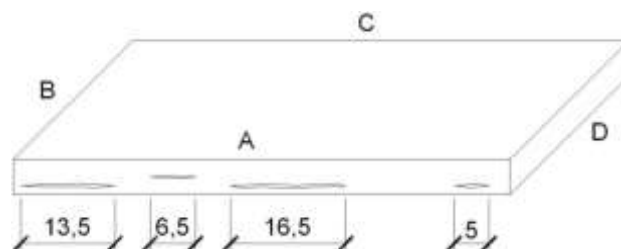


Figura 6.19 – Corpo de prova 1 – P136, antes do teste de carga.

Tabela 6.18 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 1 – P136.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	Situação original não alterada	2,64
10	Situação original não alterada	5,88
15	Situação original não alterada	8,47
20	As fissuras na face A se acentuaram.	11,09
25	As fissuras na face A se acentuaram. Fissuras na face B	13,79
30	Situação anterior não alterada	16,73
35	As fissuras na face A se acentuaram.	19,92
40	As fissuras na face A se acentuaram.	23,85
45	As fissuras na face A se acentuaram.	29,74
50	As fissuras na face A se acentuaram.	33,70

Estado do apoio após alívio do carregamento, conforme Figura 6.20.

- fissuras de 18,5 cm, 7,00 cm, 17,00 cm e 5,00 cm na face A;
- fissuras generalizadas na face B.

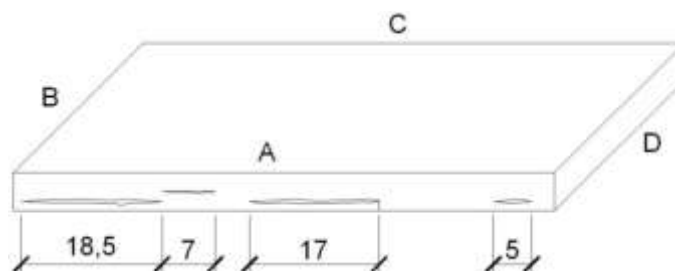


Figura 6.20 – Corpo de prova 1 – P136, depois do teste de carga.

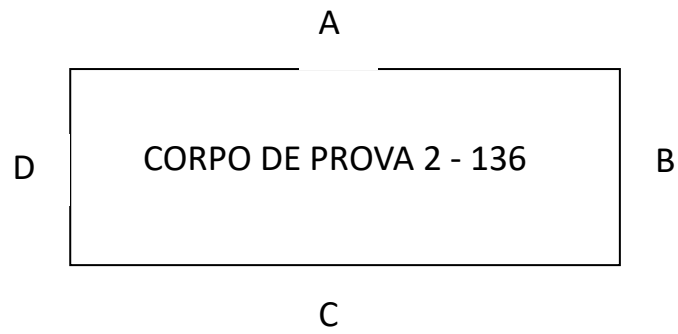


Figura 6.21 – Croquis corpo de prova 2 – P136.

Tabela 6.19 – Medidas do corpo de prova 2 – P136.

Lado	Antes (cm)	Depois (cm)	Variação (cm)	Variação (%)
A	71,40	72,00	+ 0,60	+ 0,84
B	71,40	72,00	+ 0,60	+ 0,84
C	72,00	72,20	+ 0,20	+ 0,28
D	70,50	71,80	+ 1,30	+ 1,84
ALTURA	5,88*	6,04**	+ 0,16	+ 2,72

* Memória de cálculo: $(5,974 + 5,528 + 6,141 + 5,895) / 4 = 5,8845 \cong 5,88$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

** Memória de cálculo: $(5,763 + 5,568 + 7,160 + 5,684) / 4 = 6,04375 \cong 6,04$ cm.

Essas medidas foram tomadas em cada uma das faces do aparelho de apoio.

Obs.: a altura aumentou por conta do rompimento da chapa fretante.

- Estado original do apoio, ilustrado nas Figura 6.22 e 6.23.
 - bojamento natural na face A;
 - rasgamento vertical na face B.

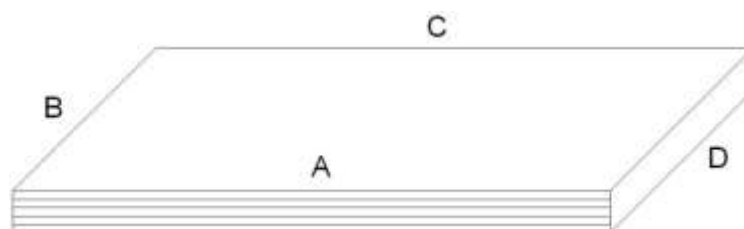


Figura 6.22 – Corpo de prova 2 – P136, antes do teste de carga (face A).

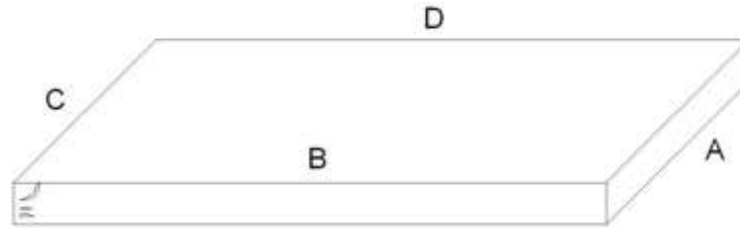


Figura 6.23 – Corpo de prova 2 – P136, antes do teste de carga (face B).

Tabela 6.20 - Acompanhamento dos incrementos de carga corpo de prova 2 – P136.

Tensão MPa	Reação do apoio	Leitura do extensômetro (mm)
5	Situação original não alterada	3,99
10	Situação original não alterada	8,93
15	O bojamento na face A acentuou-se; orçamento vertical na face B acentuou-se.	13,79
20	As anomalias continuaram a se desenvolver; na face B o aparelho começou a bojar e a apresentar fissuras generalizadas. A parte inferior começou a suspender por conta do bojamento.	19,22
25	As anomalias estabilizaram-se; o bojamento da face B progrediu.	22,15
30	O bojamento da face B progrediu.	26,88
35	Todas as anomalias estabilizaram- se.	30,40
40	Os bojamentos da face B progrediram; surgiu uma fissura na face A.	34,75
45	Surgimento de fissura de extensão igual à metade da face B; a fissura da face A foi ampliada.	37,27
50	Bojamento das faces C e D com levantamento da parte inferior; os bojamentos acentuaram-se nas faces A e B; rompimento de chapa fretante.	42,73

- Estado do apoio após alívio do carregamento, conforme Figura 6.24:
 - rompimento da chapa fretante e deformação do aparelho na face B;
 - as fissuras que ocorreram na face A não puderam ser verificadas após o alívio das cargas.

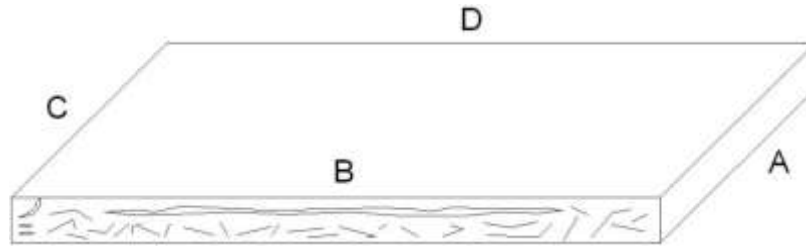


Figura 6.24 – Corpo de prova 2 – P136 rompimento de chapa fretante e aparelho deformado.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 RESULTADOS DA MONITORAÇÃO

Após o término da quarta campanha anual de monitoração, baseado nos resultados práticos, conclui-se que os aparelhos de apoio da ponte Rio-Niterói, mesmo não estando em suas plenitudes de capacidade de trabalho, podem continuar a servir à obra sem qualquer comprometimento à segurança. Com isso, evita-se expor a estrutura ao risco desnecessário de uma operação de substituição, a interrupções de tráfego e ao gasto de recursos com a errônea substituição de uma peça que ainda continua a contribuir de forma eficaz ao conjunto estrutural.

Conclui-se também que os aparelhos de apoio em neoprene que apresentam anomalias não necessitam ser automaticamente substituídos, desde que se constate a sanidade das estruturas em concreto por eles afetadas. Assim, somente os defeitos nos aparelhos de apoio, não credenciam a iminente troca dessas peças, havendo a necessidade complementar de que sejam vistoriados os segmentos estruturais por eles envolvidos. Caso não se observe nenhum defeito no corpo estrutural decorrente do mau funcionamento dos apoios, provocado pelas anomalias neles instaladas, a situação não se revela como crítica e permite que a eventual substituição seja processada quando isso não seja verificado.

Por fim, decorrente da análise do resultado das quatro campanhas de monitoração realizadas ao longo dos últimos 14 anos nos aparelhos de apoio mencionados, não foi detectado até o momento a necessidade de substituição de nenhum aparelho de apoio em neoprene da ponte Rio-Niterói, em qualquer trecho da obra.

7.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

O único aparelho de apoio que foi submetido aos ensaios de compressão simples, que não tinha qualquer anomalia decorrente do tempo em uso, foi o do Elevado da Avenida Perimetral. Por isso foi o aparelho que melhor se comportou durante os distintos estágios de carga.

No entanto, para a tensão de 60 MPa foi observado rasgamento do elastômero e descolamento entre a interface aço/borracha. Não foram vistas lesões nos cumes de 15 e 40 MPa. Comparativamente aos testes de campo em escala natural, o desempenho no ensaio com corpos de prova menores, extraídos de apoios em serviço, foi pior. No ensaio do aparelho em

verdadeira grandeza não ocorreram descontinuidades, mas apenas os bojamentos comuns advindos das solicitações impostas.

Nos corpos de prova 1 e 2 – R2, que já apresentavam uma série de anomalias antes de serem submetidos ao teste de compressão normal, foram detectadas progressões dos defeitos logo no estágio de tensão correspondente a 15 MPa, seguindo-se a mesma diretriz nas fases subsequentes de 30, 40 e 60 MPa. Portanto, o comportamento do corpo de prova reduzido foi mais degradante que os dos apoios em escala natural, que tiveram tensões de 15 MPa sem qualquer inconveniente. No caso do corpo de prova 1 – R2, houve ampliação dos defeitos pré-existentz nessa fase, mas sem provocar novo rasgamento da almofada, caso do corpo de prova 2 – R2.

No tocante aos corpos de prova 1 e 2 – P136, que também continham lesões variadas decorrentes dos seus mais de 40 anos em trabalho na estrutura, o comportamento dos corpos de prova em escala reduzida foi aquém do esperado, se comparado ao desempenho das almofadas submetidas à compressão normal em dimensões naturais. Enquanto as almofadas em verdadeira grandeza atingiram até 15 MPa sem qualquer alteração do seu estado físico original, caso do apoio 1 – P136, e 10 MPa com ampliação das descontinuidades, caso do apoio 2 – P136. Nos corpos de prova menores já se observavam perda de adesão borracha/metal com 15 MPa, além do agravamento do rasgamento do elastômero. Mais uma vez, confirma-se que o desempenho dos apoios em dimensões naturais foi superior ao daqueles em corpos de prova menores.

Não há comentários sobre o apoio novo, uma vez que o mesmo só foi submetido ao ensaio de compressão simples em verdadeira grandeza.

7.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM VERDADEIRA GRANDEZA

A análise dos resultados dos ensaios de campo com os apoios em uso a mais de 40 anos, caso da Ponte Rio-Niterói, e aproximadamente 37 anos, caso do Elevado da Perimetral, deve ser vista sob três ópticas: estágio de carregamento com 15 MPa, com 40 MPa e com o excedente dessa tensão. Contudo, fundamentalmente o nível de tensão de 15 MPa é determinante para que se estabeleça a segurança da almofada em serviço, tendo em conta que essa foi a tensão estabelecida nas premissas de projeto para as almofadas da ponte Rio-Niterói.

Com respeito ao aparelho de apoio do Elevado da Avenida Perimetral o teste mostrou que o comportamento da almofada foi sem lesões durante todo o seu decorrer. Ressalta-se que o apoio não continha qualquer anomalia antes do carregamento ser aplicado.

O gráfico tensão vs. Deformação, ilustrado na Figura 7.1, mostra o desempenho do aparelho durante o ensaio.

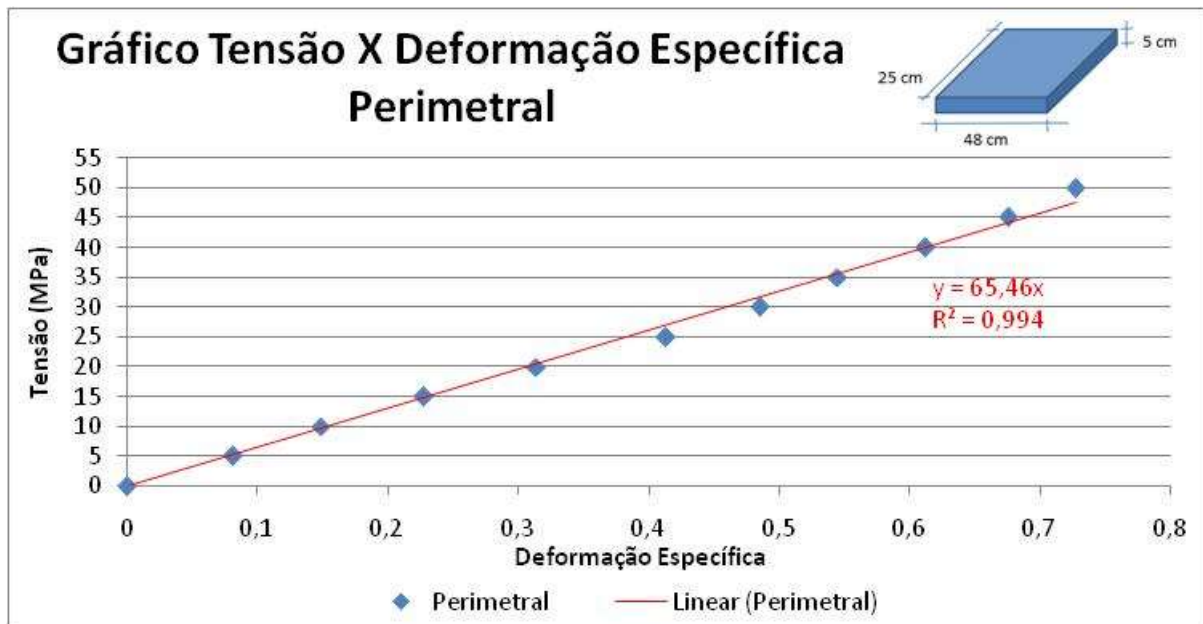


Figura 7.1 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova Perimetral.

Em relação ao aparelho de apoio novo, testado propositadamente para averiguação da implicação do não paralelismo das chapas fretantes, teve o seu desempenho durante o teste sem qualquer anormalidade. A Figura 7.2 ilustra o desempenho do aparelho durante o ensaio.

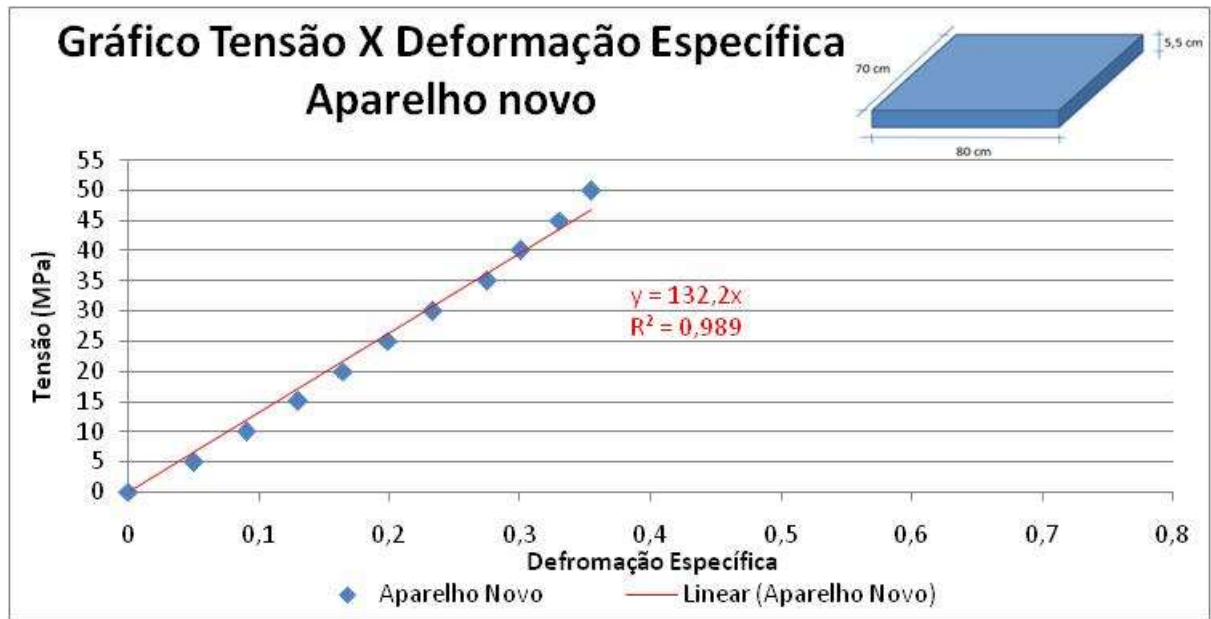


Figura 7.2 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova aparelho novo.

O corpo de prova 1 – R2 resistiu sem qualquer contratempo a tensão de 15 MPa. Portanto, mesmo com mais de 40 anos em serviço ainda foi capaz de suportar as solicitações para as quais foi concebido. Dessa fase até 45 MPa o desempenho do apoio foi normal, pois os acréscimos dos bojamentos já existentes e o surgimento de novos não configuram discontinuidades estruturais da almofada, mas tão somente seu trabalho normal. No patamar de tensão de 48 MPa ocorreu o rompimento vertical localizado do apoio, mas não o seu esmagamento. Em síntese, o apoio resistiu até três vezes a carga para o qual foi dimensionado, com mais de quatro décadas em serviço. Pode-se verificar o desempenho do aparelho durante o ensaio no gráfico da Figura 7.3.

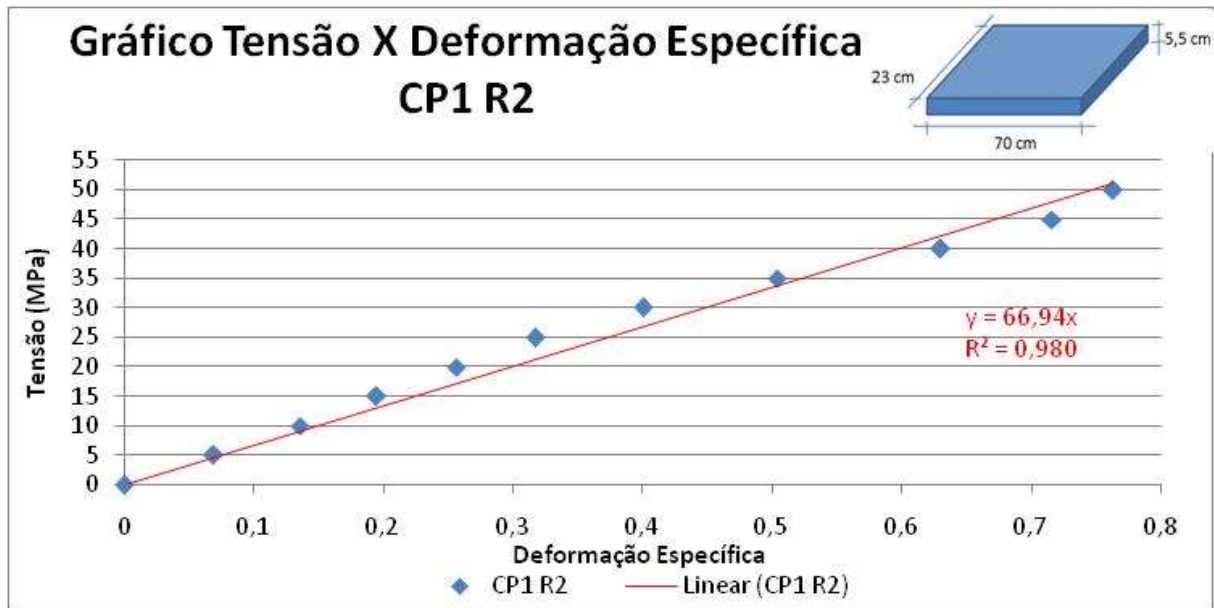


Figura 7.3 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 1 – R2.

O corpo de prova 2 – R2 teve o seu desempenho sem qualquer alteração do estado inicial até 10 MPa. De 15 a 40 MPa houve incrementos dos bojamentos já existentes, que se traduzem pela ação normal do apoio em serviço. No estágio de 45 MPa ocorreu o rasgamento de uma anomalia já existente, mas não o esmagamento da almofada. Assim para as condições normais de ação na estrutura o apoio se mostrou capacitado a atender a tensão de cálculo adotada em seu dimensionamento. A Figura 7.4 mostra o desempenho do aparelho durante o ensaio de compressão simples em verdadeira grandeza.

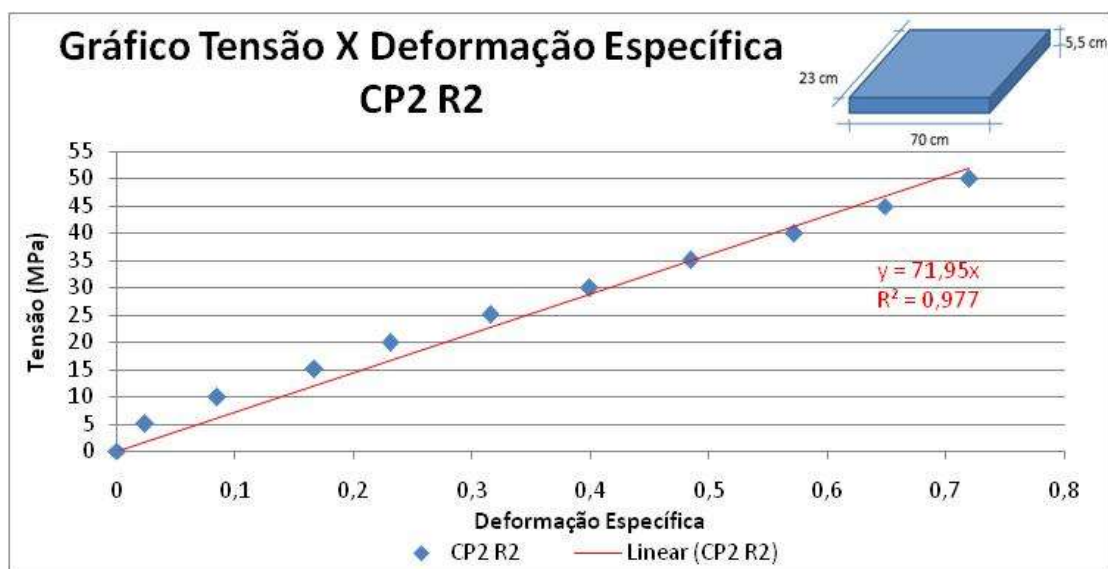


Figura 7.4 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 2 – R2.

No tocante ao corpo de prova 1 – P136, esse já se encontrava com algumas lesões antes da aplicação de qualquer carregamento. Até a fase de 15 MPa todas as anomalias se mantiveram com as mesmas dimensões. A partir dessa solicitação e até 40 MPa as lesões tiveram acréscimos de comprimento, mas não impuseram esmagamento ao apoio. Decorre desses fatos que a almofada também exibiu capacidade resistente para a força admitida no projeto. O gráfico tensão vs. Deformação, ilustrado na Figura 7.5, mostra o desempenho do aparelho durante o ensaio.

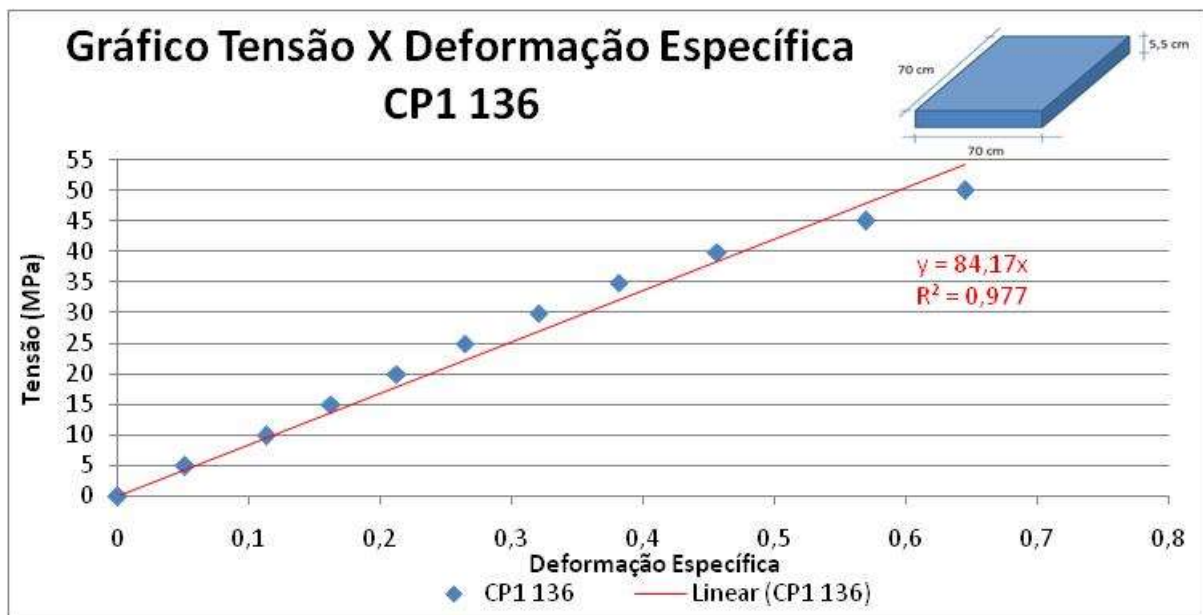


Figura 7.5 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 1 P136.

O corpo de prova 2 – P136, que antes mesmo de qualquer incidência de carga apresentava defeitos, não exibiu qualquer alteração até o patamar de 10 MPa. Com 15 MPa, tensão usada para o seu dimensionamento, as anomalias existentes ampliaram-se, mas não surgiu nova lesão. Com 20 MPa ocorreu um estado de fissuração generalizada. Entre 25 e 45 MPa novas lesões se manifestaram, mas sem rompimento da almofada. Com 50 MPa ocorreu o rompimento de uma chapa fretante (Figura 7.6).

Com esse perfil de desempenho o apoio resistiu à força de projeto, embora a sua situação física tenha sido alterada.

O rompimento de uma chapa fretante não causa surpresa, em razão de que a sua espessura era tão somente 0,7 mm. A NBR9783/1987 exige o mínimo de 2,0 mm de espessura para chapas fretantes. O gráfico tensão vs. Deformação, Figura 7.6, mostra o desempenho do aparelho durante o ensaio.

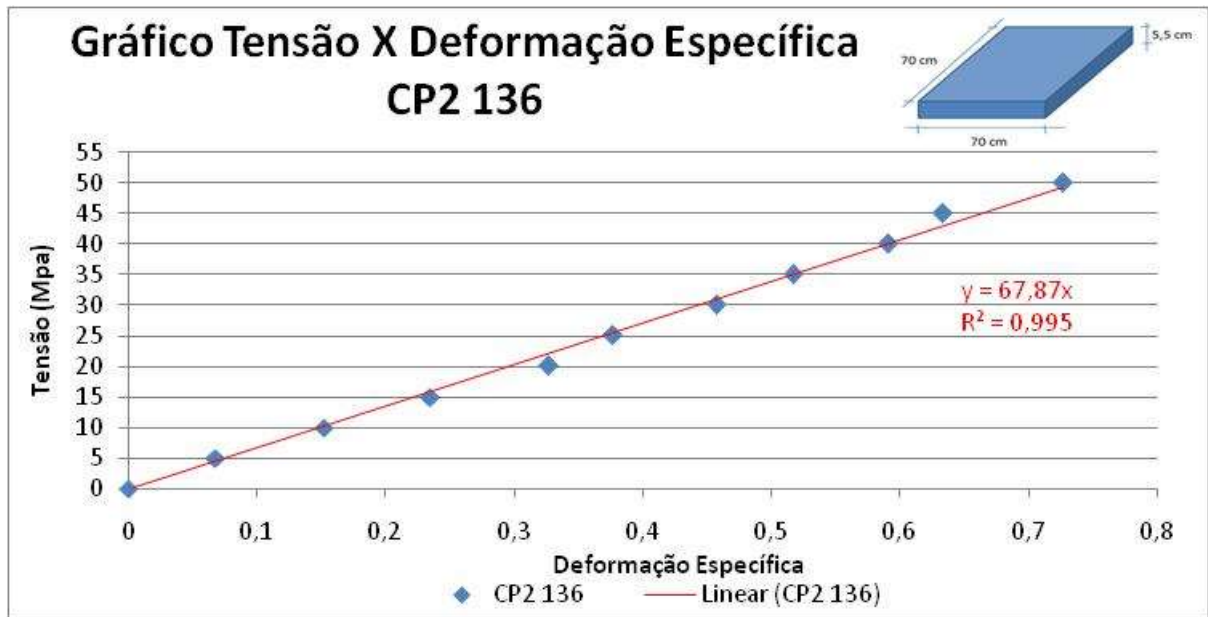


Figura 7.6 – Tensão vs. deformação específica corpo de prova 2 P136.

Há de se notar que nos corpos de prova de aparelhos, com mais de 40 anos de serviço ensaiados em verdadeira grandeza, a curva de deformação específica segue o mesmo padrão da curva de deformação específica de um aparelho novo, o que confirma o seu perfeito funcionamento em serviço.

A tabela 7.1 mostra o resumo dos dados obtidos nos ensaios de verdadeira grandeza.

Tabela 7.1 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de verdadeira grandeza.

TENSÃO (Mpa)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
PERMETAL	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	3,38	6,15	9,42	12,98	17,18	20,89	22,57	25,35	27,98	30,11
	COMPRIMENTO (mm)	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48	40,48
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	8,38	15,19	23,27	31,81	42,21	51,60	55,83	62,75	69,12	74,38
APARELHO NOVO	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	3,06	5,53	7,98	10,67	12,78	14,38	16,02	18,40	20,74	21,74
	COMPRIMENTO (mm)	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	4,98	9,01	12,98	17,38	20,81	23,43	26,10	29,86	33,79	35,43
CP1 82	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	3,08	7,07	10,16	13,36	16,54	20,89	26,26	32,05	37,38	39,28
	COMPRIMENTO (mm)	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18	52,18
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	5,90	13,55	19,48	25,61	31,71	39,83	50,32	61,41	71,46	75,28
CP2 82	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	1,21	4,48	8,62	11,94	16,38	20,62	25,03	29,58	33,53	37,38
	COMPRIMENTO (mm)	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78	51,78
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	2,33	8,65	16,45	22,85	31,63	39,74	48,33	57,13	64,50	72,21
CP1 136	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	2,04	5,08	8,47	11,89	13,79	16,73	19,92	23,05	26,24	31,28
	COMPRIMENTO (mm)	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38	52,38
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	3,90	9,69	16,17	22,70	26,31	31,94	38,03	44,01	50,08	59,74
CP2 136	DEFORMAÇÃO (mm)	0,00	3,38	8,93	13,79	19,22	22,15	26,88	30,48	34,75	37,77	42,23
	COMPRIMENTO (mm)	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88	50,88
	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)	0,00	6,64	17,55	27,10	37,77	43,51	52,83	60,08	68,32	74,25	82,99

Complementarmente foi realizada uma análise comparativa entre o módulo de elasticidade dos aparelhos ensaiados, com o módulo de elasticidade equivalente (ideal) ao

neoprene fretado na compressão, adotando-se para tal o preconizado na DIN-4141-14 mediante a aplicação da seguinte equação:

$$G = 13,26 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

$$\bar{E} = \left[0,3299 - 0,194 \left(\frac{a}{b} \right) \right] \cdot 3G \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (7.2)$$

onde

a = dimensão na direção longitudinal (cm).

b = dimensão na direção transversal (cm).

G = módulo de elasticidade transversal do neoprene (MPa).

t = espessura da camada de neoprene (cm).

Tabela 7.2 – Módulo de elasticidade: ensaios em verdadeira grandeza.

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade aferido em ensaio de compressão - E (MPa)	Valor normalizado - E ₀	a (cm)	b (cm)	G (kgf/cm ²)	t (cm)	Módulo de Elasticidade Equivalente (ideal) - E (MPa)	Valor normalizado - E ₀	E ₀ / E ₀
Novo	132,2	-	70	80	13,26	1,0	306,14		
Perimetral	65,86	0,495	25	48	13,26	1,2	38,75	0,127	3,9
CP1 R2	66,94	0,506	23	70	13,26	1,2	38,14	0,125	4,1
CP2 R2	77,95	0,590	23	70	13,26	1,2	38,14	0,125	4,7
CP1 136	84,17	0,637	70	70	13,26	1,2	180,40	0,589	1,1
CP2 136	67,87	0,513	70	70	13,26	1,2	180,40	0,589	0,9
Média		0,548						0,311	
Desvio Padrão		0,062						0,254	
Coeficiente de variação (%)		11,29						81,76	

A tabela 7.2, apresenta um comparativo entre o módulo de elasticidade ideal e o módulo de elasticidade aferido no ensaio de compressão.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

O tema “aparelhos de apoio”, sempre é alvo de opiniões divergentes, notadamente quando se trata de suas substituições.

Para se compreender e ter ciência mais aprofundada sobre apoios em elastômero é preciso estudos sobre a sua fabricação, seus componentes químicos, como funcionam as chapas fretantes, as curvas reométricas de vulcanização, os devidos ensaios de qualidade, incluindo-se o teste de compressão com força horizontal, seus posicionamentos na obra. Enfim, uma série de detalhes a serem considerados, possibilitando elucidar com mais clareza todo o desempenho estrutural de uma almofada elástica em policloropreno. Em não havendo esse conhecimento técnico, as dúvidas sempre ocorrerão.

O problema maior a ser analisado é quanto ao instante em que o apoio deve ser retirado da estrutura para a colocação de um apoio novo.

Na Ponte Rio-Niterói essa incerteza foi sanada com a monitoração de 88 almofadas em serviço desde a época de sua construção, portanto, a aproximadamente 40 anos.

Os estudos teóricos e experimentais geraram essa monitoração e vêm até então servindo de orientação para evitar as discordâncias quanto a necessidade da troca ou não dos aparelhos de apoio. Isso tem funcionado a contento, não havendo qualquer estrutura de concreto lesionada por mau funcionamento de almofadas elásticas.

Verificou-se que a evolução do quadro patológico identificado nas monitorações realizadas desde o ano 2000, portanto, a 14 anos, pouco evoluiu desde a primeira inspeção.

No início da pesquisa havia dúvida se o teste de compressão normal em corpo de prova extraído de apoios originais, como recomenda a NBR9783/1987, poderia provocar distorções nos resultados, devidas ao tipo de amostra, uma vez que essa não teria as lesões que ocorrem na periferia das almofadas.

Entretanto, contrariando as premissas iniciais, os resultados obtidos revelaram exatamente o inverso do que se supunha, pois todos os aparelhos de apoio em tamanho natural, testados à compressão simples, exibiram melhor desempenho do que os corpos de prova em escala reduzida. Assim, não há motivo para se contestar o que indica aquela

especificação, pois em se fazendo os testes em corpos de prova menores agrega-se segurança aos valores obtidos.

Na Tabela 8.1, considerando que a deformação ocorrida no corpo de prova aparelho novo foi equivalente a 16% da altura média, e que esse corpo de prova reflete o que se espera de um aparelho de apoio em serviço, observou-se que as deformações ocorridas nos demais corpos de prova mantiveram coerência com o valor apresentado pelo corpo de prova de referência, e na maioria dos casos apresentaram valores menores do que esse, considerando-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Na Tabela 7.2, tem-se a análise comparativa entre o módulo de elasticidade dos aparelhos ensaiados e o módulo de elasticidade equivalente (ideal) do neoprene fretado na compressão. Verificou que houve um acréscimo nos módulos de elasticidade dos aparelhos estudados, considerando-se os valores normalizados, o que indica que tal variação deve-se a alterações nas condições do neoprene.

A tabela 8.1 mostra o comparativo da deformação ocorrida nos corpos de prova durante os ensaios de compressão simples nos patamares entre 5 e 15MPa.

Tabela 8.1 – Comparativo da deformação (entre 5 e 15 MPa) x altura média dos corpos de prova.

Corpo de Prova	Deformação (mm)	Altura média (mm)	Deformação / h média
CP1 R2	6,0	52,1	12%
CP2 R2	7,0	51,7	13%
PERIMETRAL	6,0	41,4	15%
AP. NOVO	9,6	61,3	16%
CP1 136	5,0	52,3	10%
CP2 136	9,8	58,8	17%
Média	7,2	52,9	14%
Desvio Padrão	2,0	6,9	3%
Coeficiente de Variação	28%	13%	20%

Independente do modelo de ensaio realizado, quer seja com corpo de prova em escala reduzida como preconizado na NBR9783/1987, ou em verdadeira grandeza como o realizado nesta pesquisa, os resultados obtidos à compressão simples estão alinhados com os valores adotados em projeto que são superiores as solicitações reais em serviço na estrutura. Conclui-se que a monitoração continuada dos aparelhos de apoio de uma obra pode evitar a substituição prematura ou desnecessária dos mesmos, o que evita que a estrutura seja posta à

situação de risco desnecessária, e que vultosas quantias sejam despendidas sem que haja a real necessidade de tal.

Complementarmente, esta pesquisa visa também mostrar que o paralelismo das chapas fretantes não necessita assumir limites tão rigorosos conforme consta na especificação NBR9783/1987, em razão de que um aparelho de apoio novo que foi recusado exatamente por não paralelismo de chapas fretantes, conforme exigido por essa especificação, teve excelente desempenho face às cargas compressivas a ele impostas.

Observou-se que o ensaio à compressão simples em corpos de prova menores, extraídos de apoios em dimensões naturais, resguarda o aspecto pecuniário, pois o teste em verdadeira grandeza pode ser muito mais dispendioso.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras recomenda-se:

- 1) estudar o comprometimento do elastômero dos aparelhos de apoio pela exposição diretamente ao ambiente marinho;
- 2) analisar o custo social e ambiental de uma troca de aparelhos de apoio em uma via principal como o caso da ponte Rio-Niterói;
- 3) pesquisar o desempenho das chapas fretantes em função de sua espessura e proporcionalidade com as camadas elementares em aparelhos de apoio de elastômero;
- 4) compilar dados de estudos similares realizados por outros pesquisadores para se estudar a influência dos diversos tipos de elastômeros, parâmetros físicos e geométricos;
- 5) realizar uma pesquisa com modelagem numérica para se avaliar a simulação do comportamento estrutural desses elementos face aos diversos estágios de carga;
- 6) estudar a aderência da chapa fretante-neoprene por meio de ensaios, comparando-se os resultados com os dos modelos teóricos.

REFERÊNCIAS

PFEIL, WALTER **PONTE PRESIDENTE COSTA E SILVA, RIO-NITERÓI: MÉTODOS CONSTRUTIVOS**, LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS, RIO DE JANEIRO, BRASIL, 1975.

NBR 9783 – **APARELHOS DE APOIO DE ELASTÔMERO FRETADO**, RIO DE JANEIRO, BRASIL, 1987.

NBR 6118 – **PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO**, RIO DE JANEIRO, BRASIL, 2004.

NEOPREX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDACATÁLOGO TÉCNICO, SÃO PAULO, BRASIL, 2000.

SIQUEIRA, CARLOS HENRIQUE P. **APARELHOS DE APOIO DE ELASTÔMERO FRETADO, UMA VISÃO TÉCNICO ECONÔMICA**, DISSERTAÇÃO DE M.SC. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, NITERÓI.

DNER, **LIVRO COMEMORATIVO DOS 10 ANOS DE INAUGURAÇÃO DA PONTE PRESIDENTE COSTA E SILVA**, RIO DE JANEIRO, 1984.

ELASTOTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ARTEFATOS DE BORRACHA LTDACATÁLOGO/RELATÓRIO TÉCNICO, SÃO PAULO, BRASIL, 2009.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, **MANUAL DE INSPEÇÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS – 2ª EDIÇÃO** – RIO DE JANEIRO, BRASIL, 2004.

FREYSSINET INTERNATIONAL, **APPAREILS D'APPUI EN ELASTOMÈRE FRETTE – PUBLICAÇÃO TÉCNICA** – FRANÇA – 1986.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, **NORMA DNIT 091/2006 – ES - TRATAMENTO DE APARELHOS DE APOIO: CONCRETO, NEOPRENE E METÁLICOS – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO** – RIO DE JANEIRO, BRASIL, 2004.

AASHTO AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIAL **-LRFD BRIDGE CONSTRUCTION SPECIFICATIONS – 3RD EDITION – SECTION 18 BEARINGS DEVICES** – UNITED STATES, 2010.

EUROCODE, **EN 1337-3 STRUCTURAL BEARINGS- PART 3: ELASTOMERIC BEARINGS**- EUROPE, 2005.

[HTTP://TECNOADHESIVOS.COM](http://tecnoadhesivos.com)– VISITADO EM 25/11/2014.

[HTTP://WWW.QUIMICA.COM.BR](http://www.quimica.com.br)– VISITADO EM 05/09/2014.