

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**CONTRIBUIÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE
DEFORMAÇÃO À COMPRESSÃO DE APARELHOS DE APOIO
ELASTOMÉRICOS SIMPLES**

Renata Soares Merlos

São Carlos
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**CONTRIBUIÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE
DEFORMAÇÃO À COMPRESSÃO DE APARELHOS DE APOIO
ELASTOMÉRICOS SIMPLES**

Renata Soares Merlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Soares Merlos, Renata

Contribuição para determinação do módulo de deformação à compressão de aparelhos de apoio elastoméricos simples / Renata Soares Merlos. -- 2019.

96 f.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

Banca examinadora: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, Prof. Dr. Ricardo Carrazedo, Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho

Bibliografia

1. aparelhos de apoio elastoméricos simples. 2. ensaio de compressão. 3. deformação por compressão. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Renata Soares Merlos, realizada em 25/06/2019:

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. Ricardo Carrazedo
EESC/USP

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho
UFSCar

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho aos meus pais, Fabiana
e Roberto, com todo meu amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar o dom da vida.

Ao meu orientador, Marcelo de Araújo Ferreira, exemplo de pessoa e profissional, pela amizade, apoio, confiança e incansável dedicação.

À querida amiga, Bruna Catoia, por trazer alegria aos dias mais difíceis e pelo indispensável auxílio na realização da pesquisa. Exemplo de força e superação.

Aos meus pais, Fabiana e Roberto, pelo suporte e amor incondicional, sem vocês nada seria possível.

Aos meus irmãos, Paula e Roberto, por serem minha inspiração e motivo dos meus sorrisos, mesmo nos dias mais difíceis, são a luz da minha vida.

Ao meu namorado, Lucas, por estar sempre presente e por me fazer acreditar que seria possível realizar esse sonho. Seu amor me faz uma pessoa melhor.

Aos meus familiares, minha eterna gratidão, por compartilharem comigo desse sonho e por serem meu porto seguro. Vocês são a razão de tudo.

Aos meus amigos, por todo amor, força, incentivo e apoio incondicional, são meu ponto de paz e felicidade.

Ao amigo, João Lucas, por compartilhar comigo todos os momentos dessa etapa e pelo grande auxílio na realização dos ensaios.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSCar, por colaborarem em meu crescimento pessoal e profissional.

À LEONARDI Pré-Fabricados, à Usicon Construções Pré-Fabricados e à NEOPREX, pela doação de elementos utilizados nessa pesquisa.

EPÍGRAFE

*“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”
(Carl G. Jung)*

RESUMO

MERLOS, Renata Soares. **Contribuição para determinação do módulo de deformação à compressão de aparelhos de apoio elastoméricos simples**. 2019. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Área de Concentração: Estruturas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

Os elastômeros, conhecidos comercialmente como *neoprene*, têm sido empregados em larga escala nas construções pré-moldadas de concreto no Brasil, diante de seu bom desempenho no que se refere à melhoria da distribuição de cargas nas ligações submetidas à compressão. Embora os aparelhos de apoio elastoméricos sejam os mais utilizados atualmente, o seu comportamento frente aos efeitos da compressão é complexo. Essa complexidade de comportamento advém, principalmente, da diferença das propriedades do elastômero em relação aos outros materiais comumente utilizados pelos engenheiros e da alteração das configurações de tensões e deformações dos elastômeros à medida que as tensões de compressão são aumentadas. Nesse sentido, essa pesquisa visou caracterizar, por meio de um programa experimental, o comportamento à compressão simples dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, através da determinação experimental do módulo tangente de deformação à compressão (módulo de elasticidade aparente) e da rigidez à compressão desses elementos. Diante da realização do programa experimental proposto nessa pesquisa, bem como das análises dos resultados dos ensaios, verificou-se que a calibração do equacionamento estabelecido pela NBR 9062:2017 se mostrou satisfatória para avaliar a deformabilidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado. Ainda, observou-se que os ensaios podem ser utilizados para verificação da conformidade dos valores de módulo de deformação transversal obtidos experimentalmente, em relação aos valores indicativos de correspondência com a dureza Shore A e, desse modo, pode ser feito o controle de qualidade do elastômero. Também, foi possível a adequação de um procedimento que pudesse ser reproduzido com equipamentos simples, isso é, atuador hidráulico com controle da velocidade de aplicação de força e, além disso, verificou-se que quanto maior a velocidade de aplicação do carregamento no ensaio, maior é a rigidez obtida para um aparelho de apoio elastomérico não fretado.

Palavras-chave: pré-moldado, procedimento experimental, aparelhos de apoio elastoméricos simples, elastômero, ensaio de compressão, deformação por compressão.

ABSTRACT

MERLOS, Renata Soares. **Contribution for the determination of the compression modulus of plain elastomeric bearing pads.** 2019. 96p. Federal University of São Carlos, São Carlos, 2019.

The elastomers, also known as neoprene, have been widely used in the precast concrete constructions in Brazil, due to its good performance in connections subjected to compression. Thus elastomeric bearing pads are the most commonly used today, their behavior on compressed elements is complex. This complexity of behavior derives mainly from the difference in the properties of the elastomer relative to other commonly used materials and from the variation of stresses and deformations of the elastomers as the compression stresses are increased. In this sense, this study aimed to characterize, through an experimental program, the behavior to the simple compression of the plain elastomeric bearing pads, through the experimental determination of the tangent compression modulus of deformation (modulus of elasticity) and the compression stiffness of these elements. Through the experimental program proposed in this study, as well as the analysis of the tests results, it was confirmed that the calibration of the equation established by NBR 9062: 2017 was satisfactory to evaluate the deformability of the plain elastomeric bearing pads. Furthermore, the tests can be used to verify the conformity of the shear modulus values obtained experimentally, relative to the values indicative of correspondence with the Shore A hardness and, therefore, the quality control of the elastomer. Also, it was possible to adequacy a procedure that could be reproduced with simple equipment, that is, hydraulic actuator with constant force application. Finally, it was found that the higher the speed of application of the load in the test, the greater the rigidity obtained for a plain elastomeric bearing pad.

Key-words: precast, experimental procedure, plain elastomeric bearing pads, elastomer, compression test, deflection.

Figura 1.1: Ligação viga-pilar com junta horizontal de chumbador e aparelho de apoio elastomérico.....	15
Figura 2.1: Exemplos de ligações com aparelhos de apoio elastoméricos simples.....	21
Figura 2.2: Razões para o uso de aparelhos de apoio elastoméricos.....	21
Figura 2.3: Aparelhos de apoio elastoméricos (a) Simples e (b) Fretado.....	22
Figura 2.4: Variação do módulo G em função do tipo e da duração do carregamento.....	24
Figura 2.5: Comportamento geral dos aparelhos de apoio elastoméricos (a) Submetidos à compressão. (b) Deformação por compressão.....	26
Figura 2.6: Efeito da rugosidade da superfície de contato em aparelhos de apoio elastoméricos submetidos à compressão.....	26
Figura 2.7: Geometria do aparelho de apoio de elastômero (a) sem furo (b) com furo.....	27
Figura 2.8: Compressão através de camadas de diferentes materiais.....	28
Figura 2.9: Compressão através do concreto e aparelho de apoio elastomérico.....	29
Figura 2.10: Expansão lateral do aparelho de apoio elastomérico.....	30
Figura 2.11: Limitações para a largura do aparelho de apoio entre elementos de concreto.....	31
Figura 2.12: Variação da expansão lateral para diferentes espessuras de aparelho de apoio elastomérico.....	31
Figura 2.13: Configurações de tensões e deformações para um aparelho de apoio elastomérico simples submetido à compressão.....	32
Figura 2.14: Deformação por compressão para diferentes valores de fator de forma.....	33
Figura 2.15: Deformação por cisalhamento do aparelho de apoio elastomérico.....	34
Figura 2.16: Absorção da força horizontal pelo chumbador.....	34
Figura 2.17: Curva <i>tensão de compressão x deformação</i> no regime elástico.....	37
Figura 2.18: Aparelho de apoio elastomérico sem restrição para os efeitos de distorção e rotação.....	38
Figura 2.19: Aparelho de apoio elastomérico com restrição ao deslocamento lateral por meio de chumbadores.....	39
Figura 2.20: Aparelho de apoio elastomérico com restrições tanto à distorção lateral, quanto para rotação no apoio da viga.....	40
Figura 3.1: Comportamento de aparelhos de apoio elastoméricos fretados e simples submetidos à compressão.....	41
Figura 3.2: Diagrama esquemático do equipamento de ensaio de compressão, conforme EN 1337:2016.....	42
Figura 3.3: Procedimento de aplicação de carregamento no procedimento de ensaio nível 1, conforme EN 1337:2016.....	43
Figura 3.4: Procedimento de aplicação de carregamento alternativo no procedimento de ensaio nível 1, conforme EN 1337:2016.....	43
Figura 3.5: Equipamento de ensaio de compressão utilizado por Ferreira (1999).....	44
Figura 3.6: Gráfico obtido no ensaio de compressão simples (Série A – CP1).....	45
Figura 3.7: Gráficos obtidos nos ensaios de compressão simples (Série B – CP1).....	46
Figura 3.8: Diagrama esquemático do ensaio de cisalhamento.....	48
Figura 3.9: Detalhamento em vista do esquema de ensaio de cisalhamento.....	48
Figura 3.10: Detalhamento em planta do esquema de ensaio de cisalhamento.....	48
Figura 3.11: Elementos do esquema de ensaio de cisalhamento.....	49
Figura 3.12: Esquema de ensaio de cisalhamento.....	49
Figura 3.13: Procedimento de aplicação de carregamento no ensaio de cisalhamento.....	49

Figura 3.14: Diagrama esquemático do equipamento de ensaio de compressão em aparelho de apoio simples entre chapas metálicas.	50
Figura 3.15: Vista frontal do esquema de ensaio de compressão.	51
Figura 3.16: Vista superior do esquema de ensaio de compressão.	51
Figura 3.17: Procedimento de aplicação de carregamento no ensaio de compressão.	52
Figura 3.18: Curva <i>tensão de compressão x deformação</i> a ser obtida no ensaio de compressão.	52
Figura 4.1: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 3 MPa.	57
Figura 4.2: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 7 MPa.	57
Figura 4.3: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 10 MPa.	58
Figura 4.4: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 3 MPa.	58
Figura 4.5: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 7 MPa.	58
Figura 4.6: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 10 MPa.	59
Figura 4.7: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 3 MPa.	59
Figura 4.8: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 7 MPa.	59
Figura 4.9: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 10 MPa.	60
Figura 5.1: Esquema geral de ensaio.	62
Figura 5.2: Lote A (a) Corpo de prova 1 (b) Corpo de prova 2.	64
Figura 5.3: Lote B (a) Corpo de prova 1 (b) Corpo de prova 2 (c) Corpo de prova 3.	65
Figura 5.4: Nomenclatura adotada para os ensaios.	65
Figura 5.5: Blocos B01/B02.	66
Figura 5.6: Dimensões dos blocos B01/B02 (medidas em cm).	67
Figura 5.7: Detalhamento da armadura dos blocos (medidas em cm).	67
Figura 5.8: Verificação do posicionamento do bloco B01.	69
Figura 5.9: Posicionamento do bloco B02.	70
Figura 5.10: Posicionamento da rótula para receber o carregamento.	70
Figura 5.11: Vistas e planta do esquema de instrumentação dos modelos.	71
Figura 5.12: Vista frontal da instrumentação dos modelos.	72
Figura 5.13: Vista lateral e superior da instrumentação dos modelos.	72
Figura 5.14: Detalhes da instrumentação. (a) Célula de Carga. (b) Transdutores TD1 e TD2. (c) Transdutores TD3 e TD4.	73
Figura 5.15: Sistema de aquisição de dados e computador.	73
Figura 5.16: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo A.	75
Figura 5.17: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-1 sem descontar os deslocamentos iniciais influenciados pela acomodação do aparelho de apoio.	76
Figura 5.18: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-1 descontando os deslocamentos iniciais para a série 0.	77
Figura 5.19: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo B.	77
Figura 5.20: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo B na série de ensaio complementar com carregamento lento.	78
Figura 5.21: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-2 sem descontar os deslocamentos iniciais influenciados pela acomodação do aparelho de apoio.	78
Figura 5.22: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-2 descontando os deslocamentos iniciais para a série 0.	79
Figura 5.23: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-1.	80
Figura 5.24: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-2.	81
Figura 5.25: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-3.	81
Figura 6.1: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo A-1.	83

Figura 6.2: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo A-2.....	83
Figura 6.3: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-1.....	84
Figura 6.4: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-2.....	84
Figura 6.5: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-3.....	85
Figura 6.6: Influência da velocidade de aplicação do carregamento.....	87
Figura B.1: Aplicação das cargas de ensaio à compressão.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de dureza Shore A.....	23
Tabela 2.2: Correspondência entre dureza e o módulo G, à temperatura de 20 °C, de acordo com a NBR 9062:2017	24
Tabela 2.3: Correspondência entre dureza e o módulo G, de acordo com a EN 1337:2016.....	25
Tabela 2.4: Correspondência entre dureza e o módulo G, de acordo com	25
Tabela 2.5: Limites para σ_m segundo a resistência do concreto	36
Tabela 4.1: Parâmetros dos aparelhos de apoio ensaiados em Ferreira (1999).....	55
Tabela 4.2: Valores de módulo G aparente para a série A de ensaios.....	56
Tabela 4.3: Valores de módulo G estimados para a série B de ensaios	60
Tabela 5.1: Parâmetros referentes aos aparelhos de apoio do Lote A.....	64
Tabela 5.2: Parâmetros referentes aos aparelhos de apoio do Lote B	65
Tabela 5.3: Relação das barras dos blocos	68
Tabela 5.4: Resumo da quantidade de aço utilizada na armadura dos blocos.....	68
Tabela 5.5: Resumo dos instrumentos utilizados nos ensaios	74
Tabela 6.1: Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e segundo equacionamento da NBR 9062:2017	85
Tabela 6.2: Módulo de deformação transversal aparente obtido através do módulo de elasticidade aparente.....	86
Tabela A.1: Fator de forma obtido para os modelos ensaiados.....	94
Tabela B.1: Cargas de ensaio obtidas para os modelos ensaiados	96

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 GERAL.....	18
1.3.2 ESPECÍFICOS	18
1.4 METODOLOGIA.....	18
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 TRANSFERÊNCIA DE FORÇAS EM LIGAÇÕES DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO.....	21
2.2 APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS.....	22
2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	23
2.3.1 DUREZA.....	23
2.3.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL.....	23
2.3.3 CORRESPONDÊNCIA ENTRE DUREZA SHORE A E O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL G.....	24
2.3.4 COEFICIENTE DE POISSON	25
2.4 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	25
2.5 EFEITOS DA COMPRESSÃO NOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	28
2.5.1 EXPANSÃO LATERAL.....	30
2.5.2 DEFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO.....	32
2.5.3 DEFORMAÇÃO POR CISALHAMENTO	34
2.6 LIMITES PARA AS PRESSÕES DE CONTATO NOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	35
2.7 ELASTICIDADE DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES.....	36
2.7.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE	36
2.7.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE	37
2.8 DIFERENTES SITUAÇÕES DE PROJETO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	38
3. MÉTODOS DE ENSAIOS.....	41
3.1 MÉTODOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS.....	41
3.1.1 MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS FRETADOS	42

3.1.2	MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS NÃO FRETADOS	44
3.2	MÉTODOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL DO ELASTÔMERO	47
3.2.1	MÉTODO DE ENSAIO DE CISALHAMENTO PURO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL.....	47
3.2.2	MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL.....	50
4.	<i>NOVA ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM FERREIRA (1999)</i>	54
4.1	MOTIVAÇÃO DA NOVA ANÁLISE DE FERREIRA (1999)	54
4.2	RESULTADOS OBTIDOS NA NOVA ANÁLISE DE FERREIRA (1999).....	54
5.	<i>PROGRAMA EXPERIMENTAL</i>	62
5.1	DESCRIÇÃO GERAL	62
5.2	APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES	63
5.3	BLOCOS.....	66
5.4	DEFINIÇÃO, PREPARAÇÃO E MONTAGEM DOS MODELOS	68
5.5	INSTRUMENTAÇÃO.....	70
5.5.1	METODOLOGIA ADOTADA PARA OS TRANSDUTORES	74
5.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	74
5.6.1	LOTE A	75
5.6.2	LOTE B	80
6.	<i>ANÁLISE DOS RESULTADOS</i>	82
6.1	RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO EXPERIMENTALMENTE E SEGUNDO A NBR 9062:2017	82
6.2	VERIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL OBTIDO EXPERIMENTALMENTE	86
6.3	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO	87
7.	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	88
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8.	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	90
	<i>APÊNDICE A</i>	93
	<i>APÊNDICE B</i>	95

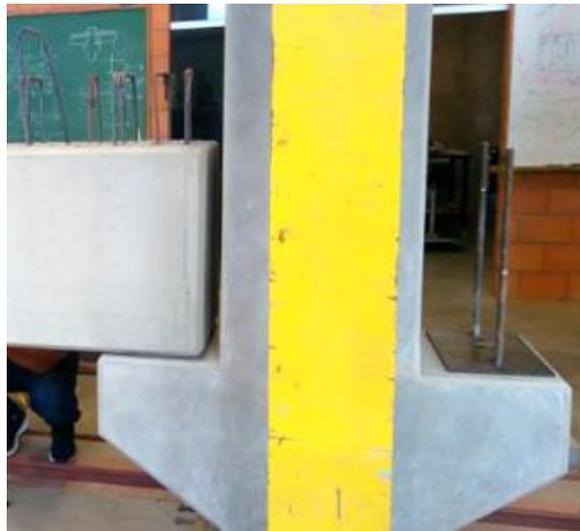
1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O emprego da estrutura de concreto pré-moldado na construção civil tem se destacado de forma expressiva em vários segmentos do mercado, em razão de garantir economia, durabilidade, segurança e versatilidade arquitetônica. Em relação ao comportamento estrutural, o que diferencia a estrutura pré-moldada de uma estrutura convencional moldada no local, é basicamente a presença de ligações. Segundo o FIB (2008), uma ligação consiste em vários componentes que interagem entre si quando o sistema é carregado. Seu principal objetivo é transferir forças entre os elementos de concreto e, desse modo, garantir o comportamento estrutural pretendido.

No caso de ligações solicitadas predominantemente por forças de compressão, a transferência dessas forças é prevista através do uso de aparelhos de apoio, que podem ser de aço, argamassas ou elastômeros (Figura 1.1).

Figura 1.1: Ligação viga-pilar com junta horizontal de chumbador e aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: Barros (2018).

Os aparelhos de apoio de elastômero, conhecidos comercialmente como *neoprene*, têm sido utilizados em larga escala nas construções pré-moldadas de concreto no Brasil a partir da década de 60, diante de seu bom desempenho quanto à durabilidade e conservação de características físicas ao longo do tempo (BRAGA, 1986 e FERREIRA, 1999).

O objetivo de sua utilização é melhorar a distribuição de cargas concentradas e reações sobre a superfície, assim como permitir deformações limitadas de deformação por cisalhamento e de rotação nos apoios, o que proporciona alívio de tensões. Além disso, o aparelho de elastômero impede o contato direto concreto-concreto e, conseqüentemente, evita o desgaste das peças pré-moldadas de concreto (DITZ, 2015).

Embora os aparelhos de apoio elastoméricos sejam os mais utilizados atualmente, o seu comportamento frente aos efeitos da compressão é complexo e, desse modo, podem não corresponder às expectativas de projeto.

A complexidade do comportamento dos aparelhos de apoio elastoméricos advém, principalmente, da diferença das propriedades do elastômero em relação aos outros materiais comumente utilizados pelos engenheiros. Ainda, as configurações de tensões e deformações por compressão em serviço dos elastômeros altera-se à medida que as tensões de compressão são aplicadas.

Para tensões de compressão muito baixas, verifica-se uma maior resistência às deformações na região central do aparelho de apoio, em relação à resistência das regiões periféricas. À medida que as tensões aumentam, a expansão lateral também aumenta e, desse modo, tem-se uma nova configuração, na qual as tensões de compressão distribuem-se de maneira mais uniforme, o que resulta em um aumento da resistência às deformações em toda a superfície do aparelho de apoio. Assim, entende-se que conforme a tensão normal à compressão aumenta, a rigidez à compressão do aparelho de apoio elastomérico simples também aumenta (FERREIRA, MERLOS, CATOIA, 2018).

Segundo a NBR 9062:2017, a deformação por compressão em serviço deve ser limitada a 15% da espessura nos aparelhos de apoio elastoméricos simples, recomendando-se utilizar valores experimentais em função da dureza e do fator de forma para a sua obtenção. Além disso, embora ocorram diferentes tensões de compressão nas regiões central e periféricas da superfície do aparelho de apoio, a nível de dimensionamento utiliza-se uma pressão média de contato distribuída uniformemente no elastômero, a qual é limitada a 7 MPa pela norma brasileira.

A NBR 9062:2017 também recomenda que sejam adotados dispositivos que garantam a limitação das deformações por cisalhamento nos aparelhos de apoio, como o chumbador. Pode-se dizer, então, que não ocorrem efeitos de distorção importantes e conclui-se que o efeito de maior representatividade do comportamento dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados é a deformação por compressão.

Nesse sentido, essa pesquisa teve por objetivo a caracterização do comportamento à compressão simples dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, através da

determinação experimental do módulo tangente de deformação à compressão (módulo de elasticidade aparente) e da rigidez à compressão desses elementos.

Dado que não há método padronizado de ensaio de compressão simples para os aparelhos de apoio elastoméricos não fretados no Brasil, fez-se necessário o desenvolvimento e validação de um procedimento que delimitasse o escopo dessa pesquisa. Para isso, foi feita uma extensa revisão de bibliografia nacional e internacional e diversos procedimentos foram discutidos e analisados.

Ainda, de modo a fornecer uma contribuição ao entendimento do complexo comportamento à compressão dos aparelhos de apoio elastoméricos, essa pesquisa apresenta uma revisão a esse respeito, com enfoque às propriedades dos elastômeros. Também, são apresentados importantes critérios de projeto e especificações nacionais e internacionais são descritas e comparadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os elastômeros são utilizados amplamente em todo o mundo para diversos tipos de aplicação. No Brasil, são usados com frequência no setor da construção pré-moldada de concreto, principalmente como aparelho de apoio para vigas, lajes e painéis.

Embora os aparelhos de apoio elastoméricos sejam os mais utilizados atualmente, o seu comportamento frente aos efeitos da compressão é complexo e ainda não é bem compreendido pelos engenheiros estruturais, desse modo, podem não corresponder às expectativas de projeto.

Além disso, o uso desse tipo de aparelho nas construções pré-moldadas baseia-se em especificações de projeto de fabricantes e normatização nacional e internacional. No entanto, a maior parte dessas especificações pertencem aos aparelhos de apoio fretados, utilizados na construção de pontes, onde são projetados para transferir grandes cargas verticais e horizontais, incluindo também os movimentos devido às mudanças de temperatura.

O comportamento dos aparelhos fretados é diferente dos não fretados, pois as chapas metálicas limitam os deslocamentos laterais dos aparelhos de apoio devido ao efeito do confinamento. Logo, as especificações de projeto para os aparelhos fretados não são adequadas aos aparelhos de apoio elastoméricos simples.

Portanto, ainda que haja referências bibliográficas relacionadas ao tema de estudo, fica evidente a necessidade de procedimentos de projeto e métodos de ensaio específicos para aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, especialmente adequados para o uso na construção de concreto pré-moldado, o que reforça a importância dada à presente pesquisa.

Por fim, deve-se enfatizar a necessidade de disseminação de conhecimento adequado à realidade da construção civil no Brasil.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GERAL

Esse trabalho teve por objetivo geral a caracterização do comportamento à compressão simples dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, através da determinação experimental do módulo tangente de deformação à compressão (módulo de elasticidade aparente) e da rigidez à compressão desses elementos.

1.3.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Reunir condições para desenvolver e validar um método de ensaio de compressão simples em aparelhos de apoio elastoméricos não fretados;
- Caracterizar a relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e segundo a NBR 9062:2017, de modo a verificar a calibração do equacionamento da norma para a deformação por compressão em serviço;
- Verificar a conformidade dos valores de módulo de deformação transversal obtidos experimentalmente, em relação aos valores indicativos de correspondência com a dureza Shore A;
- Analisar a influência da velocidade de aplicação do carregamento nos ensaios de compressão.

1.4 METODOLOGIA

Para que os objetivos propostos na presente pesquisa fossem atingidos, foi utilizada a seguinte metodologia:

- Realização de ampla pesquisa bibliográfica acerca do tema, a fim de se obter conhecimento teórico e experimental através das pesquisas já desenvolvidas relacionadas ao assunto e de se consolidar tópicos fundamentais ao entendimento dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados;

- Determinação dos modelos de ensaio. Estudo e definição da instrumentação de ensaio;
- Elaboração detalhada do programa experimental e metodologia de pesquisa;
- Aquisição de materiais e preparação do laboratório NETPre (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) – UFSCar;
- Realização dos ensaios preliminares, nos quais foram testados dois diferentes protocolos, de modo a definir a velocidade de aplicação de carregamento;
- Realização dos ensaios de compressão simples em aparelhos de apoio elastoméricos não fretados. Aplicação de carregamento incremental monotônico ao bloco;
- Análise dos resultados obtidos através do programa experimental e estudo complementar de bibliografias;
- Comparação dos resultados frente aos resultados de cálculo utilizando a equação de elasticidade proposta pela NBR 9062:2017;
- Apresentação das considerações finais.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho é composto por oito capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – apresenta a introdução do tema a ser abordado, com ênfase à descrição do contexto no qual a pesquisa será desenvolvida. Nesse mesmo capítulo, foi apresentada a justificativa para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos gerais e específicos e a metodologia da pesquisa;
- Capítulo 2 – apresenta a fundamentação teórica, expondo os principais conceitos a serem utilizados na dissertação, assim como uma breve conceituação e caracterização dos aparelhos de apoio elastoméricos simples;
- Capítulo 3 – expõe os métodos de ensaios para aparelhos de apoio elastoméricos, fundamentados em bibliografias nacionais e internacionais;
- Capítulo 4 – discorre uma nova análise dos ensaios experimentais obtidos em Ferreira (1999);
- Capítulo 5 – consta a descrição do programa experimental e os resultados obtidos;
- Capítulo 6 – discorre uma análise acerca dos resultados dos ensaios;

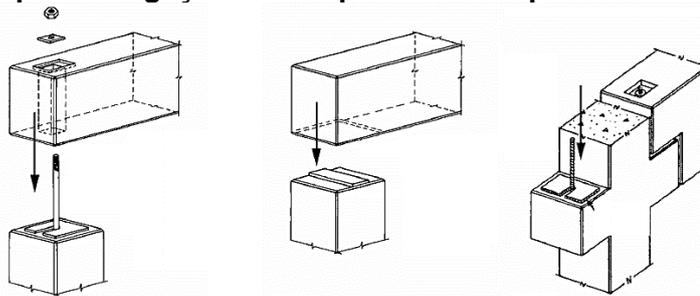
- Capítulo 7 – elenca as considerações finais da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 8 – apresenta as referências bibliográficas utilizadas na elaboração da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE FORÇAS EM LIGAÇÕES DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

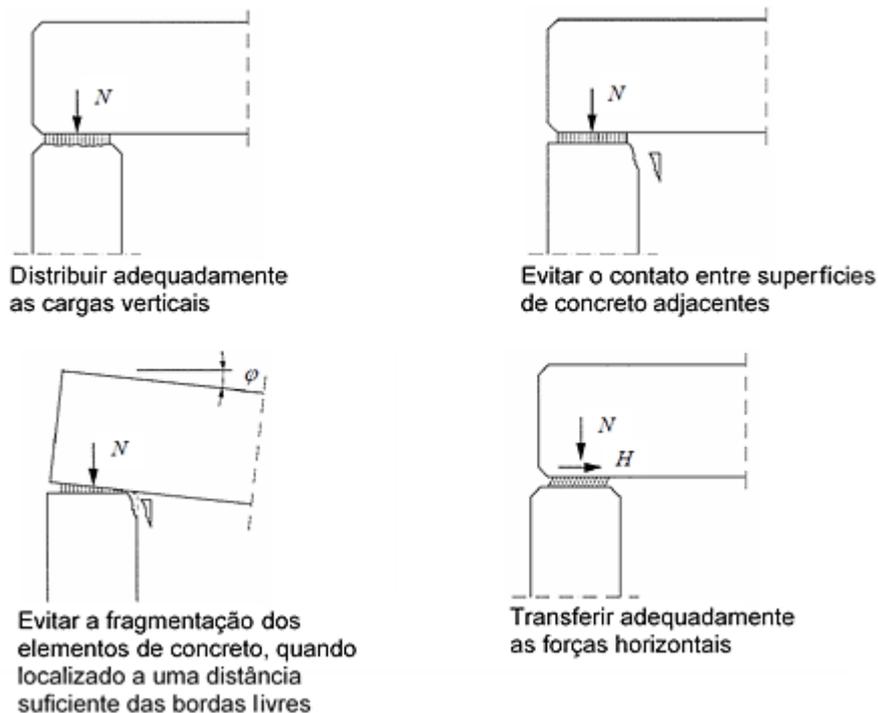
Segundo FIB (2008), todo elemento de concreto pré-moldado deve ser apoiado em um ou vários locais, de modo a transferir seu peso próprio e outras cargas impostas até as fundações. Essas cargas são geralmente de compressão. No caso de ligações solicitadas predominantemente por compressão e com movimentos horizontais e/ou de rotação, a transferência dessas forças é prevista através do uso de aparelhos de apoio, como nos exemplos ilustrados na Figura 2.1. As razões para isso estão ilustradas na Figura 2.2.

Figura 2.1: Exemplos de ligações com aparelhos de apoio elastoméricos simples.



Fonte: Adaptado de FIB (2008).

Figura 2.2: Razões para o uso de aparelhos de apoio elastoméricos.



Fonte: Adaptado de FIB (2008).

Tradicionalmente, os materiais utilizados para aparelhos de apoio são aços, argamassas e elastômeros e devem ser definidos, principalmente, em função das cargas verticais e horizontais, rotação e movimentos laterais aos quais a ligação será submetida, além de sua disponibilidade local e custo. A área do aparelho e suas aberturas, no entanto, são determinadas pelo tamanho dos elementos de concreto a serem apoiados, tolerâncias de montagem e considerações arquitetônicas (FIB, 2008, 2013).

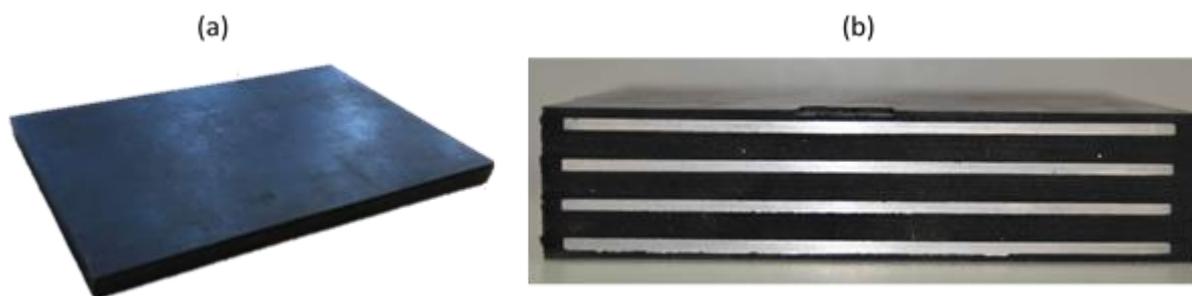
2.2 APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS

Os aparelhos de apoio de elastômero, conhecidos comercialmente como *neoprene*, surgiram após a segunda Guerra Mundial e, aos poucos, ganharam grande aceitação nas construções de concreto pré-moldado, como apoio para vigas, lajes e elementos em geral, sendo atualmente os mais utilizados (BRAGA, 1986). Isso se justifica pelo seu bom desempenho quanto à durabilidade sem manutenção e à conservação de suas características físicas ao longo do tempo e quando submetidos à intempéries (FERREIRA, 1999).

A finalidade do aparelho de apoio de elastômero é estabelecer vinculação entre elementos estruturais distintos e, desse modo, melhorar a distribuição de cargas concentradas e reações sobre a superfície, assim como permitir deformações limitadas de deslizamento horizontal e de rotação nos apoios, o que proporciona alívio de tensões, além de impedir o contato direto concreto-concreto e, conseqüentemente, evitar o desgaste em peças pré-moldadas de concreto (ABNT, 2015 e PCI, 2010).

Os aparelhos de apoio de elastômero podem ser simples ou fretados, conforme ilustra a Figura 2.3. Os simples são constituídos de uma única camada de elastômero e, são utilizados para cargas pequenas e médias, como no caso das construções pré-moldadas, enquanto os fretados são constituídos de camadas de elastômero intercaladas com chapas metálicas solidarizadas por vulcanização ou colagem especial, sendo empregados para cargas maiores, como no caso de pontes (ABNT, 2017 e FERREIRA, 1999).

Figura 2.3: Aparelhos de apoio elastoméricos (a) Simples e (b) Fretado.



Fonte: (a) Autora (2019). (b) Skender, Damjanović, Šimunić (2012).

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

2.3.1 DUREZA

Uma das principais características físicas do elastômero é a dureza, que é definida como a medida da resistência oposta a penetração de uma superfície, por um instrumento de dimensões determinadas e sob carga também determinada. Os aparelhos mais comuns para esse ensaio são os durômetros Shore A e, por esse motivo, a dureza é medida geralmente nessa escala. No ensaio, quanto mais difícil for a penetração, mais dura será a amostra e maior será a leitura na escala Shore (ALVES, 2005).

Com o intuito de atender a diferentes campos de aplicação, comercialmente, utiliza-se três classes de dureza, conforme apresenta a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classes de dureza Shore A

Dureza Shore A	50	60	70
Aplicações	Cargas leves	Estruturas em geral	Estruturas pesadas

Fonte: Ferreira (1999).

2.3.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL

O módulo de deformação transversal do elastômero delimita a resistência do aparelho de apoio para ações normais e também de cisalhamento. Vale ressaltar que o valor do módulo G pode variar em função da temperatura e do tipo de carregamento, estático ou dinâmico, que o aparelho será exposto (FERREIRA, 1999).

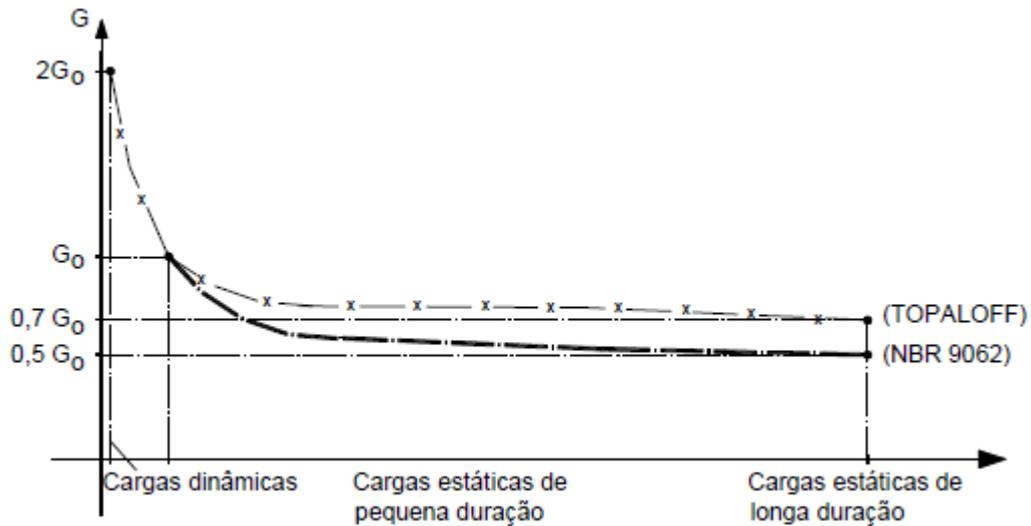
Em relação à temperatura, a NBR 9062:2017 orienta que para utilização dos aparelhos de apoio elastoméricos em temperaturas inferiores a 0 °C deve-se considerar o módulo de deformação transversal igual ao dobro do determinado a 20 °C. Logo, constata-se que a diminuição da temperatura provoca um aumento do módulo G, fazendo com que o aparelho se torne menos deformável.

Quanto ao tipo de carregamento, a NBR 9062:2017 recomenda que no cálculo da deformação resultante das cargas permanentes, isso é, cargas estáticas de longa duração, pode-se adotar o valor do módulo de deformação transversal igual à metade daquele utilizado para as cargas acidentais de pequena duração.

No entanto, em discrepância com a recomendação proposta pela norma brasileira, Topaloff (1964, apud Ferreira, 1999) propôs que para as cargas de longa duração, deve-se

adotar o valor do módulo G igual à 70% do valor do módulo G inicial. A Figura 2.4 ilustra as variações do módulo G em função do tipo e da duração do carregamento propostas por Topaloff (1964) e pela NBR 9062:2017.

Figura 2.4: Variação do módulo G em função do tipo e da duração do carregamento.



Fonte: Ferreira (1999).

Através do gráfico, é possível verificar que, por mais que ocorra divergência entre os valores recomendados, a norma brasileira fica a favor da segurança no que diz respeito a consideração do efeito da deformação lenta do elastômero para as cargas estáticas de longa duração.

2.3.3 CORRESPONDÊNCIA ENTRE DUREZA SHORE A E O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL G

A dureza é fator determinante do valor do módulo de deformação transversal G do elastômero e, na falta de ensaios conclusivos, a NBR 9062:2017 recomenda que sejam adotados os valores indicativos de correspondência entre a dureza Shore A e o módulo G , à temperatura de 20 °C, conforme apresenta a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Correspondência entre dureza e o módulo G , à temperatura de 20 °C, de acordo com a NBR 9062:2017

Dureza Shore A	50	60	70
Módulo G (MPa)	0,8	1,0	1,2

Fonte: ABNT (2017).

Já a norma europeia EN 1337:2016, aponta que a correspondência entre a dureza e o módulo G do elastômero não é precisa e, assim, as relações apresentadas na Tabela 2.3 são apenas aproximações. Vale ressaltar que nessa norma a dureza é medida na unidade

IRHD (*International Rubber Hardness Degrees*), a qual tem praticamente os mesmos valores que a Dureza Shore A para os intervalos utilizados na presente pesquisa (acima de 45).

Tabela 2.3: Correspondência entre dureza e o módulo G, de acordo com a EN 1337:2016

Dureza Shore A	50 ± 5	60 ± 5	70 ± 5
Módulo G (MPa)	0,70 ± 0,10	0,90 ± 0,15	1,15 ± 0,20

Fonte: Adaptado de European Standard (2016).

Ainda, Lindley (1992, apud Muscarella e Yura, 1995) recomendam os valores de correspondência entre dureza e módulo G apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Correspondência entre dureza e o módulo G, de acordo com

Dureza Shore A	45 - 55	55 - 65	65 - 75
Módulo G (MPa)	0,53 - 0,75	0,75 - 1,05	1,05 - 1,40

Fonte: Lindley (1992) apud Muscarella, Yura (1995).

Ao observar as tabelas, nota-se que há concordância entre os valores indicativos de correspondência entre a dureza e o módulo de deformação transversal G recomendados por diferentes bibliografias internacionais. Assim, para um aparelho de apoio elastomérico simples com Dureza Shore 60 A, espera-se obter um valor entre 0,75 e 1,05 MPa para o módulo G.

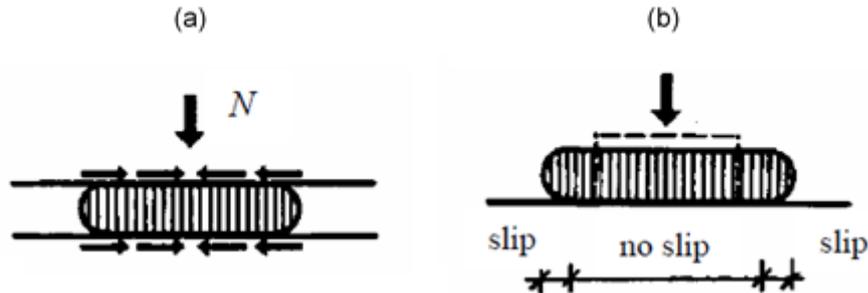
2.3.4 COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente de Poisson ν é diferente para cada material e, para o elastômero, assume-se valor próximo de 0,50 (FIB, 2008).

2.4 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

Conforme ilustra a Figura 2.5, os aparelhos de apoio elastoméricos se comportam de maneira bem diferente de outros materiais quando comprimidos. Por haver certa dificuldade em comprimi-lo (coeficiente de Poisson é 0,50), quando esse tipo de aparelho é submetido à compressão, a maior parte da deformação por compressão é resultante da significativa expansão lateral que ocorre no material. De fato, quando a dureza do elastômero é baixa, há pouca alteração no volume do aparelho de apoio quando comprimido, no entanto, à medida que a dureza aumenta, a alteração do volume do material torna-se mais expressiva (MUSCARELLA, YURA, 1995).

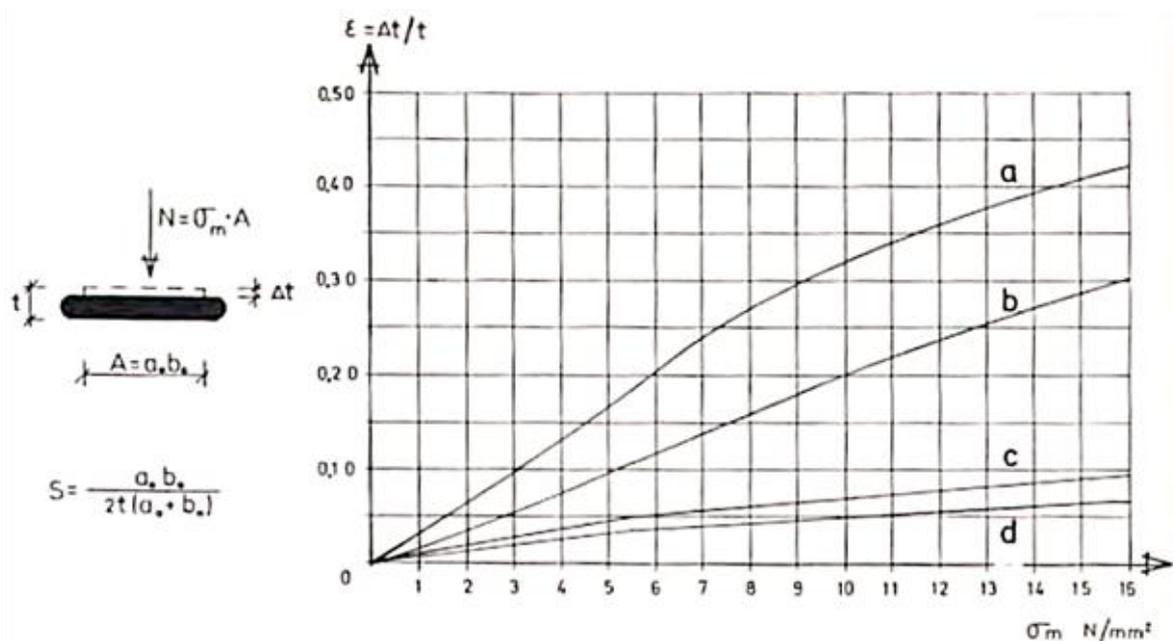
Figura 2.5: Comportamento geral dos aparelhos de apoio elastoméricos (a) Submetidos à compressão. (b) Deformação por compressão.



Fonte: Adaptado de Vinje (1985).

Ainda, quando há alguma restrição à expansão lateral do aparelho de apoio, como por exemplo o atrito da superfície de contato, as deformações por compressão no elastômero são menores do que no caso de superfícies menos rugosas (VINJE, 1985). Esse fato está bem ilustrado no gráfico da Figura 2.6, o qual relaciona a tensão de compressão com a deformação do aparelho de apoio. Nota-se que quanto maior a rugosidade da superfície de contato, menores são as deformações por compressão que ocorrem ao longo dos ensaios. Esse fato se deve à restrição da expansão lateral pelo atrito da superfície.

Figura 2.6: Efeito da rugosidade da superfície de contato em aparelhos de apoio elastoméricos submetidos à compressão.



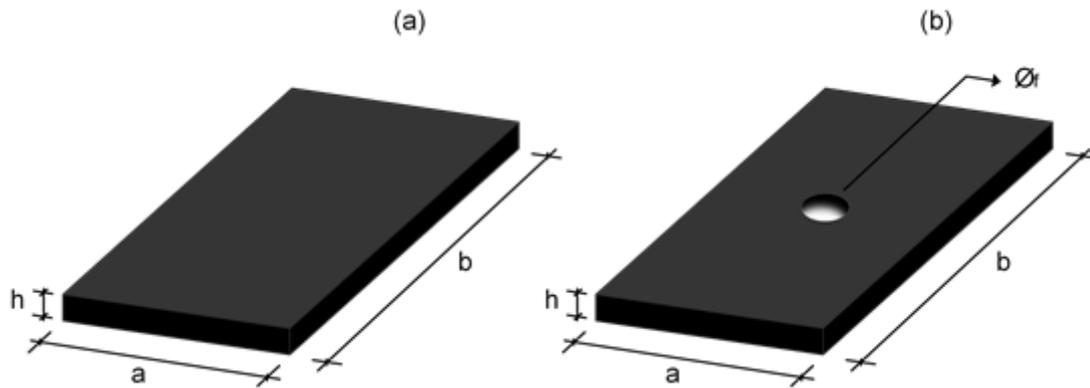
Dureza Shore 70 A; 200 x 200 x 10 mm; S = 5; a = aço polido; b = concreto; c = aço, areia, rugosidade 40; d = aço, areia, rugosidade 280.

Fonte: Adaptado de Flohrer (1971) apud Vinje (1985).

Assim, entende-se que o comportamento do aparelho de apoio elastomérico à compressão também é função das superfícies livres ou não para expandir lateralmente, ou

seja, o aparelho de elastômero é caracterizado também por sua geometria, apresentada na Figura 2.7.

Figura 2.7: Geometria do aparelho de apoio de elastômero (a) sem furo (b) com furo.



Fonte: Autora (2019).

Portanto, não há possibilidade de calcular a deformação por compressão como uma simples função da dureza ou do módulo de elasticidade do elastômero. Essa, de fato, pode ser expressa como uma função da tensão de compressão e um fator de forma empírico, S , que caracteriza geometricamente o aparelho, uma vez que suas dimensões e forma afetam seu comportamento (AASHTO, 1973 e FIB, 2008).

O fator de forma é definido pela relação entre a superfície de apoio carregada e a superfície livre para expandir lateralmente do aparelho de apoio, conforme apresenta a Equação 2.1. Vale ressaltar que no caso de o aparelho de apoio possuir furo para colocação de chumbador, esse deve ser considerado no cálculo do fator de forma.

$$S = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b) \cdot h} \quad (2.1)$$

Onde:

S – fator de forma;

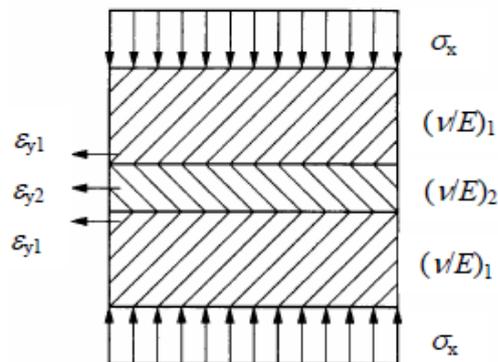
a e b – dimensões em planta do aparelho de apoio;

h – espessura do aparelho de apoio.

2.5 EFEITOS DA COMPRESSÃO NOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

As ligações de concreto pré-moldado submetidas à compressão geralmente são compostas por camadas de concreto e elastômero, ou seja, camadas de materiais com diferentes propriedades. Essas camadas possuem diferentes tensões de compressão, módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson, levando a uma expansão lateral também diferente, conforme ilustra a Figura 2.8 (FIB, 2008).

Figura 2.8: Compressão através de camadas de diferentes materiais.



Fonte: FIB (2008).

A diferença entre a expansão lateral através de diferentes camadas de materiais é expressa pela Equação 2.2.

$$\varepsilon_{y1} - \varepsilon_{y2} = \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_1 - \left(\frac{\nu}{E} \right)_2 \right] \cdot \sigma_x \quad (2.2)$$

Onde:

ε_y – expansão lateral;

ν – coeficiente de Poisson;

E – módulo de elasticidade;

σ_x – tensão de compressão.

As tensões laterais causadas pela compressão podem ser expressas de acordo com a Equação 2.3, caso não ocorra escorregamento entre as diferentes camadas.

$$\begin{aligned} \sigma_{y1} &= (\varepsilon_{y1} - \varepsilon_{y2}) \cdot E_1 = \text{const.} \cdot E_1 \cdot \sigma_x \\ \sigma_{y2} &= (\varepsilon_{y1} - \varepsilon_{y2}) \cdot E_2 = \text{const.} \cdot E_2 \cdot \sigma_x \end{aligned} \quad (2.3)$$

Onde:

σ_y – tensão lateral;

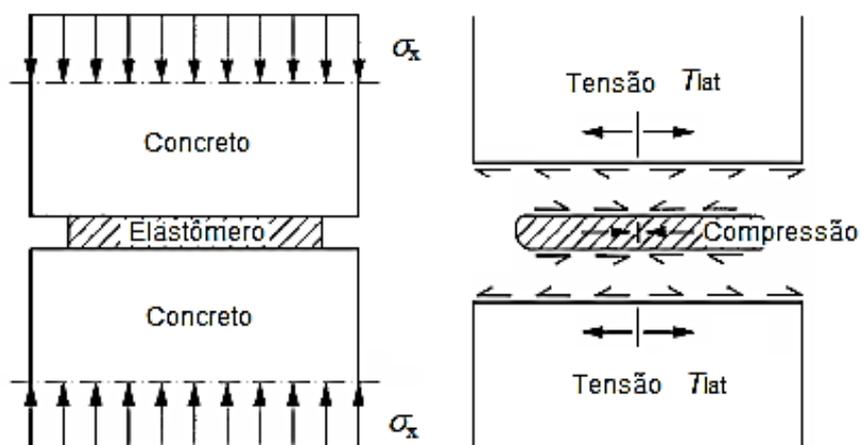
const – constante.

De acordo com o FIB (2008), as expressões mostram que uma variação da tensão lateral tem um efeito correspondente sobre a tensão de compressão. Em outras palavras, as tensões de compressão só são distribuídas uniformemente pelas diferentes camadas de materiais se a relação ν/E for constante. Assim, a tensão lateral causa tensões de cisalhamento lateral correspondentes entre os diferentes materiais, as quais afetam a capacidade das juntas, a depender da função ν/E .

Ainda segundo o FIB (2008), valores baixos da relação ν/E resultam em expansão lateral muito pequena, enquanto valores altos resultam em grande expansão lateral. A relação ν/E do elastômero é muito superior à dos elementos de concreto, já que para o coeficiente de Poisson do elastômero assume-se valor próximo de 0,50, enquanto para o concreto esse valor varia entre 0,15 e 0,25, dependendo do tipo de agregado e outras propriedades.

Portanto, quando comprimido, o elastômero causa tensões de tração laterais nos elementos de concreto que, conseqüentemente, causam tensões de compressão laterais no aparelho de apoio, como ilustra a Figura 2.9 Eventualmente, essas tensões laterais são tão grandes que o elastômero pode deslizar entre as superfícies de concreto, movimento que pode ser restringido em função do atrito na junta, que depende do tipo do elastômero e da rugosidade da superfície de contato (FIB, 2008).

Figura 2.9: Compressão através do concreto e aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: Adaptado de Vinje (1985) apud FIB (2008).

Por fim, conclui-se que os efeitos da compressão no aparelho de apoio elastomérico são fundamentais em seu comportamento e, assim, devem estar sempre incluídos em seu projeto. De acordo com Muscarella e Yura (1995), dois fatores limitam a máxima tensão de

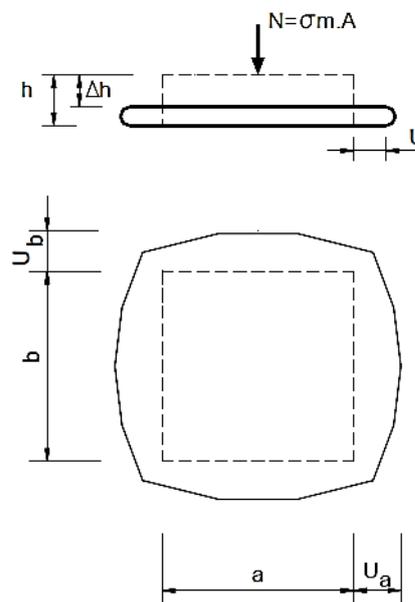
compressão permitida nos aparelhos de apoio elastoméricos simples: a deformação por compressão e a distorção (deformação por cisalhamento) resultantes da compressão. O primeiro fator é a deformação por compressão, que é em maior parte resultante da expansão lateral do elastômero sob carga de compressão. A segunda limitação é derivada da capacidade do elastômero de suportar as tensões de cisalhamento criadas no próprio material a partir das distorções causadas pela carga de compressão.

Os efeitos da compressão nos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados serão detalhados nos itens a seguir.

2.5.1 EXPANSÃO LATERAL

A expansão lateral de um aparelho de apoio elastomérico simples submetido à compressão ocorre conforme ilustra a Figura 2.10. U é a máxima expansão lateral que ocorre em um lado do elastômero com uma tensão de compressão específica, comparada a um elastômero descarregado de tamanho $a \times b$ (VINJE, 1985).

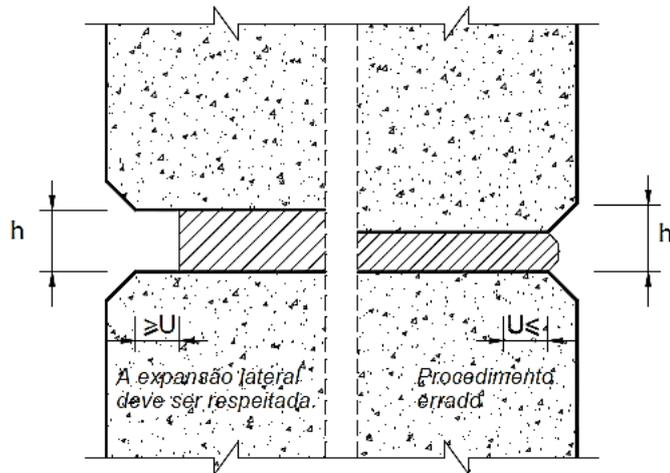
Figura 2.10: Expansão lateral do aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: Vinje (1985) apud Ferreira (1999).

Ainda, as expansões laterais U_a e U_b devem ser consideradas no projeto das dimensões a e b do elastômero, a fim de evitar que o elastômero sobressaia entre os elementos de concreto quando submetidos ao carregamento, como ilustra a Figura 2.11 (FERREIRA, 1999).

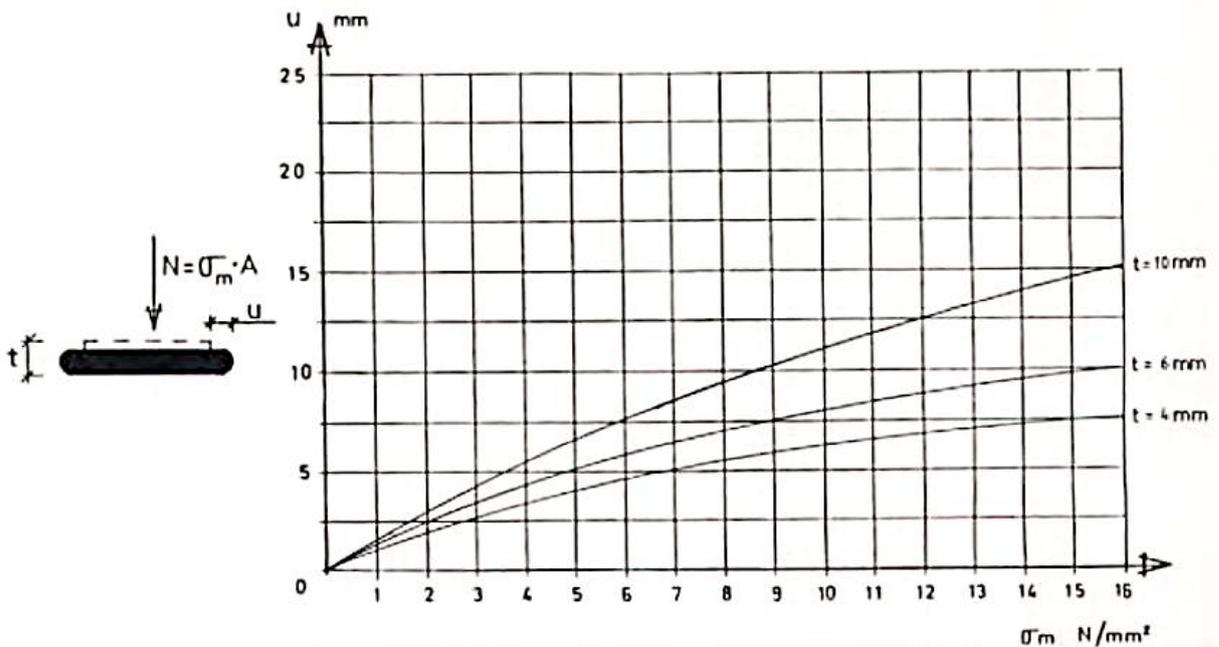
Figura 2.11: Limitações para a largura do aparelho de apoio entre elementos de concreto.



Fonte: Vinje (1985) apud Ferreira (1999).

Segundo Vinje (1985), a expansão lateral do aparelho de apoio elastomérico aumenta conforme a sua espessura aumenta, ou seja, são fatores diretamente proporcionais, como ilustra o gráfico *tensão x expansão lateral* da Figura 2.12. Isso ocorre porque conforme a espessura aumenta, a superfície lateral livre para deformação também aumenta.

Figura 2.12: Variação da expansão lateral para diferentes espessuras de aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: Vinje (1985).

Ainda, Vinje (1985) observou que em aparelhos de apoio elastoméricos com espessura de 15mm, a expansão lateral é tamanha que os torna inadequados para o uso em aplicações estruturais.

2.5.2 DEFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO

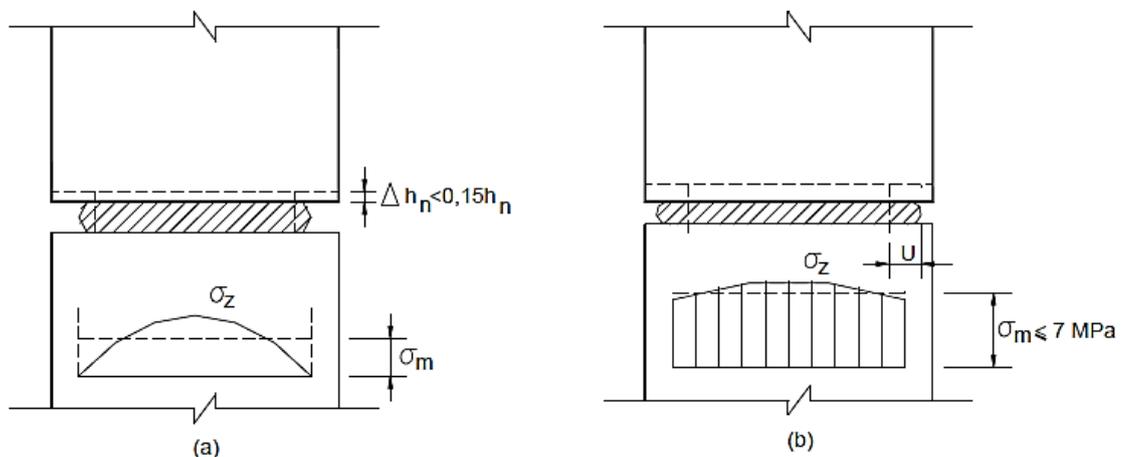
As configurações de tensões e deformações para a compressão em serviço de um aparelho de apoio elastomérico não fretado ocorre conforme ilustra a Figura 2.13, considerando que o elastômero seja uma placa elástica comprimida por dois elementos de rigidez muito maior que a sua própria.

Para tensões de compressão muito baixas, a distribuição das tensões normais pode ser representada pela Figura 2.13 (a), onde verifica-se uma maior resistência às deformações na região central do aparelho de apoio, devido à um estado triplo de tensões, que resulta no confinamento dessa região. Já nas regiões periféricas do aparelho de apoio, as tensões são praticamente nulas, reduzindo o efeito do confinamento e resultando em uma baixa resistência às deformações nessas regiões.

À medida que as tensões aumentam, a expansão lateral também aumenta, devido à falta de confinamento nas extremidades e, desse modo, tem-se uma nova configuração, representada na Figura 2.13 (b). Na nova configuração, as tensões de compressão distribuem-se de maneira mais uniforme, aumentando a área de confinamento do aparelho de apoio, que passa a se comportar de modo similar ao aparelho fretado. Portanto, conclui-se que conforme a tensão normal à compressão aumenta, a rigidez à compressão do aparelho de apoio elastomérico simples também aumenta (FERREIRA, MERLOS, CATOIA, 2018).

É importante frisar que o efeito do confinamento ocorre apenas quando o elastômero está entre superfícies de maior rugosidade, como o concreto. Esse efeito é nulo ou muito pequeno para superfícies lisas, como o aço.

Figura 2.13: Configurações de tensões e deformações para um aparelho de apoio elastomérico simples submetido à compressão.



Fonte: Ferreira (1999).

Segundo a NBR 9062:2017, a deformação por compressão em serviço deve ser limitada a 15% da espessura nos aparelhos de apoio elastoméricos simples, recomendando-se utilizar valores experimentais em função da dureza e do fator de forma, conforme expressa a Equação 2.4.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma_m}{10.G.S + 2.\sigma_m} \leq 0,15 \quad (2.4)$$

Onde:

Δh – deformação por compressão;

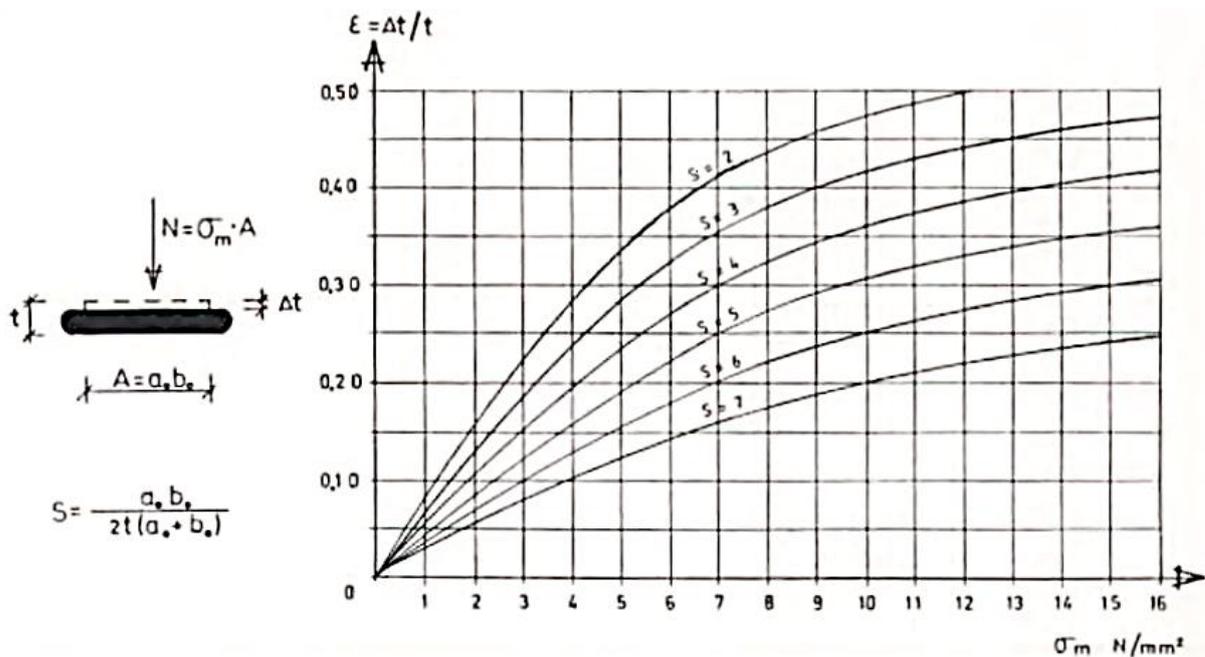
σ_m – pressão média de contato no aparelho de apoio em serviço;

G – módulo de deformação transversal;

S – fator de forma do aparelho de apoio.

De acordo com Vinje (1985), a deformação por compressão de um aparelho de apoio de elastômero é inversamente proporcional ao seu fator de forma, como ilustra a Figura 2.14. Pode-se observar no gráfico *tensão x deformação* que conforme o fator de forma aumenta, a deformação por compressão se torna menor.

Figura 2.14: Deformação por compressão para diferentes valores de fator de forma.

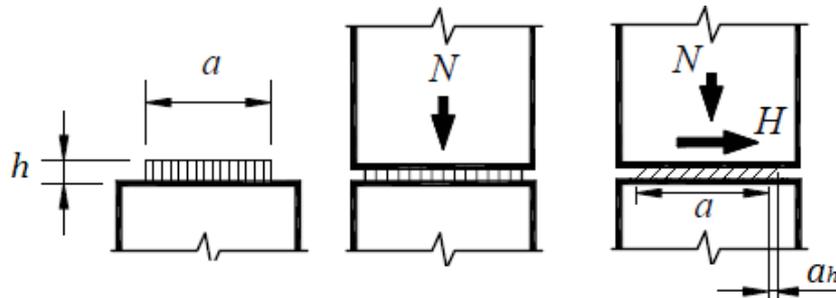


Fonte: Vinje (1985).

2.5.3 DEFORMAÇÃO POR CISALHAMENTO

Conforme ilustra a Figura 2.15, quando os elastômeros são submetidos à carga de compressão, ocorre deformação por cisalhamento no material, a qual resulta em tensões também de cisalhamento.

Figura 2.15: Deformação por cisalhamento do aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: Adaptado de FIB (2008) e ABNT (2017).

De acordo com a NBR 9062:2017, a deformação por cisalhamento pode ser limitada ao valor da metade da espessura total do elastômero, conforme apresenta a Equação 2.5.

$$\frac{a_h}{h} = \frac{H}{G.(a.b)} \leq 0,50 \quad (2.5)$$

Onde:

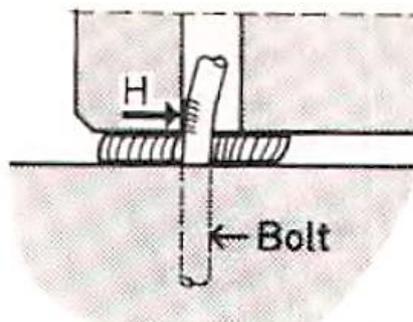
a_h – deformação por cisalhamento;

H – carga de cisalhamento.

Ainda, a NBR 9062:2017 recomenda que sejam adotados dispositivos que garantam essa limitação, caso ocorram deformações transversais importantes, como o vento ou escondidade, por exemplo.

No caso das estruturas pré-moldadas de concreto, as forças horizontais em ligações viga-pilar típica geralmente são restringidas através do uso de dispositivos como o chumbador (Figura 2.16), armadura de continuidade ou juntas verticais grauteadas.

Figura 2.16: Absorção da força horizontal pelo chumbador.



Fonte: Vinje (1985).

Assim, nota-se que a resistência à deformação por cisalhamento da ligação não depende apenas do aparelho de apoio, já que a distorção é limitada por outros dispositivos e, dessa forma, não é relevante levar esse efeito em consideração em seu projeto. Visto isso, pode-se dizer também que não ocorrem distorção e rotação simultaneamente, portanto, conclui-se que o efeito de maior importância e representatividade do comportamento dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados é a deformação por compressão, que é objeto de estudo da presente pesquisa.

Vale ressaltar que caso ocorram compressão e rotação simultaneamente, deve-se considerar uma redução de área, do fator de forma e, conseqüentemente, do módulo de deformação transversal. No entanto, na presente pesquisa, optou-se por estudar a compressão centrada, de modo a compreender melhor o comportamento do elastômero nesse primeiro momento, com foco na deformabilidade à compressão e rigidez.

2.6 LIMITES PARA AS PRESSÕES DE CONTATO NOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

Embora ocorram diferentes tensões de compressão nas regiões central e periféricas da superfície do aparelho de apoio, a nível de dimensionamento utiliza-se uma pressão média de contato distribuída uniformemente no elastômero (Figura 2.13). Segundo a NBR 9062:2017, o limite recomendado para a pressão de contato média no aparelho de apoio elastomérico não fretado é dado pela Equação 2.6.

$$\sigma_m = \sigma_k = \frac{N_k}{(a.b)} \leq 7,0MPa \quad (2.6)$$

Onde:

$\sigma_m = \sigma_k$ – pressão média de contato para combinação rara de serviço, somando-se todas as cargas permanentes e acidentais com seus valores característicos k , sem majorações ou reduções;

N_k – somatório da carga permanente (N_{gk}) e da carga acidental (N_{qk}).

A pressão de contato limitada pela deformação à compressão de 15% da espessura do aparelho de apoio pode ser expressa pela Equação 2.7.

$$\sigma_{m(\text{lim}15\%)} = 2,15.G.S \leq 7,0MPa \quad (2.7)$$

Em disparidade com a norma brasileira, de acordo com o FIB (2008), baseado no estudo de Vinje (1985), a pressão média de contato em serviço deve ser limitada a 10 MPa nos aparelhos de apoio elastoméricos simples. Esse limite é válido para as condições de

aparelho de apoio com dureza Shore entre 60 e 70 A, área máxima de 300 x 400 mm, fator de forma entre 2 e 7, espessura entre 4 e 10 mm e superfície de contato de concreto.

Ainda, o PCI (2010) recomenda que a pressão média de contato em serviço deve ser limitada a 5,5 MPa nos aparelhos de apoio elastoméricos simples sem restrição à deformação por cisalhamento e com fator de forma superior a 3.

Por fim, de acordo com o Design Manual da NBIF (s/d, apud Ferreira, 1999), a tensão média de compressão no elastômero deve ser limitada pela resistência de compressão dos elementos de concreto, como apresenta a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Limites para σ_m segundo a resistência do concreto

Concreto C30 (30 MPa)	$\sigma_m = 11,4$ MPa
Concreto C40 (40 MPa)	$\sigma_m = 13,7$ MPa
Concreto C50 (50 MPa)	$\sigma_m = 16,0$ MPa

Fonte: NBIF (The Norwegian Precast Concrete Federation) s/d apud Ferreira (1999).

Dessa maneira, verifica-se que há discrepância entre os valores limites fixados para a pressão média de contato nos aparelhos de apoio elastoméricos simples nas diferentes normas internacionais. Entretanto, esses valores foram estipulados de modo a garantir uma boa distribuição de tensões em serviço ao longo de todo o elastômero, de acordo com a imposição de diferentes situações de projeto.

2.7 ELASTICIDADE DOS APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

O módulo de elasticidade é um parâmetro que proporciona uma medida de rigidez do material. Sabe-se, da Lei de Hooke, que o módulo de elasticidade é inversamente proporcional à deformação do material. Portanto, essas variáveis são função uma da outra e devem ser estudadas em conjunto para que seja feita uma boa interpretação do comportamento do material, no caso, o elastômero.

2.7.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Quando o elastômero é submetido à compressão, a Lei de Hooke é aplicada ao material conforme apresenta a Equação 2.8.

$$\sigma_m = E_n \cdot \frac{\Delta h}{h} \rightarrow E_n = \frac{\sigma_m}{\Delta h / h} \quad (2.8)$$

Onde:

E_n – módulo de elasticidade.

Ainda, visto que a NBR 9062:2017 recomenda que sejam utilizados valores experimentais em função da dureza e do fator de forma para o cálculo da deformação por compressão em serviço, constata-se que o módulo de elasticidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado pode ser expresso pela Equação 2.9, segundo a norma.

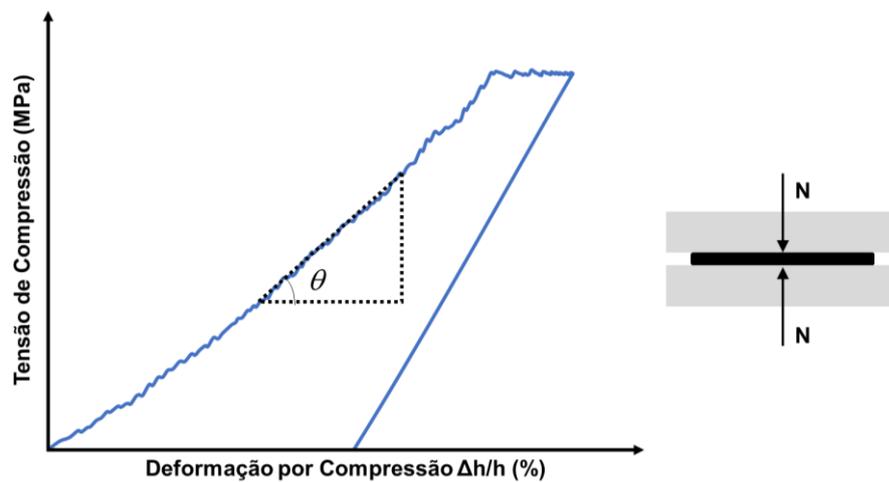
$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma_m}{10.G.S + 2.\sigma_m}$$

$$E_n = 10.G.S + 2.\sigma_m \quad (2.9)$$

2.7.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE

No regime elástico linear, região onde a Lei de Hooke é válida, o módulo de elasticidade pode ser obtido pelo coeficiente angular do gráfico *tensão x deformação*. Dessa forma, o módulo de elasticidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado pode ser obtido experimentalmente através do ensaio à compressão, conforme apresenta a Figura 2.17 e expressa a Equação 2.10.

Figura 2.17: Curva *tensão de compressão x deformação* no regime elástico.



Fonte: Autora (2019).

$$E_{n,a} = \tan(\theta) = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta(\Delta h / h)} \quad (2.10)$$

Onde:

$E_{n,a}$ – módulo de elasticidade aparente (módulo tangente de deformação à compressão).

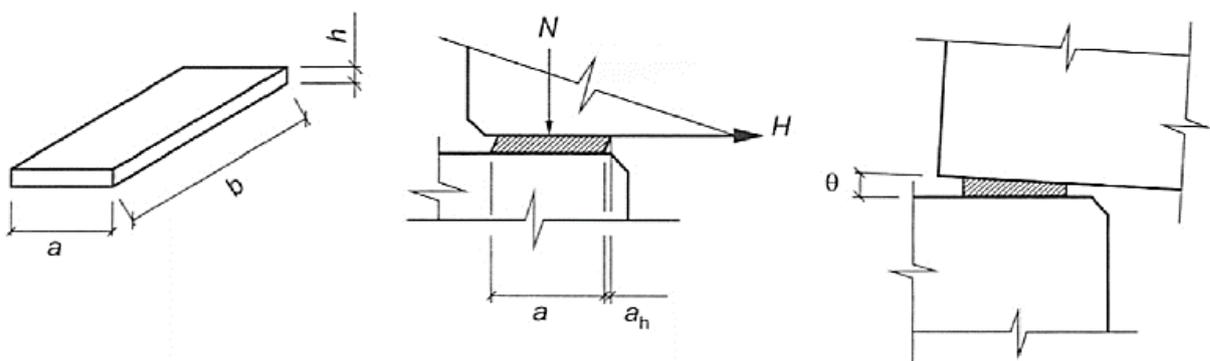
2.8 DIFERENTES SITUAÇÕES DE PROJETO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

Segundo Ferreira (2017), é possível verificar diferentes situações de projeto no que diz respeito à utilização dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados. À medida que o elastômero é submetido à compressão, além da deformação por compressão, podem ocorrer efeitos como a deformação por cisalhamento (distorção) e a rotação do aparelho de apoio que, entretanto, podem ser limitados com a utilização de dispositivos.

De acordo com o FIB (2008), diferentes tipos de ligações, possuem diferentes graus de restrição para diferentes tipos de tensões. Logo, há ligações com alto grau de resistência aos deslocamentos laterais e de rotação, por exemplo, e ligações com pouca ou nenhuma resistência a essas deformações. Dessa forma, entende-se que o aparelho de apoio pode ser utilizado em diferentes tipos de ligações e, conseqüentemente, diferentes situações de projeto, as quais podem reduzir ou não a capacidade à compressão do elastômero.

A figura 2.18 ilustra a situação de projeto onde o aparelho de apoio encontra-se sem restrição para os efeitos de distorção e rotação, condição que não é comum em estruturas pré-moldadas de concreto, em razão de não garantir a estabilidade da viga pré-moldada durante a fase de montagem. É interessante notar que a recomendação do PCI (2010) para o limite de pressão média de contato de 5,5 MPa está relacionada com essa situação de projeto para o aparelho, uma vez que as distorções laterais e rotações reduzem a resistência do elastômero à compressão (FERREIRA, 2017).

Figura 2.18: Aparelho de apoio elastomérico sem restrição para os efeitos de distorção e rotação.

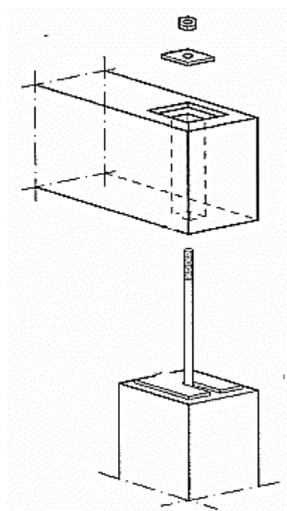


Fonte: ABNT (2017).

A figura 2.19 ilustra a situação de projeto onde o aparelho de apoio encontra-se com restrição à distorção, através do uso de chumbador, mas sem restrição à rotação. Essa situação é mais comum nas estruturas pré-moldadas de concreto no Brasil, pois garante a estabilidade da viga pré-moldada durante a fase de montagem. Vale ressaltar que a

recomendação de 10 MPa para o limite de pressão de contato no aparelho dada pelo FIB (2008) está relacionada com essa situação de projeto, isso é, para ligações com o uso de elastômero e dispositivo que limita os deslocamentos laterais, não ocorrendo reduções significativas da capacidade à compressão do aparelho (FERREIRA, 2017).

Figura 2.19: Aparelho de apoio elastomérico com restrição ao deslocamento lateral por meio de chumbadores.



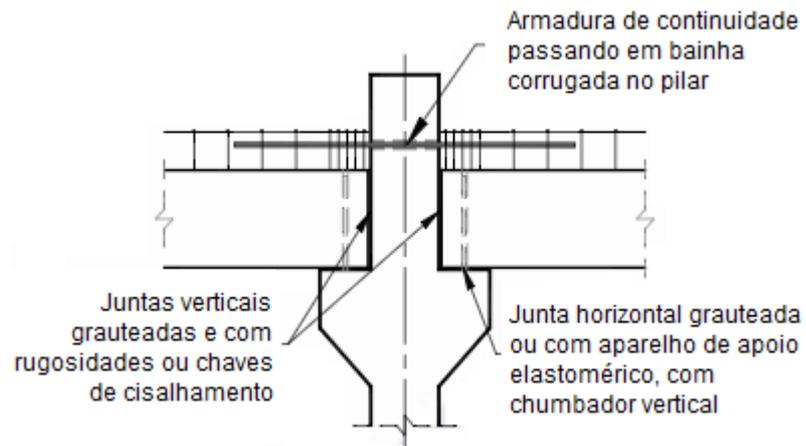
Fonte: FIB (2008).

Embora a NBR 9062:2017 não especifique uma situação de projeto para a recomendação do limite de 7 MPa para a pressão de contato nos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, é fato que o emprego desse tipo de apoio em estruturas pré-moldadas no Brasil está sempre acompanhado do uso de chumbador grauteado. Desse modo, a restrição ao deslocamento lateral é garantida e pode-se considerar que o limite recomendado pela norma brasileira é adequado ao uso nesse país (FERREIRA, 2017).

Ainda que a recomendação da norma brasileira seja inferior em relação à do FIB (2008), é importante ressaltar que essa norma impõe também limitações de dureza Shore, área, fator de forma, espessura e superfície de contato para a utilização do elastômero.

Por fim, a Figura 2.20 ilustra uma ligação viga-pilar típica prevista na NBR 9062:2017, que é composta por aparelho de apoio elastomérico com chumbador vertical, juntas verticais grauteadas e armadura de continuidade negativa passando em bainha corrugada no pilar. Nessa situação, o aparelho de apoio encontra-se com restrição à distorção, através do uso de chumbador, e com restrição à rotação, por meio da armadura de continuidade negativa. Assim, não ocorrem reduções da resistência do elastômero à compressão e considera-se razoável um limite maior para a pressão de contato no aparelho de apoio em relação às outras situações de projeto (FERREIRA, 2017).

Figura 2.20: Aparelho de apoio elastomérico com restrições tanto à distorção lateral, quanto para rotação no apoio da viga.



Fonte: ABNT (2017).

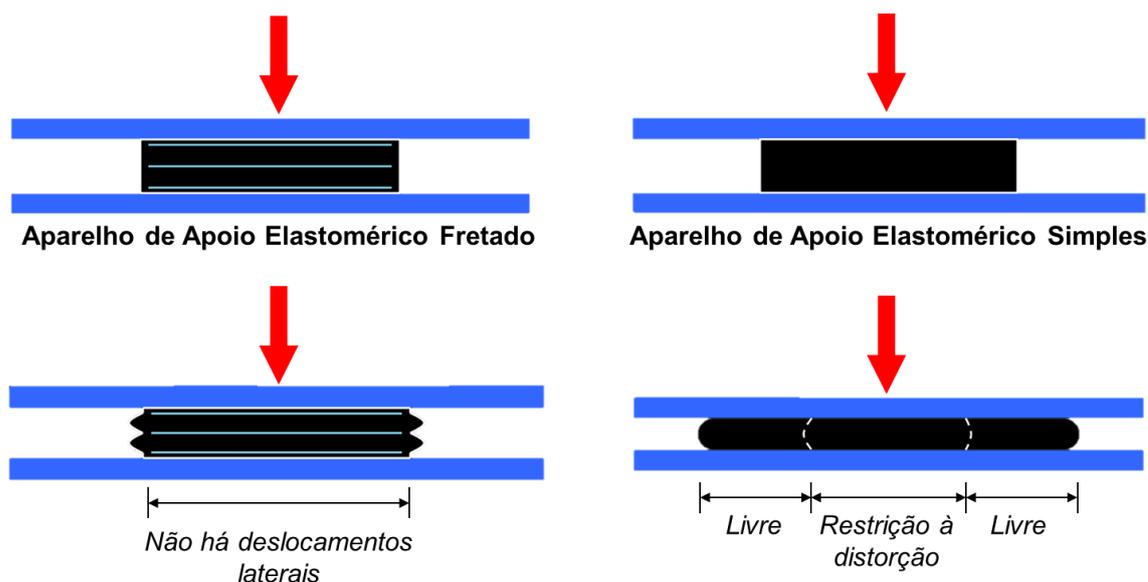
3. MÉTODOS DE ENSAIOS

3.1 MÉTODOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS

No Brasil, não há método padronizado de ensaio de compressão simples para os aparelhos de apoio elastoméricos não fretados e, por essa razão, fez-se necessário o desenvolvimento e validação de um método de ensaio que delimitasse o escopo desta pesquisa. De modo a haver confiabilidade no procedimento, foi feita uma extensa revisão de bibliografia nacional e internacional e, então, diversos procedimentos foram discutidos e analisados, os quais serão detalhados nesse capítulo.

A NBR 19783:2015 estabelece o método de ensaio de compressão simples para os aparelhos fretados. Entretanto, conforme apresenta a Figura 3.1, o comportamento dos aparelhos fretados é diferente dos não fretados, pois as chapas metálicas limitam os deslocamentos laterais dos aparelhos de apoio devido ao efeito do confinamento. Logo, o ensaio à compressão para os aparelhos fretados não é adequado aos aparelhos de apoio elastoméricos simples.

Figura 3.1: Comportamento de aparelhos de apoio elastoméricos fretados e simples submetidos à compressão.



Fonte: Adaptado de Stanton e Tetzlaff (2012).

Ainda, a Comissão de Aparelhos de Apoio Estruturais da ABNT (Parte 3: Aparelhos de Apoio Elastoméricos) está desenvolvendo uma nova norma (NBR s/n°), a qual especifica regras para o projeto e fabricação de aparelhos de apoio elastoméricos fretados e simples.

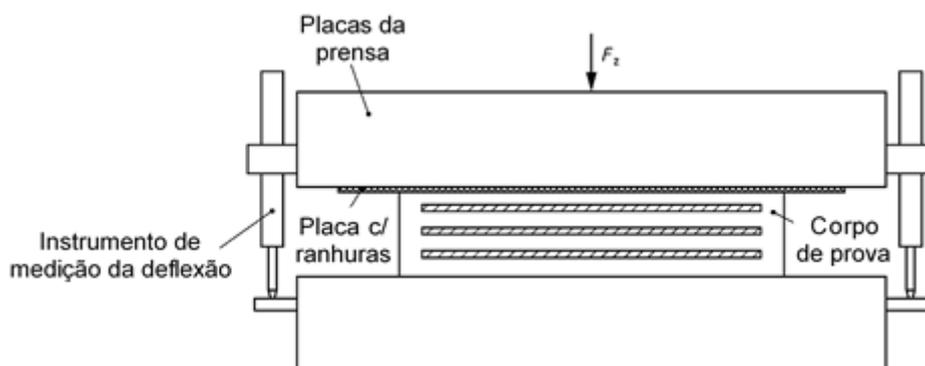
Essa norma substituirá a NBR 19783:2015, que traz recomendações somente para os aparelhos fretados. Na versão *draft* da NBR s/n° (2019), já está incluído o método de ensaio de compressão para os aparelhos fretados, o qual foi aprimorado e é análogo ao método estabelecido pela EN 1337:2016, norma europeia que também estabelece método de ensaio de compressão simples apenas para os aparelhos fretados. Esse método foi analisado e será apresentado na sequência.

3.1.1 MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS FRETADOS

O método de ensaio de compressão para aparelhos de apoio elastoméricos fretados estabelecido pela EN 1337:2016 tem como objetivo a determinação do módulo secante de deformação à compressão e da rigidez à compressão dos aparelhos de apoio elastoméricos fretados, bem como do procedimento para inspeção visual das superfícies. O ensaio consiste na medição da deflexão de um aparelho de apoio elastomérico quando submetido a cargas de compressão crescentes. A partir dos resultados desse ensaio são calculados os módulos secantes de deformação à compressão E_{CS} .

O equipamento de ensaio, apresentado esquematicamente na Figura 3.2, deve ser capaz de comprimir o aparelho de apoio sob condições controladas e deve ser possível medir a carga de compressão e a deflexão. A deflexão média do corpo de prova deve ser determinada utilizando os resultados de no mínimo dois instrumentos de medição, posicionados de forma equidistante do centro do aparelho e alinhados com o centro do aparelho.

Figura 3.2: Diagrama esquemático do equipamento de ensaio de compressão, conforme EN 1337:2016.



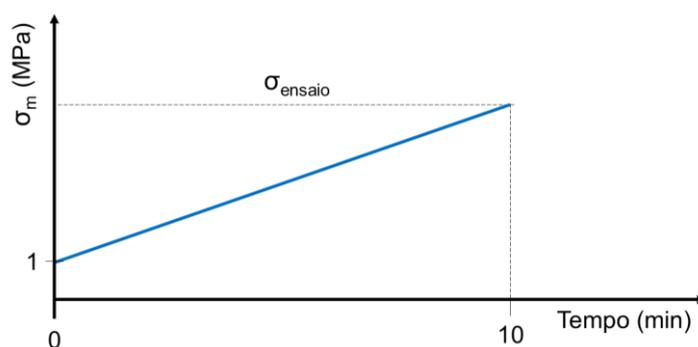
Fonte: Adaptado de European Standard (2016).

De acordo com a EN 1337:2016, o procedimento de ensaio é dividido em três níveis. Nos procedimentos nível 1 e 2, deve ser feito um ciclo inicial de carregamento, no qual a carga de ensaio é aplicada ao aparelho de apoio, mantida por 1 min e então aliviada. Esse processo

deve ser repetido por dois ciclos completos de carregamento e descarregamento. Depois, uma carga correspondente a uma pressão de contato de 1 MPa deve ser aplicada e os medidores de deflexão zerados, encerrando este ciclo inicial de carregamento. Feito isso, o ensaio deve prosseguir com a aplicação do tipo de carregamento previsto em cada nível.

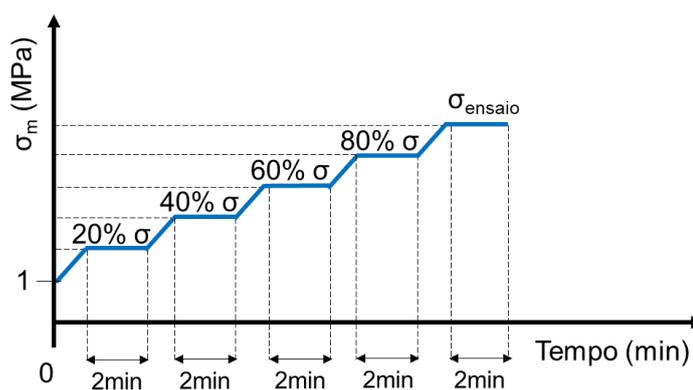
No procedimento nível 1, após o término do ciclo inicial, a carga deve ser aplicada progressivamente a uma velocidade de 1/10 da carga máxima por minuto (Figura 3.3), com a deflexão continuamente registrada, ou deve ser aplicada em cinco etapas (20%, 40%, 60%, 80% e 100% do máximo) e a cada etapa a carga deve ser mantida constante por no mínimo 2 minutos para minimizar os efeitos viscoelásticos (Figura 3.4).

Figura 3.3: Procedimento de aplicação de carregamento no procedimento de ensaio nível 1, conforme EN 1337:2016.



Fonte: Autora (2019).

Figura 3.4: Procedimento de aplicação de carregamento alternativo no procedimento de ensaio nível 1, conforme EN 1337:2016.



Fonte: Autora (2019).

No caso do procedimento nível 2, em seguida do término do ciclo inicial de carregamento, a carga deve ser aplicada progressivamente a uma velocidade de 1/10 da carga máxima por minuto, com a deflexão continuamente registrada, ou deve ser aplicada em duas etapas e a cada etapa a carga deve ser mantida constante por no mínimo 2 minutos para minimizar os efeitos viscoelásticos. Por fim, no procedimento de ensaio nível 3, deve ser

aplicada a carga máxima de ensaio ao aparelho de apoio e deve ser realizada a inspeção visual das superfícies expostas.

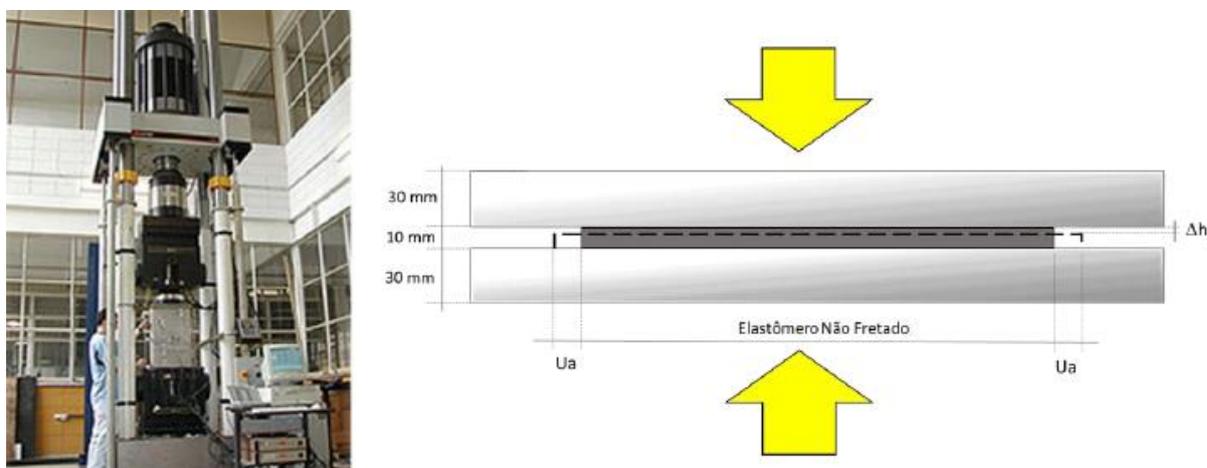
Como visto, o ensaio à compressão para os aparelhos fretados não é adequado aos aparelhos de apoio elastoméricos simples, no entanto, a análise desse método foi importante no que diz respeito ao ciclo inicial de carregamento. Segundo a EN 1337:2016, uma carga correspondente a uma pressão de contato de 1 MPa deve ser aplicada e os medidores de deflexão zerados. Esse procedimento se mostra interessante devido aos escorregamentos iniciais significativos que ocorrem no início do ensaio, principalmente, em aparelhos de apoio elastoméricos simples.

3.1.2 MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS NÃO FRETADOS

Embora não se tenha método padronizado de ensaio de compressão simples para os aparelhos de apoio elastoméricos não fretados em normatização brasileira, Ferreira (1999) realizou esse tipo de ensaio em sua pesquisa de doutorado, com o objetivo de estudar a determinação do módulo de deformação elástico desses elementos e conhecer melhor o seu comportamento à compressão. O método utilizado por Ferreira (1999) será detalhado na sequência.

O ensaio consistiu na medição da deflexão de um aparelho de apoio elastomérico não fretado quando submetido a cargas de compressão crescentes com velocidade de deformação controlada e, a partir dos resultados desses ensaios, foram calculados os módulos de elasticidade E_n . O equipamento de ensaio utilizado foi uma máquina universal INSTRON com atuador servo-hidráulico, conforme apresenta a Figura 3.5.

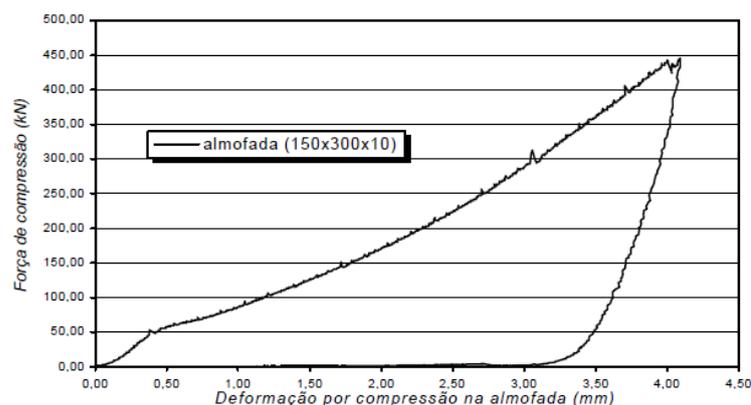
Figura 3.5: Equipamento de ensaio de compressão utilizado por Ferreira (1999).



Fonte: Ferreira, Merlos e Catoia (2018).

Na primeira série de ensaios realizada em 1997, denominada Série A, a carga foi aplicada progressivamente a uma velocidade de 0,3 mm/min até que fosse atingido um limite de deformação na ordem de 40% no aparelho e, então, a carga foi aliviada. A Figura 3.6 ilustra o gráfico *força de compressão x deformação por compressão* obtido para um dos corpos de prova (CP1) na Série A de ensaios, onde foram verificados valores bem exagerados para a deformação por compressão. Esse comportamento repetiu-se nos ensaios de todos os seis corpos de prova ensaiados nessa série.

Figura 3.6: Gráfico obtido no ensaio de compressão simples (Série A – CP1).



Fonte: Ferreira (1999).

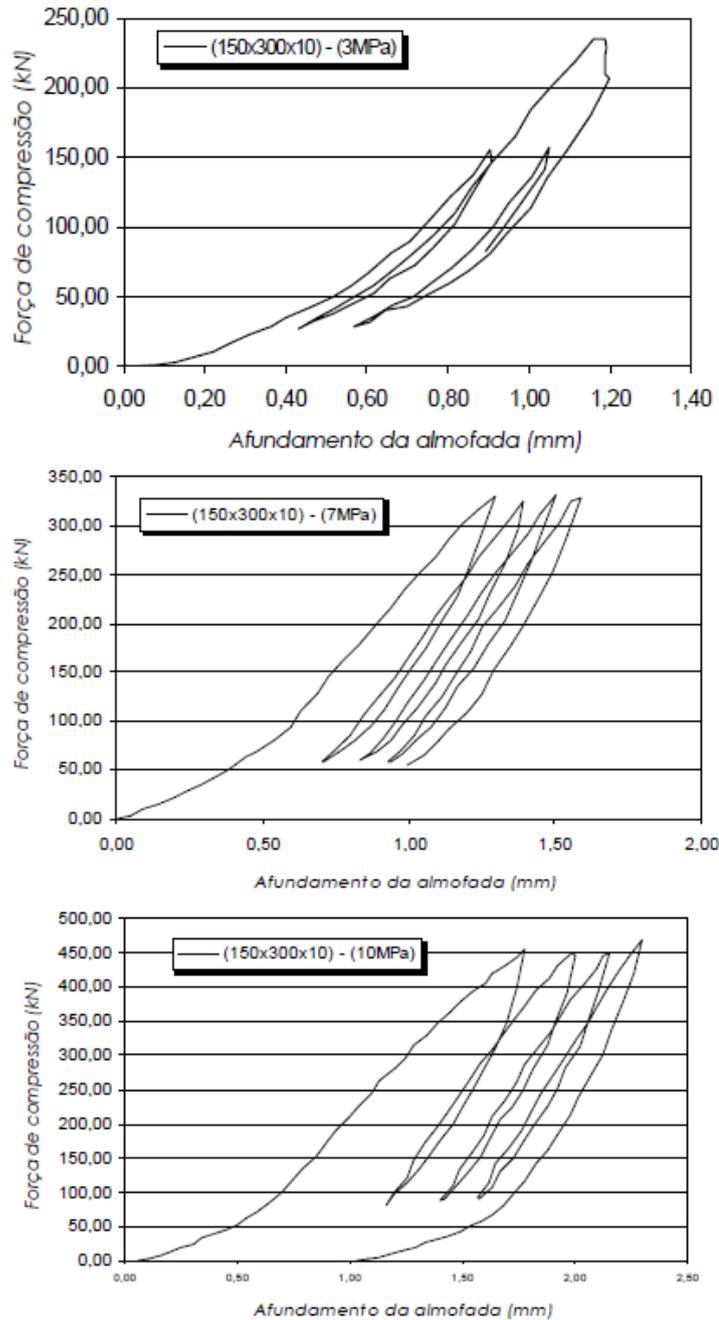
Posteriormente, por ocasião da visita do Professor Kim Elliott na EESC-USP, em 1997, teve-se acesso aos resultados dos ensaios realizados na pesquisa de Keronen (1996) na *Tampere University* (Finlândia), nos quais foram empregadas velocidades de ensaio entre 1,2 mm/min e 3 mm/min.

Assim, Ferreira realizou novos ensaios em 1998, novamente em seis corpos de prova, de mesmas dimensões dos ensaiados na Série A, mas com um aumento na velocidade de aplicação da carga, baseado em Keronen (1996). Na nova série de ensaios, denominada série B, a carga foi aplicada progressivamente a uma velocidade entre 1,2 mm/min e 3 mm/min até que fosse atingido o limite de tensão média no aparelho de apoio elastomérico. Esse processo foi repetido por 4 ciclos de carregamentos para diferentes limites de tensões médias (3 MPa, 7 MPa e 10 MPa).

Na Série B de ensaios, verificou-se uma acomodação inicial significativa dos aparelhos de apoio, que foi causada por escorregamento lateral nas regiões perimetrais com baixas tensões de compressão. Entretanto, à medida que a tensão de compressão ultrapassava valores na ordem de 1 MPa, a relação *força de compressão x deformação por compressão* se estabilizava. Ainda, foi possível observar que a rigidez por compressão (inclinação das curvas) foi semelhante para os quatro ciclos de carregamentos. Esse comportamento está bem ilustrado na Figura 3.7, a qual apresenta os gráficos *força de*

compressão x deformação por compressão obtidos para um dos corpos de prova (CP1) na Série B de ensaios.

Figura 3.7: Gráficos obtidos nos ensaios de compressão simples (Série B – CP1).



Fonte: Ferreira (1999).

Ao comparar os resultados das Séries A e B, pode-se concluir que os ensaios da Série A, com velocidade de 0,3 mm/min, apresentaram rigidez à compressão bem inferior à rigidez verificada nos ensaios com velocidade aumentada, entre 1,2 mm/min e 3 mm/min, o que evidencia que a rigidez inicial à compressão em elastômeros não fretados é muito influenciada pela velocidade de carregamento empregada no ensaio de compressão (FERREIRA, MERLOS, CATOIA, 2019).

Após realizar os ensaios, Ferreira (1999) obteve os valores do módulo de elasticidade aparente através da inclinação das curvas obtidas experimentalmente e também os valores do módulo de elasticidade de acordo com o equacionamento proposto pela NBR 9062:2017. Ao comparar os valores, Ferreira (1999) verificou que a expressão da norma brasileira forneceu uma boa estimativa para o módulo de elasticidade.

No entanto, vale ressaltar que os resultados de Ferreira (1999) foram obtidos para a situação em que o elastômero estava entre duas chapas metálicas polidas, o que se constitui numa condição bem mais desfavorável em relação a situação em que o elastômero está entre elementos pré-moldados de concreto, de acordo com Vinje (1985). Ainda assim, a expressão segundo a NBR 9062:2017 apresentou uma boa calibração para a representação da deformação por compressão simples, o que demonstra que o equacionamento da norma é uma previsão superestimada e, portanto, está a favor da segurança.

3.2 MÉTODOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL DO ELASTÔMERO

Segundo Roeder e Stanton (1983), o comportamento do aparelho de apoio elastomérico depende das propriedades materiais do elastômero. Dado que a dureza é uma das principais características físicas do elastômero e é fator determinante do módulo de deformação transversal, entende-se que esse é um parâmetro fundamental no que diz respeito à compreensão do comportamento do aparelho de apoio elastomérico.

Embora possam ser encontrados valores indicativos de correspondência entre a dureza Shore A e o módulo G do elastômero em bibliografias nacionais e internacionais, sabe-se que essa relação não é precisa, já que, segundo Arditzoglou, Yura e Haines (1995), os valores do módulo G podem variar de acordo com a composição química do material. Portanto, a melhor abordagem para a obtenção do módulo G é a realização do ensaio de cisalhamento puro, o qual será apresentado na sequência.

3.2.1 MÉTODO DE ENSAIO DE CISALHAMENTO PURO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL

O método de ensaio de cisalhamento que será descrito foi especificado pela ASTM D4014 (1989, apud Arditzoglou, Yura e Haines, 1995) e tem por objetivo a determinação do módulo de determinação transversal do elastômero. O ensaio de cisalhamento é realizado em quatro pequenas amostras de elastômero, que são obtidas através de cortes no aparelho de apoio elastomérico original. O ensaio consiste na medição das deformações dessas amostras quando submetidas a cargas de tração crescentes e cíclicas e a configuração dos ensaios,

que consiste na ligação das quatro amostras de elastômero em chapas de aço rígido, está apresentada na Figura 3.8.

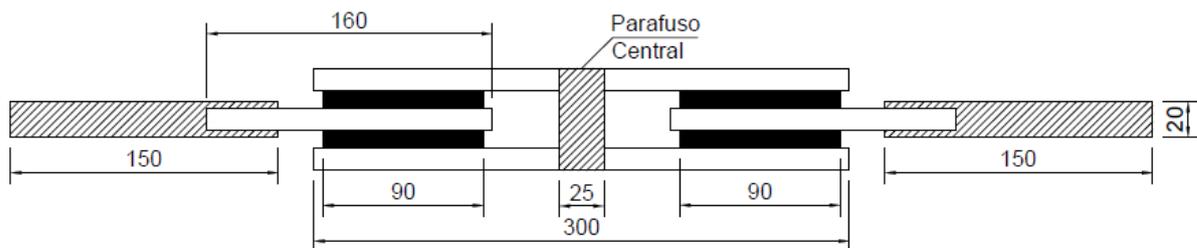
Figura 3.8: Diagrama esquemático do ensaio de cisalhamento.



Fonte: Arditzoglou, Yura, Haines (1995).

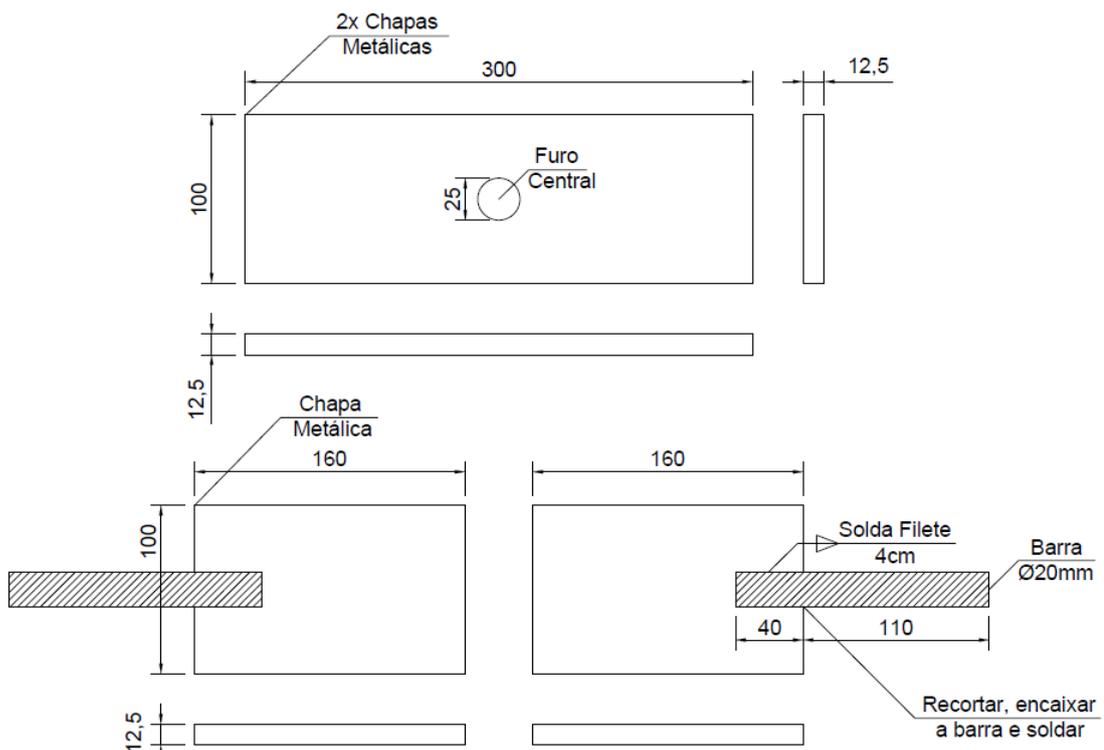
As dimensões dos corpos de prova e chapas metálicas, apresentadas nas Figuras 3.9 e 3.10, foram projetadas de modo a haver a possibilidade da realização desse ensaio, futuramente, no laboratório NETPre. Foram definidas as dimensões de 180x180x10mm para o aparelho de apoio, o qual foi segmentado em quatro partes de 90x90x10mm. A empresa Usicon Pré-Fabricados de concreto já forneceu as chapas metálicas e o ensaio será realizado, conforme ilustram as Figuras 3.11 e 3.12.

Figura 3.9: Detalhamento em vista do esquema de ensaio de cisalhamento.



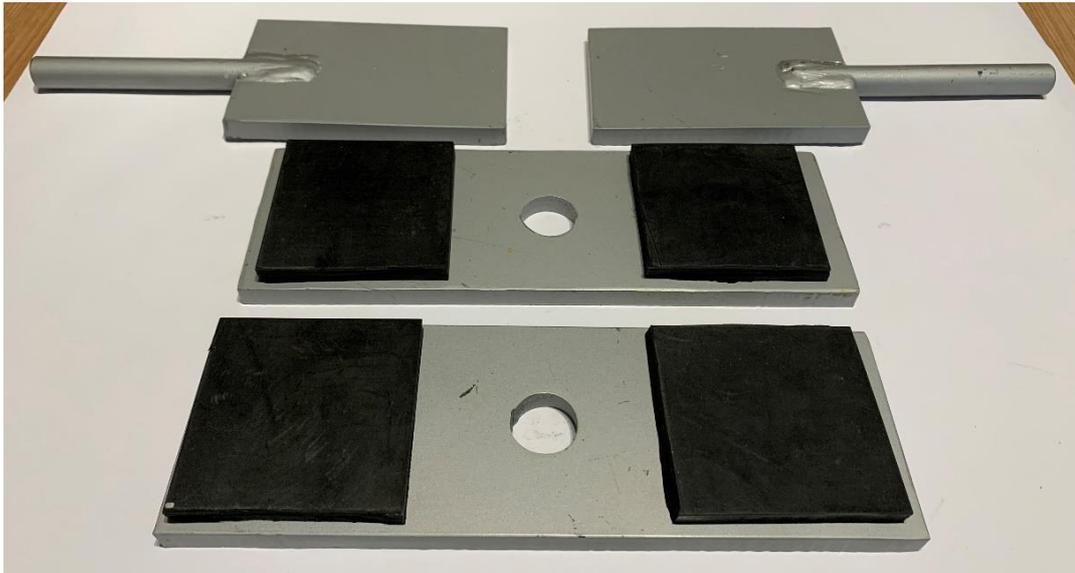
Fonte: Autora (2019).

Figura 3.10: Detalhamento em planta do esquema de ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autora (2019).

Figura 3.11: Elementos do esquema de ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autora (2019).

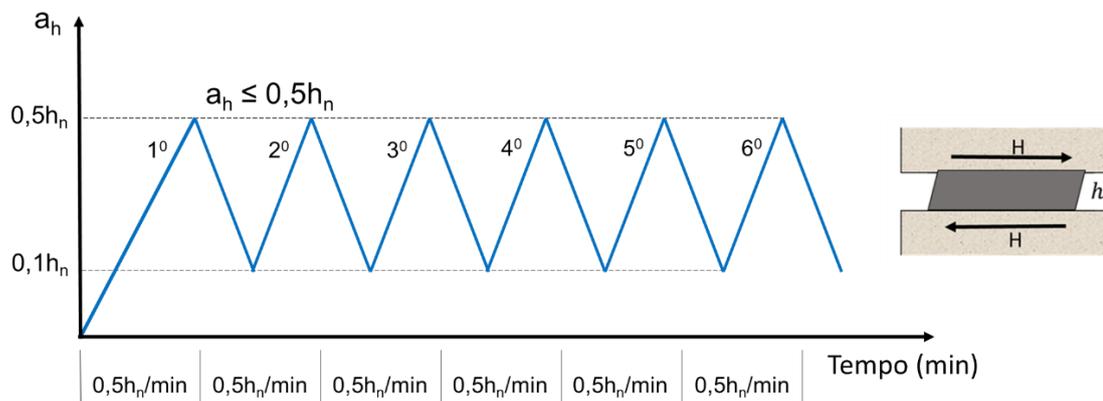
Figura 3.12: Esquema de ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autora (2019).

A força de tração deve ser aplicada progressivamente com deformação controlada, através do uso de atuador servo-hidráulico, a uma velocidade de 50% da espessura do aparelho por minuto, até que seja atingido o limite de deformação de 50% da espessura. Esse processo deve ser repetido por seis ciclos de carregamento, sendo que a inclinação da curva do sexto ciclo é utilizada para a obtenção do módulo de deformação transversal.

Figura 3.13: Procedimento de aplicação de carregamento no ensaio de cisalhamento.



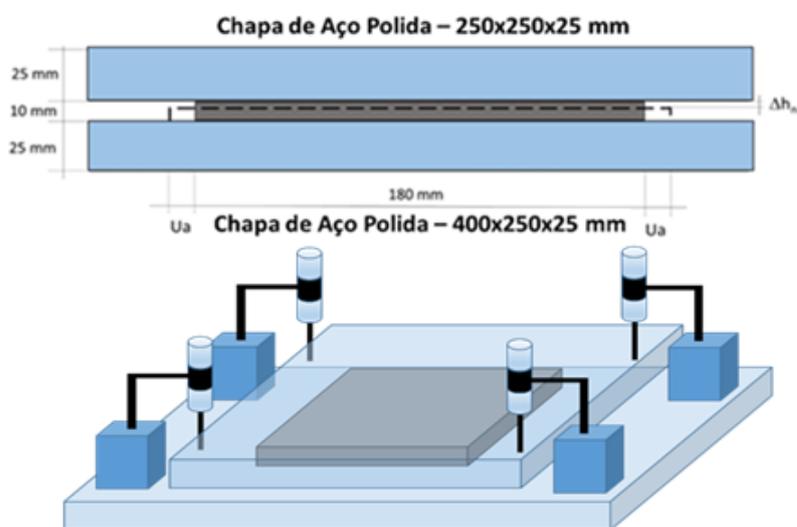
Fonte: Ferreira (2018).

3.2.2 MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL

Ao fim da discussão e análise dos ensaios descritos anteriormente, foi definida, pelo NETPre, uma proposta de método de ensaio de compressão para obtenção do módulo de deformação transversal. Esse procedimento foi apresentado no relatório técnico RT10166 (Ferreira, Merlos, Catoia, 2018) e seu principal objetivo é possibilitar a verificação da conformidade entre o módulo de deformação transversal obtido através do método de cisalhamento puro e o módulo obtido através do método de compressão. Ao realizar ambos os ensaios e compará-los, será possível verificar se o ensaio de compressão realmente fornece valores apropriados para o módulo G , sendo, desse modo, um ensaio de validação.

O ensaio consiste na medição da deformação de um aparelho de apoio elastomérico quando submetido a cargas de compressão crescentes. A partir dos resultados desse ensaio são calculados o módulo de elasticidade aparente $E_{n,a}$ e o módulo de deformação transversal aparente G_a . O equipamento empregado, apresentado esquematicamente na Figura 3.14, deve ser capaz de comprimir o aparelho de apoio sob condições de deformação controlada. Para tal, deve ser utilizada máquina universal com atuador servo-hidráulico.

Figura 3.14: Diagrama esquemático do equipamento de ensaio de compressão em aparelho de apoio simples entre chapas metálicas.



Fonte: Ferreira, Merlos, Catoia (2018).

As chapas de aço polidas devem ter espessura suficiente para garantir que o aparelho de apoio elastomérico seja solicitado uniformemente (recomenda-se a espessura mínima de 25 mm), sendo que suas dimensões em planta devem ser maiores que o corpo de prova de referência, cujas dimensões e fator de forma S são, respectivamente, 180x180x10mm e 4,5, de modo a ser utilizado o mesmo aparelho de apoio do ensaio de cisalhamento (antes de ser segmentado), para efeitos de comparação.

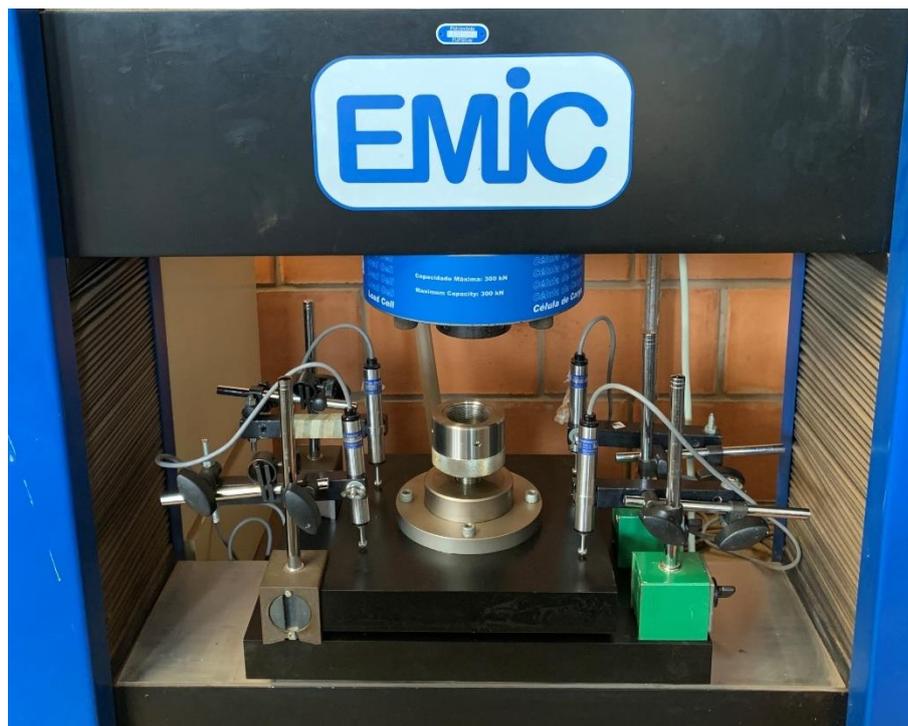
Deve ser possível medir a carga de compressão e as deformações por compressão no aparelho de apoio, inclusive possíveis efeitos de rotação nas chapas metálicas. A deformação média do corpo de prova deve ser determinada utilizando os resultados de no mínimo quatro instrumentos de medição, posicionados de forma equidistante do centro do aparelho e alinhados com o centro do aparelho. Ainda, o aparelho de apoio deve ser posicionado no centro das chapas de aço, com uma precisão de no mínimo 1/50 da sua menor dimensão em planta. O esquema geral de ensaio está apresentado nas Figuras 3.15 e 3.16.

Figura 3.15: Vista frontal do esquema de ensaio de compressão.



Fonte: Autora (2019).

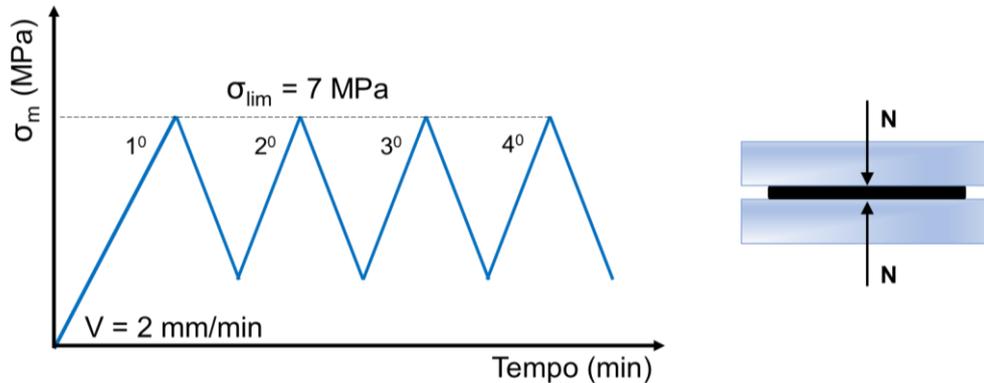
Figura 3.16: Vista superior do esquema de ensaio de compressão.



Fonte: Autora (2019).

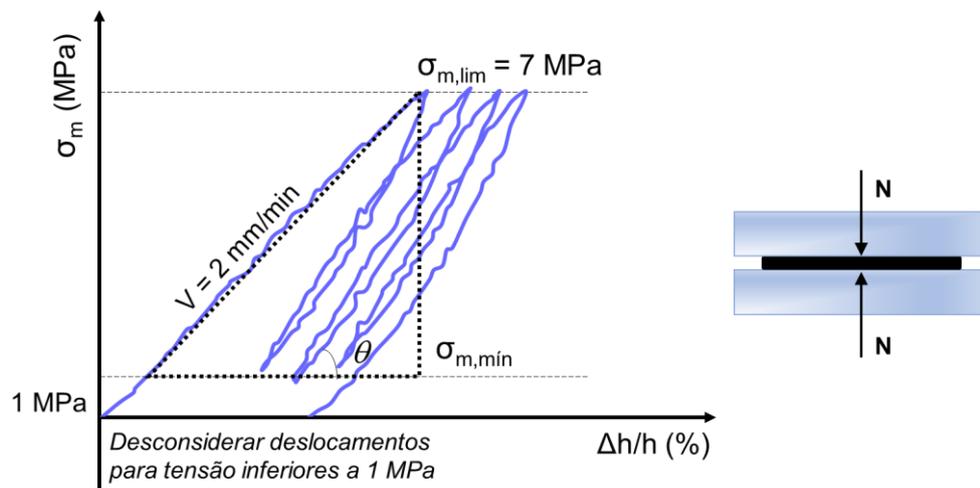
A carga de ensaio deve ser aplicada progressivamente ao aparelho de apoio a uma velocidade de 2 mm/min até que seja atingido o limite de tensão de 7 MPa. Esse processo deve ser repetido por quatro ciclos de carregamentos, conforme apresenta a Figura 3.17. Deve ser obtido o gráfico *tensão de compressão x deformação*, de acordo com o apresentado na Figura 3.18.

Figura 3.17: Procedimento de aplicação de carregamento no ensaio de compressão.



Fonte: Adaptado de Ferreira, Merlos, Catoia (2018).

Figura 3.18: Curva *tensão de compressão x deformação* a ser obtida no ensaio de compressão.



Fonte: Adaptado de Ferreira, Merlos Catoia (2018).

O módulo de elasticidade aparente do aparelho de apoio elastomérico não fretado deve ser obtido, conforme expressa a Equação 3.1.

$$E_{n,a} = \tan(\theta) = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta(\Delta h / h)} \quad (3.1)$$

Onde:

$E_{n,a}$ – módulo de elasticidade aparente.

Por fim, pode-se obter o módulo de deformação transversal aparente do aparelho de apoio elastomérico não fretado, através do ensaio à compressão, conforme expressa a Equação 3.2.

$$G_a = \frac{(E_{n,a} - 2.\Delta\sigma_m)}{10.S} \quad (3.2)$$

Onde:

G_a – módulo de deformação transversal aparente.

Vale ressaltar que nesse método será adotada recomendação similar à da EN 1337:2016, no que se refere ao ciclo inicial de carregamento. Embora as orientações da norma europeia sejam para os aparelhos fretados, em virtude dos escorregamentos iniciais significativos verificados no início dos ensaios realizados por Ferreira (1999) também em aparelhos não fretados, definiu-se que as deflexões correspondentes a uma pressão de contato inferior a 1 MPa deveriam ser descontadas, conforme apresentado anteriormente no gráfico da Figura 3.18.

4. NOVA ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM FERREIRA (1999)

4.1 MOTIVAÇÃO DA NOVA ANÁLISE DE FERREIRA (1999)

Conforme apresentado no capítulo 3 da presente pesquisa, Ferreira (1999) realizou ensaios de compressão simples para os aparelhos de apoio não fretados e, através da inclinação das curvas *força de compressão x deformação por compressão* obtidas experimentalmente, determinou o módulo de elasticidade do elastômero.

Ainda que Ferreira (1999) tenha obtido valores pertinentes para o módulo de elasticidade dos elastômeros, foram verificados valores de deformação elevados nos gráficos até tensões próximas de 1 Mpa, que ocorreram devido ao efeito da acomodação inicial significativa do aparelho de apoio à medida que o carregamento é aplicado pela primeira vez.

Dessa forma, optou-se por determinar novamente o módulo de elasticidade do elastômero, adotando a recomendação da EN 1337:2016. Assim, na nova análise, as deflexões para as tensões inferiores a 1 MPa foram desconsideradas na inclinação dos gráficos *força de compressão x deformação por compressão*. Além disso, foram calculados os valores de deformação transversal para os aparelhos de apoio, através do equacionamento proposto pela NBR 9062:2017. Os resultados obtidos nessa análise serão apresentados a seguir.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NA NOVA ANÁLISE DE FERREIRA (1999)

Ferreira (1999) realizou ensaios de compressão simples em seis diferentes aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, com dureza Shore 60 A e geometria variada. As dimensões e fator de forma dos corpos de prova ensaiados estão apresentados na Tabela 4.1. Conforme apresentado no capítulo 3, foram realizadas duas séries de ensaios, denominadas A e B, com diferentes velocidades de aplicação de carregamento com deformação controlada.

Tabela 4.1: Parâmetros dos aparelhos de apoio ensaiados em Ferreira (1999)

Aparelho de Apoio	a (mm)	b (mm)	h _n (mm)	S
CP 1	150	300	10	5
CP 2	60	300	10	2,5
CP 3	150	150	15	2,5
CP4	150	300	15	3,33
CP 5	200	300	15	4
CP 6	250	300	10	6,82

Fonte: Autora (2019).

Em resumo, a série A consistiu na aplicação de cargas a uma velocidade de 0,3 mm/min até que fosse atingido um limite de deformação na ordem de 40% da espessura do aparelho de apoio. Já na série B, foram realizados 4 ciclos de carregamentos para diferentes limites de tensões médias (3 MPa, 7 MPa e 10 MPa) e a velocidade de carregamento foi aumentada para valores entre 1,2 mm/min e 3 mm/min.

Para a realização da nova análise, os gráficos *força de compressão (N) x deformação do aparelho de apoio (Δh)* obtidos nos ensaios de Ferreira (1999) foram plotados novamente, já que os registros digitais dos gráficos da pesquisa não foram encontrados. Feito isso, foram definidos os trechos das curvas para os quais seriam calculados o módulo de elasticidade aparente (módulo tangente de deformação à compressão), desconsiderando as deflexões para as tensões inferiores a 1 MPa. Em seguida, o módulo de elasticidade aparente foi calculado segundo a Equação 4.1.

$$E_{n,a} = \frac{\Delta P \cdot h}{\Delta(\Delta h) \cdot A} \quad (4.1)$$

Onde:

$E_{n,a}$ – módulo de elasticidade aparente;

ΔP – diferença entre os valores de força de compressão máxima e mínima, dentro do trecho definido;

$\Delta(\Delta h)$ – diferença entre os valores de deformação máxima e mínima, dentro do trecho definido;

A – Área do aparelho de apoio elastomérico simples.

Por fim, obteve-se o módulo de deformação transversal aparente do aparelho de apoio, conforme expressa a Equação 4.2.

$$G_a = \frac{(E_{n,a} - 2 \cdot \Delta \sigma_m)}{10 \cdot S} \quad (4.2)$$

Onde:

G_a – módulo de deformação transversal aparente.

A NBR 9062:2017 recomenda que seja adotado o valor indicativo de correspondência para de 1 MPa o módulo G em aparelhos de apoio com dureza Shore 60 A. Logo, quanto mais próximo de 1 MPa estivesse o módulo de deformação transversal aparente, mais coerente seria considerado.

O procedimento descrito foi efetuado para todos os ensaios de Ferreira (1999). A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os corpos de prova na Série A de ensaios.

Tabela 4.2: Valores de módulo G aparente para a série A de ensaios

Aparelho de Apoio	$\Delta P/\Delta(\Delta h)$ (kN/mm)	$E_{n,a}$ (MPa)	G_a (MPa)
CP 1 (S = 5)	92	20	0,27
CP 2 (S = 2,5)	33	18	0,41
CP 3 (S = 2,5)	25	17	0,42
CP4 (S =3,33)	61	20	0,38
CP 5 (S = 4,0)	86	21	0,36
CP 6 (S =6,82)	409	55	0,68

Fonte: Autora (2019).

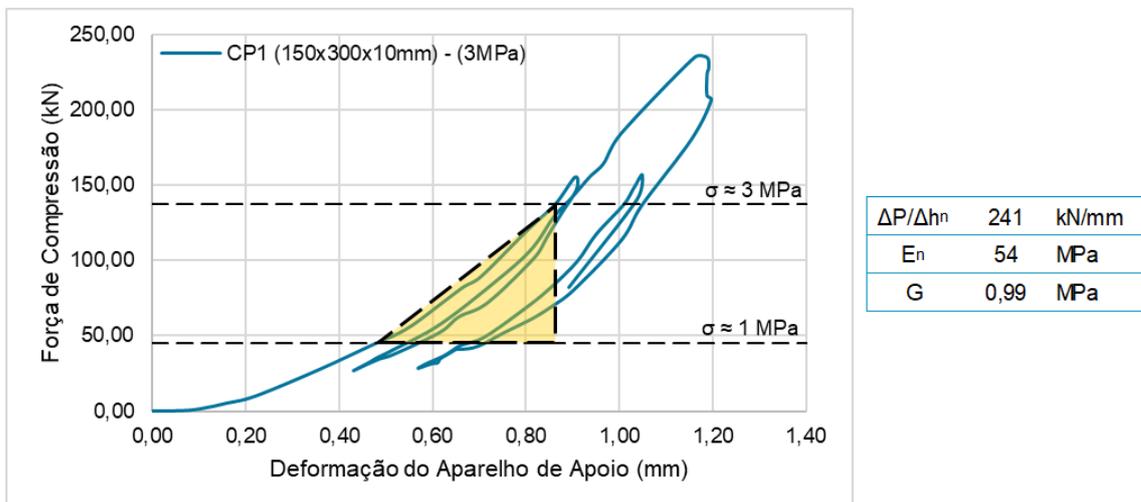
Ao verificar os resultados obtidos para a série A de ensaios, constatou-se que os valores do módulo G aparente foram muito baixos. Isso ocorreu devido a influência da velocidade de carregamento na rigidez dos elastômeros.

A velocidade empregada nessa série foi extremamente baixa e, dessa forma, houve um aumento dos efeitos de expansão lateral e deslizamento do aparelho de apoio. Esses efeitos são somados ao valor de deformação do aparelho que, conseqüentemente, sofre um aumento considerável e passa a ter um valor que, na realidade, não representa somente sua deformação por compressão e, assim, pode ser considerado inadequado.

Sabe-se que o módulo G é um parâmetro que está relacionado com a deformação do aparelho de apoio e, dessa forma, valores distorcidos de deformação causam valores de módulo G também distorcidos. Portanto, ensaios de compressão com velocidade baixa de carregamento apresentam resultados incoerentes, como ocorreu nos ensaios da série A de Ferreira (1999).

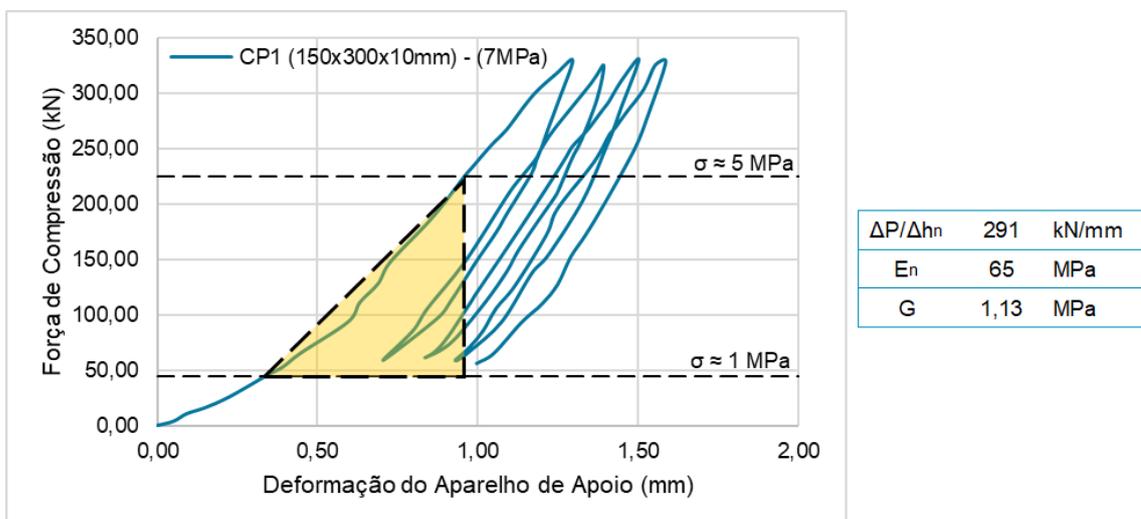
Na série B de ensaios, a aplicação de carregamento ocorreu em maior velocidade, o que resultou em valores de módulo G mais altos e próximos de 1 MPa. Além disso, verificou-se maior conformidade nos valores de módulo G obtidos para os aparelhos de apoio com fator de forma maior, isso é, para os corpos de prova CP 1, CP 5 e CP 6, os quais estão ilustrados nas Figuras de 4.1 a 4.9. A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os corpos de prova na Série B de ensaios.

Figura 4.1: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 3 MPa.



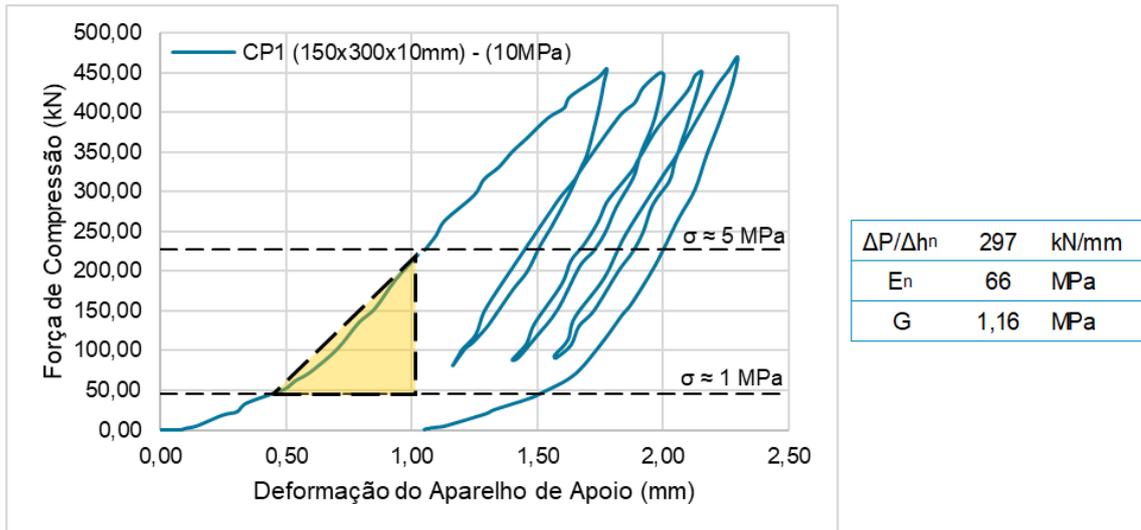
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.2: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 7 MPa.



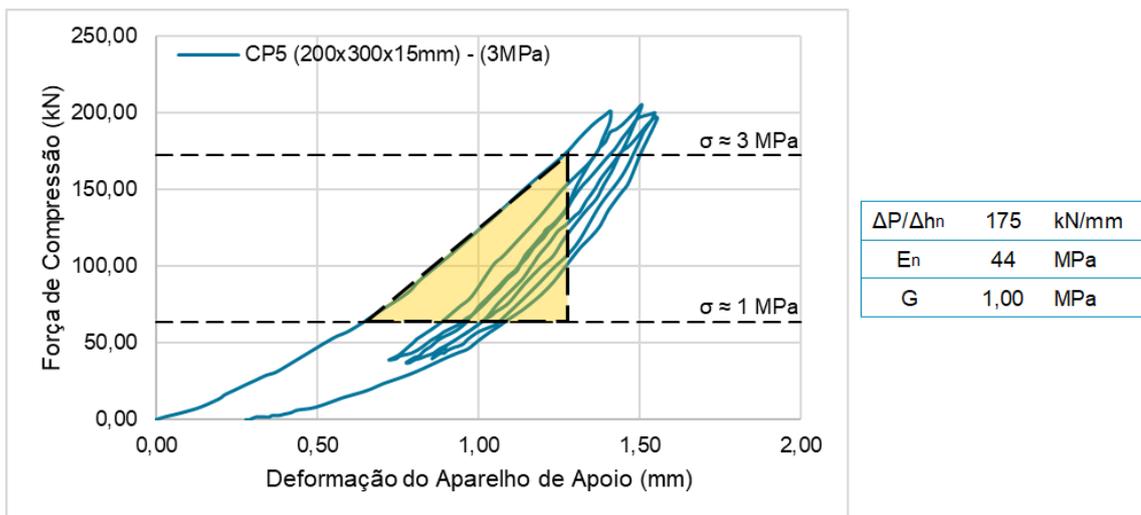
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.3: Gráfico obtido no ensaio do CP1 para tensão limite de 10 MPa.



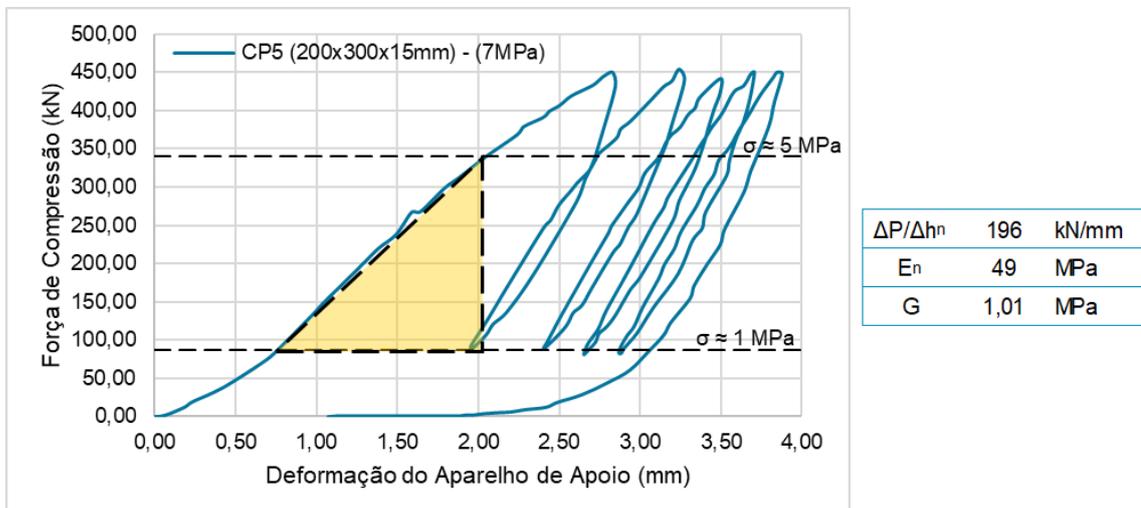
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.4: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 3 MPa.



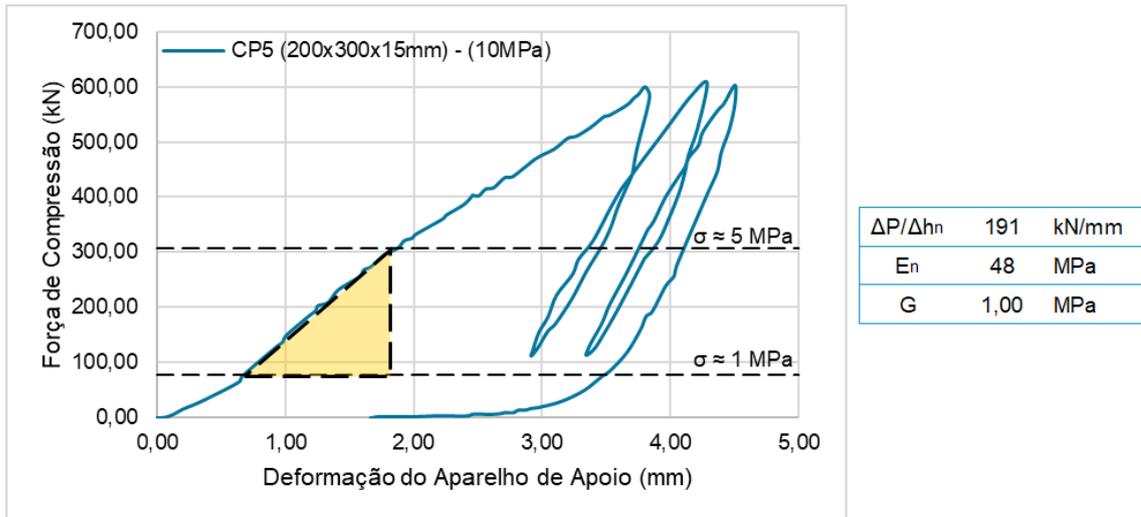
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.5: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 7 MPa.



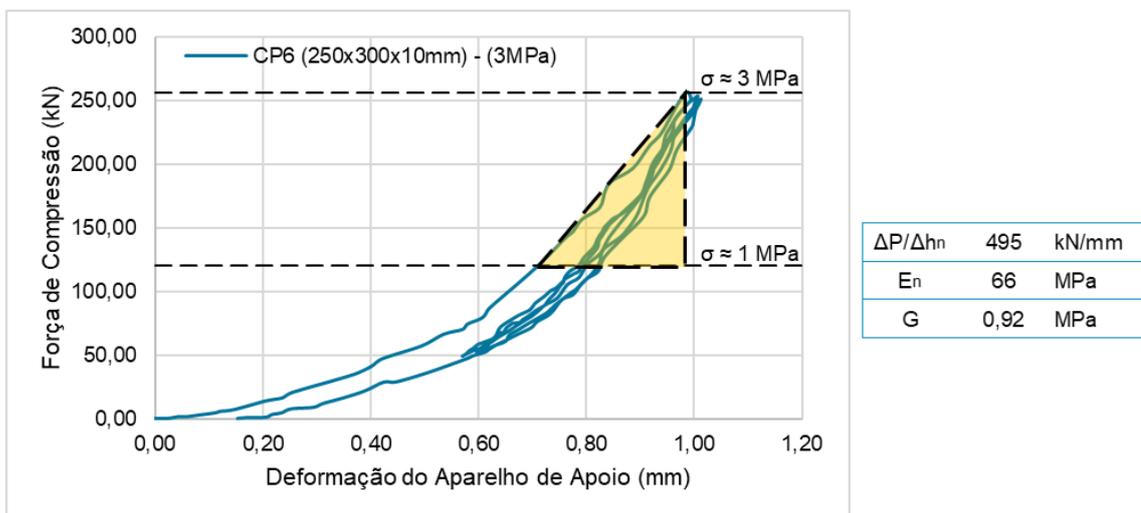
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.6: Gráfico obtido no ensaio do CP5 para tensão limite de 10 MPa.



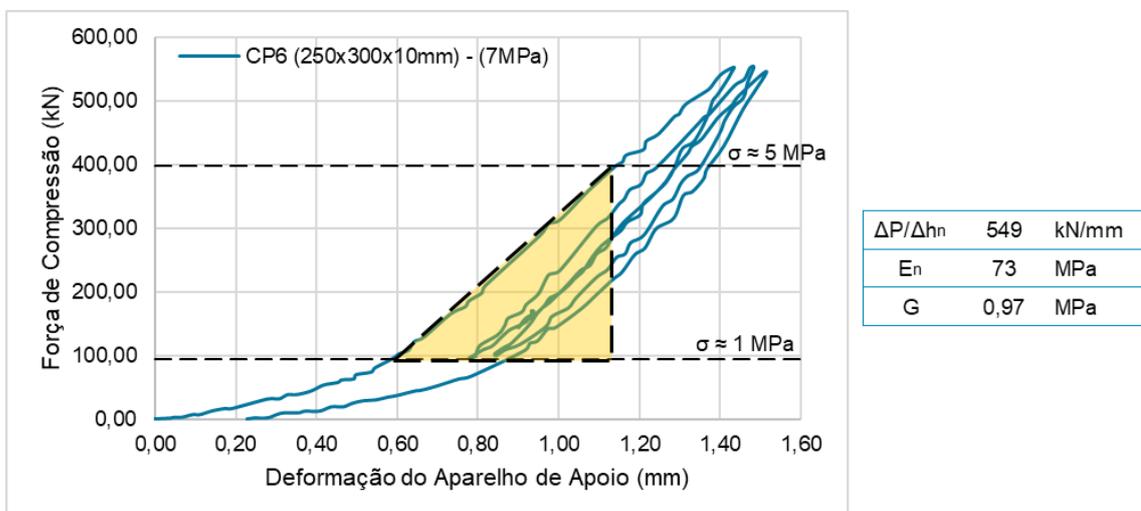
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.7: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 3 MPa.



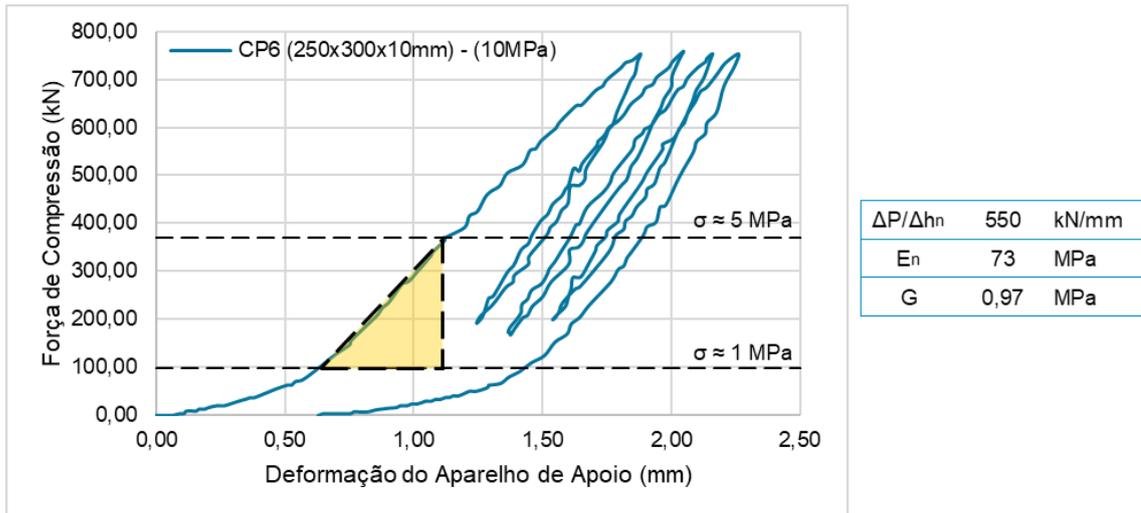
Fonte: Autora (2019).

Figura 4.8: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 7 MPa.



Fonte: Autora (2019).

Figura 4.9: Gráfico obtido no ensaio do CP6 para tensão limite de 10 MPa.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 4.3: Valores de módulo G estimados para a série B de ensaios

Aparelho de Apoio	σ_n (MPa)	$\Delta P/\Delta(\Delta h)$ (kN/mm)	E_n (MPa)	G (MPa)
CP 1 S = 5,0	3	241	54	0,99
	7	291	65	1,13
	10	297	66	1,16
CP 2 S = 2,5	3	40	22	0,73
	7	50	28	0,79
	10	53	29	0,84
CP 3 S = 2,5	3	34	22	0,74
	7	40	27	0,81
	10	46	31	0,92
CP4 S = 3,33	3	89	30	0,77
	7	93	31	0,70
	10	87	29	0,63
CP 5 S = 4,0	3	175	44	1,00
	7	196	49	1,01
	10	191	48	1,00
CP 6 S = 6,82	3	495	66	0,92
	7	549	73	0,97
	10	550	73	0,97

Fonte: Autora (2019).

Ao contrapor os valores de módulo G obtidos para a série A e B de ensaios, evidencia-se que a velocidade de carregamento é fator determinante no ensaio de compressão simples em aparelhos de apoio elastoméricos. Uma vez que a velocidade esteja devidamente ajustada, o próprio ensaio de compressão pode ser utilizado para avaliar o módulo G do aparelho.

Os ensaios de Ferreira (1999) foram realizados para a situação em que o elastômero estava entre duas chapas metálicas, mesma situação para a qual a expressão da NBR 9062:2017 foi calibrada. Assim, a obtenção de resultados precisos de módulo G, isso é, valores próximos de 1 MPa, significa que o ensaio de compressão simples foi realizado em situações similares aos empregados para a calibração da expressão da norma. Visto isso, determinou-se que a velocidade de carregamento nos ensaios do programa experimental a ser realizado nessa pesquisa seria baseada nos ensaios da série B de Ferreira (1999), ou seja, cerca de 1,2 a 3 mm/segundo.

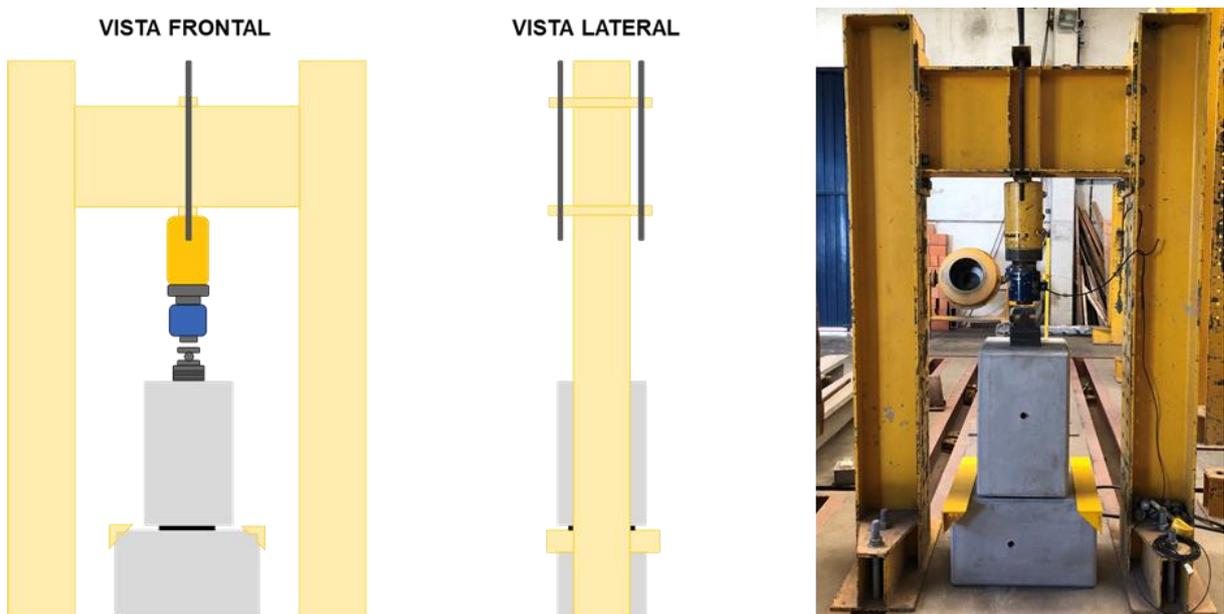
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 DESCRIÇÃO GERAL

Neste capítulo, será apresentado e descrito detalhadamente o programa experimental que foi desenvolvido no Laboratório NETPre – Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto – da Universidade Federal de São Carlos, com a finalidade da determinação do módulo tangente de deformação à compressão (módulo de elasticidade aparente) e da rigidez à compressão dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, de modo a caracterizar o comportamento desses elementos quando submetidos à compressão.

A investigação experimental foi fundamentada na realização do ensaio de compressão simples em aparelho de apoio de elastômero, método que consiste na aplicação de esforços de compressão normal à maior superfície do corpo de prova. O programa se baseou na realização de ensaios em corpos de prova em escala real, os quais se diferenciavam por sua geometria e fator de forma. O esquema geral de ensaio está ilustrado na Figura 5.1 e, conforme apresenta a figura, o esquema foi dotado de dois blocos, entre os quais foram posicionados os aparelhos de apoio ensaiados.

Figura 5.1: Esquema geral de ensaio.



Fonte: Autora (2019).

O principal objetivo dos ensaios foi estimar experimentalmente a rigidez à compressão dos aparelhos de apoio de elastômero. A partir dos ensaios, esperava-se representar

graficamente a relação entre a tensão de compressão aplicada e a deformação por compressão obtida para o corpo de prova e, através da inclinação desses gráficos, obter o módulo de elasticidade aparente. Por fim, com base no equacionamento proposto pela NBR 9062:2017, pretendia-se deduzir também o módulo G aparente do aparelho de apoio.

Visto que o módulo G está associado à dureza do elastômero, esses ensaios seriam apropriados também para validar ou confirmar a dureza do aparelho de apoio, constituindo-se, portanto, de uma identificação rápida do tipo do material para controle de qualidade. Outro fator importante que se esperava obter a partir dos ensaios, era a padronização de uma velocidade de aplicação de carregamento, uma vez que, conforme exposto anteriormente, essa afeta diretamente na rigidez obtida para os aparelhos de apoio.

O modelo de ensaio seguiu parâmetros da pesquisa experimental realizada em Ferreira (1999) visando, entretanto, à adequação de um procedimento que pudesse ser reproduzido com equipamentos simples, como por exemplo, o emprego de atuador hidráulico com controle da velocidade de aplicação de força. Em Ferreira (1999), os ensaios foram realizados com deformação controlada em máquina universal servo-hidráulico, que é um equipamento de alto custo e difícil de ser encontrado. Vale ressaltar que o autor investigou o comportamento do elastômero entre duas chapas metálicas lisas, que se diferencia da situação proposta nessa pesquisa, onde se tem o elastômero entre duas superfícies de concreto.

Nos itens a seguir, serão apresentados mais detalhes relativos aos aparelhos de apoio elastoméricos simples e aos blocos de concreto pré-moldado utilizados nos ensaios, bem como o roteiro para definição, preparação e montagem dos modelos e o esquema de instrumentação dos mesmos. Por fim, serão apresentados os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa. Após a realização dos ensaios, os dados obtidos foram analisados de acordo com a teoria e as equações apresentadas anteriormente e foram feitas comparações entre os modelos e com dados obtidos em outras pesquisas experimentais.

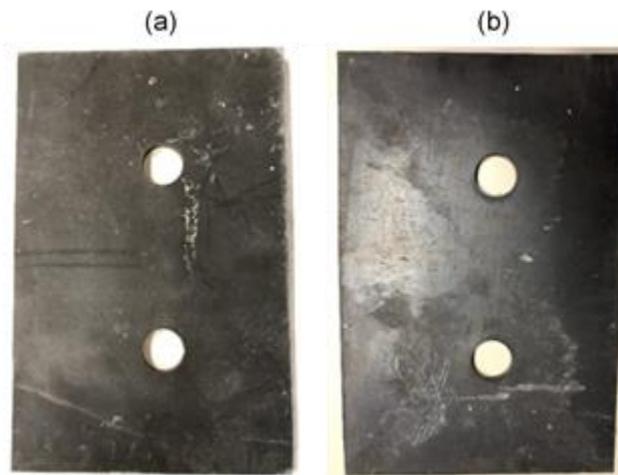
5.2 APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS SIMPLES

O ensaio à compressão foi realizado em dois lotes de aparelhos de apoio elastoméricos simples, os quais foram fabricados por duas diferentes empresas. Foi solicitado à essas empresas que os elastômeros doados possuíssem dureza Shore de 60 A e que os corpos de prova se diferenciasssem por sua geometria e fator de forma, para que assim fossem analisados diferentes parâmetros referentes ao elemento. Ainda, procurou-se utilizar corpos de prova com geometrias usuais para aparelhos de apoio em ligações de concreto pré-moldado.

Os dois lotes ensaiados foram denominados A e B. O Lote A possuía dois corpos de prova de mesmas dimensões, retangulares, com furos e foi utilizado nos ensaios preliminares, nos quais foram testados dois protocolos de ensaio diferentes, que serão descritos a seguir. O Lote B possuía três corpos de prova, sendo dois retangulares e um quadrado, todos com furos.

As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram os aparelhos de apoio ensaiados nos Lotes A e B, respectivamente, enquanto as Tabelas 5.1 e 5.2 indicam suas dimensões, fator de forma e dureza Shore, nessa mesma ordem. O fator de forma para cada corpo de prova foi calculado de acordo com o equacionamento apresentado no Apêndice A e a dureza Shore A foi fornecida pelo fabricante do elastômero, que a obteve através do ensaio de dureza para controle de qualidade.

Figura 5.2: Lote A (a) Corpo de prova 1 (b) Corpo de prova 2.



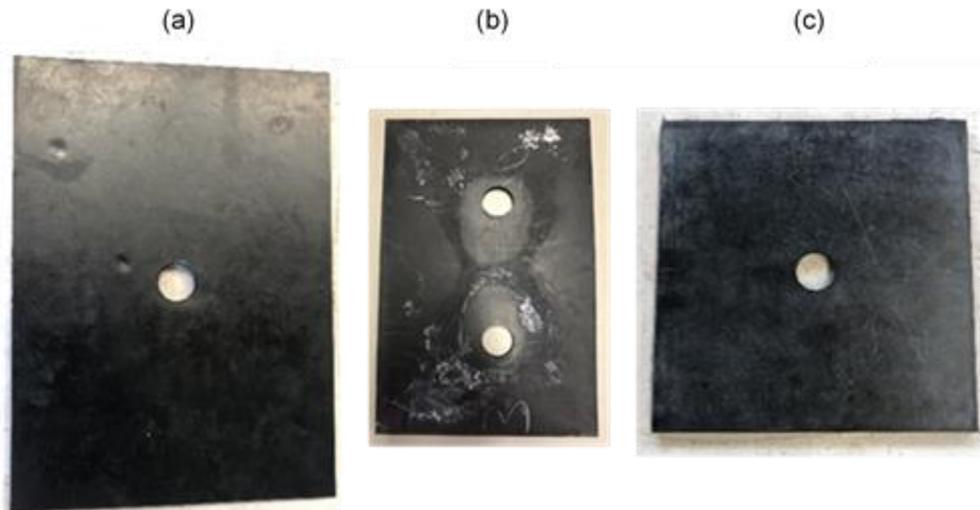
Fonte: Autora (2019).

Tabela 5.1: Parâmetros referentes aos aparelhos de apoio do Lote A

Corpo de Prova	a (mm)	b (mm)	h (mm)	Furos (mm)	Fator de Forma	Dureza Shore A
1	220	340	10	2 x Ør 35	5,44	62
2	220	340	10	2 x Ør 35	5,44	62

Fonte: Autora (2019).

Figura 5.3: Lote B (a) Corpo de prova 1 (b) Corpo de prova 2 (c) Corpo de prova 3.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 5.2: Parâmetros referentes aos aparelhos de apoio do Lote B

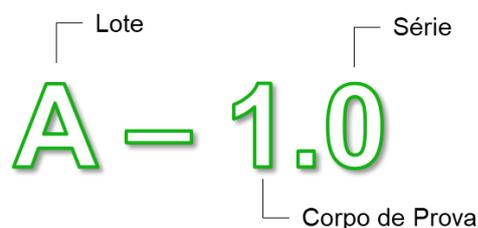
Corpo de Prova	a (mm)	b (mm)	h (mm)	Furos (mm)	Fator de Forma	Dureza Shore A
1	260	360	10	1 x Øf 30	6,96	65
2	160	260	10	2 x Øf 30	3,91	65
3	260	260	10	1 x Øf 33	5,84	65

Fonte: Autora (2019).

Ao todo, foram ensaiados cinco corpos de prova. Cada um foi ensaiado três vezes, sendo que para a primeira série de carregamento, denominada escorvamento, os deslocamentos influenciados pela acomodação significativa do aparelho de apoio para as tensões inferiores a 1 MPa foram desconsiderados no gráfico e, então, foram procedidas mais duas séries de carregamentos, mas sem a desconsideração dos deslocamentos iniciais.

Assim, em virtude do grande número de ensaios realizados, para melhor compreensão dos resultados, adotou-se a nomenclatura apresentada na Figura 5.4. Ainda, optou-se por utilizar a cor verde para os gráficos do Lote A e a cor azul para os gráficos do Lote B.

Figura 5.4: Nomenclatura adotada para os ensaios.



Fonte: Autora (2019).

5.3 BLOCOS

Os blocos utilizados no esquema de ensaio estão apresentados na Figura 5.5 e foram confeccionados com seção de 65 cm x 40 cm x 40 cm (H x B x B), conforme ilustra a Figura 5.6. O detalhamento da armadura dos blocos está apresentado na Figura 5.7 e a relação e quantidade da armadura utilizada estão indicadas nas Tabelas 5.3 e 5.4. Foi utilizado concreto de 50 MPa para a fabricação dos blocos e a carga e descarga na fábrica Leonardi e no laboratório NETPre ocorreu com o auxílio de ponte rolante e com a utilização de tubo passante, posicionado 5 cm acima do centro de gravidade do bloco.

Figura 5.5: Blocos B01/B02.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 5.3: Relação das barras dos blocos

BLOCOS B01 / B02				
Número da barra	Diâmetro (ϕ em mm)	Quantidade	Comprimento (cm)	
			Unitário	Total
1	20,0	4	60	240
2	10,0	8	154	1232
3	10,0	4	153	612
4	10,0	4	151	604

Fonte: Autora (2019).

Tabela 5.4: Resumo da quantidade de aço utilizada na armadura dos blocos

Diâmetro (ϕ em mm)	Comprimento (m)	Peso (kgf)	Peso + 10% (kgf)
10,0 (0,624 kgf/m)	24,48	15,3	16,8
20,0 (2,480 kgf/m)	2,40	6,0	6,6
Total			23,4

Fonte: Autora (2019).

5.4 DEFINIÇÃO, PREPARAÇÃO E MONTAGEM DOS MODELOS

Em virtude de não haver um procedimento padronizado de ensaio de compressão simples para os aparelhos de apoio elastoméricos não fretados, fez-se necessário o desenvolvimento e validação do mesmo. Para isso, foi feita uma extensa revisão de bibliografia nacional e internacional, até que fosse possível haver confiabilidade no procedimento utilizado, além da adequação de um procedimento que pudesse ser reproduzido com equipamentos simples.

Diversos procedimentos foram discutidos e analisados e, por fim, foi definido o esquema de ensaio que melhor delimitava o escopo desta pesquisa. Assim, iniciou-se a preparação e montagem do modelo, que foi relativamente simples, e seguiu o seguinte roteiro:

- i) Desenho do esquema de ensaio, indicando a posição do pórtico metálico, o esquema de aplicação da força e da instrumentação, o tipo de carregamento e os equipamentos a serem utilizados;
- ii) Verificação da viabilidade técnica dos ensaios (equipamentos disponíveis, montagem do ensaio, cronograma);

- iii) Identificação da instrumentação a ser utilizada (tipo, quantidade e posição). Conferência do funcionamento e número suficiente de equipamentos disponíveis no laboratório;
- iv) Marcação da posição do bloco B01, sendo esse centralizado em relação ao pórtico e à célula de carga;
- v) Posicionamento do bloco B01 (Figura 5.8);
- vi) Posicionamento das canaletas metálicas e fixação das mesmas com cola quente para receber a instrumentação;
- vii) Marcação da posição do aparelho de apoio, sendo esse centralizado em relação ao bloco B01 e à célula de carga;
- viii) Posicionamento do primeiro aparelho de apoio a ser ensaiado (A-1);
- ix) Marcação da posição do bloco B02, sendo esse centralizado em relação ao bloco B01 e à célula de carga;
- x) Posicionamento do bloco B02 (Figura 5.9);
- xi) Marcação da posição da rótula, sendo essa centralizada em relação ao bloco B02 e à célula de carga;
- xii) Posicionamento da rótula para receber o carregamento (Figura 5.10).

Figura 5.8: Verificação do posicionamento do bloco B01.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5.9: Posicionamento do bloco B02.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5.10: Posicionamento da rótula para receber o carregamento.



Fonte: Autora (2019).

Como foram realizados ensaios em diversos corpos de prova, a cada ensaio, toda a instrumentação e a rótula eram retiradas e o bloco B02 era elevado – com o auxílio de ponte rolante e com a utilização de tubo passante – para que fosse feita a troca do aparelho de apoio elastomérico ensaiado e, depois, o bloco B02 era posicionado novamente e a instrumentação e rótula eram realocadas.

5.5 INSTRUMENTAÇÃO

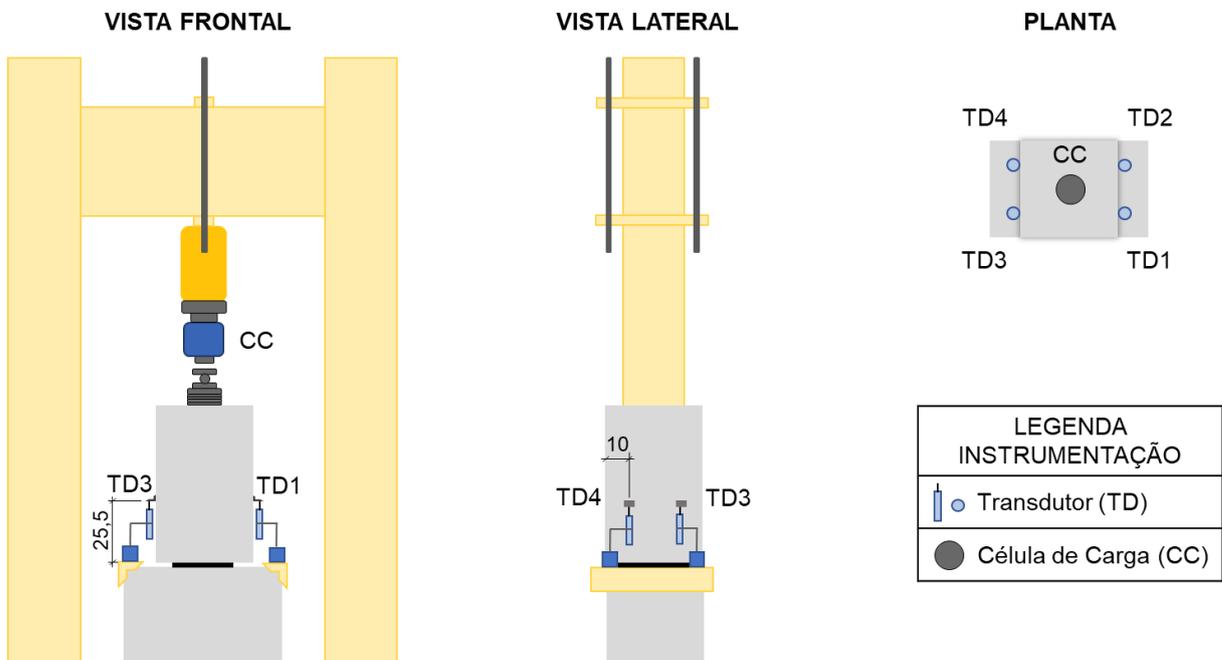
A investigação experimental foi realizada em cinco modelos, sendo esses diferenciados apenas pelo aparelho de apoio elastomérico não fretado. A análise dos modelos foi realizada através da aplicação de carregamento incremental monotônico, composto de

uma força concentrada no centro do bloco B02, controlada a uma velocidade constante de 100 kN/min, a qual foi definida com fundamento nos estudos de Ferreira (1999), com o intuito de diminuir os efeitos do escorregamento inicial do corpo de prova.

O carregamento foi aplicado por meio da utilização de um atuador hidráulico da marca ENERPAC com capacidade de 1000 kN, alimentado por uma bomba manual e, de modo a se obter uma maior precisão no controle da velocidade de aplicação da força, foi utilizado um cronômetro digital. As cargas de ensaio no atuador para cada um dos modelos foram estimadas considerando o limite para pressão de contato dos aparelhos de apoio de 7,0 MPa, recomendado pela NBR 9062:2017, e estão apresentadas no Apêndice B.

Os equipamentos de medição foram definidos com o objetivo de coletar as leituras de força e deslocamento, parâmetros necessários à análise teórica dos modelos. Para tal, foram utilizados célula de carga, posicionada no centro do bloco, e quatro transdutores, posicionados de forma equidistante do centro do aparelho de apoio. Todos os pontos onde haveriam transdutores foram medidos e marcados e as bases destinadas a apoiá-los foram fixadas com cola quente. Feito isso, todos os instrumentos utilizados foram conectados ao sistema de aquisição de dados presente no laboratório, o qual fornece as leituras diretamente ao computador ligado a ele. O esquema de instrumentação dos modelos está ilustrado nas Figuras de 5.11 a 5.15.

Figura 5.11: Vistas e planta do esquema de instrumentação dos modelos.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5.12: Vista frontal da instrumentação dos modelos.



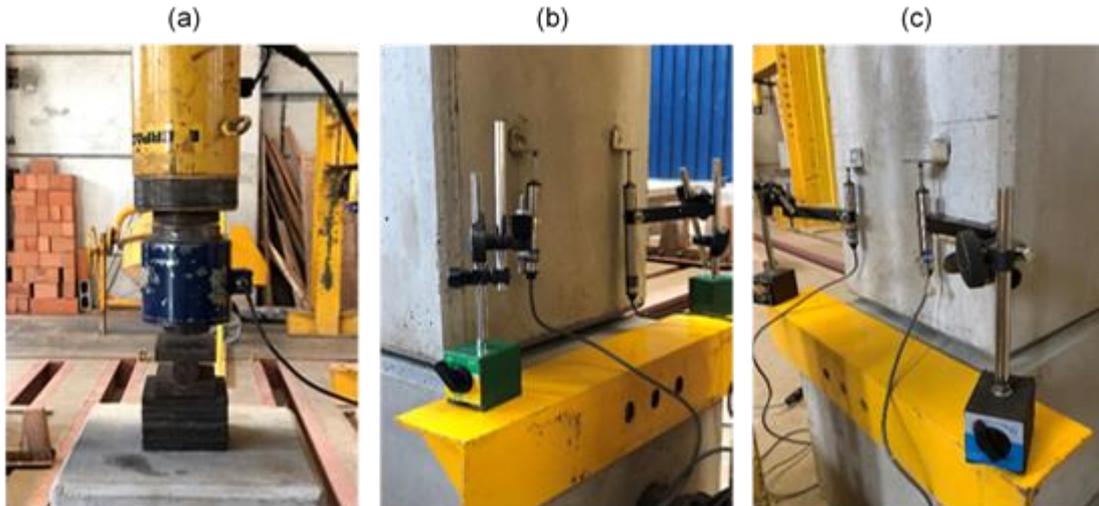
Fonte: Autora (2019).

Figura 5.13: Vista lateral e superior da instrumentação dos modelos.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5.14: Detalhes da instrumentação. (a) Célula de Carga. (b) Transdutores TD1 e TD2. (c) Transdutores TD3 e TD4.



Fonte: Autora (2019).

Figura 5.15: Sistema de aquisição de dados e computador.



Fonte: Autora (2019).

Os tipos de instrumentos que foram utilizados nos ensaios dos modelos, suas respectivas marcas e finalidades, bem como o número do canal a que estavam conectados os aparelhos de medição ao longo dos ensaios, encontram-se listados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Resumo dos instrumentos utilizados nos ensaios

Instrumento	Marca	Finalidade	Canal
Sistema de aquisição de dados de extensometria	Vishay Measurements Group, Inc.	Aquisição automática de dados	-
Cilindro hidráulico	ENERPAC	Aplicação de carregamento nas vigas	-
Célula de carga (CC)	MSI	Leituras de força	11
Transdutor linear 1 (TD1)	MSI	Leituras de deslocamento	12
Transdutor linear 2 (TD2)	MSI	Leituras de deslocamento	13
Transdutor linear 3 (TD3)	MSI	Leituras de deslocamento	14
Transdutor linear 4 (TD4)	MSI	Leituras de deslocamento	15

Fonte: Autora (2019).

5.5.1 METODOLOGIA ADOTADA PARA OS TRANSDUTORES

Através do uso de quatro transdutores, foram obtidos os deslocamentos verticais nas extremidades dos corpos de prova e, por meio do cálculo da média das leituras de deslocamento, pode-se obter a deformação por compressão dos aparelhos de apoio, conforme apresenta a Equação 5.1. Essa metodologia foi adotada visando obter uma maior precisão nos resultados, uma vez que o elastômero não se deforma de maneira uniforme, além de estar sujeito à fatores externos, como excentricidades na aplicação da força.

$$\Delta h = \frac{TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4}{4} \quad (5.1)$$

Onde:

Δh – deformação por compressão do aparelho de apoio;

TD_1, TD_2, TD_3, TD_4 – leituras fornecidas pelos transdutores 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nos itens a seguir, estão apresentados os resultados obtidos para cada um dos lotes ensaiados à compressão simples na presente pesquisa.

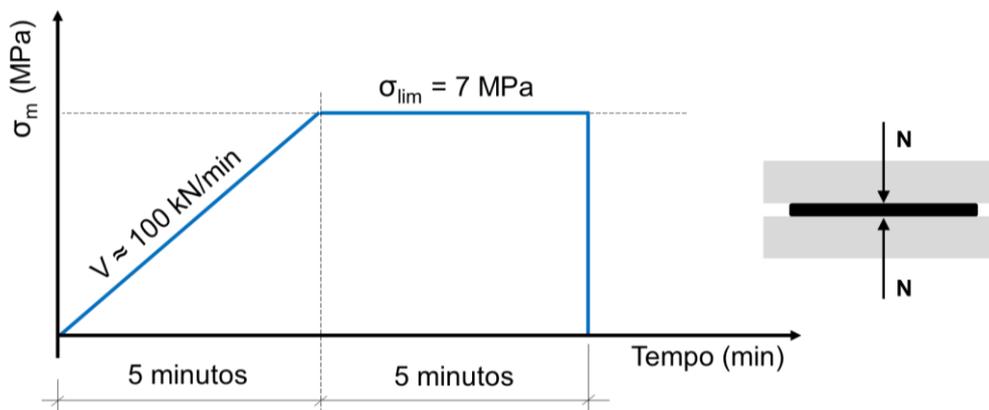
5.6.1 LOTE A

Visto que não se dispõe de procedimento de ensaio à compressão simples normatizado para os aparelhos de apoio elásticos não fretados, foram realizados ensaios preliminares nos corpos de prova do Lote A, com o intuito de analisar dois diferentes protocolos de ensaio, os quais se diferenciaram, sobretudo, pela velocidade de aplicação do carregamento e serão detalhados a seguir.

a) PROTOCOLO A – MODELO A-1

O limite para a pressão de contato do aparelho de apoio de 7 MPa, correspondente à uma carga de ensaio de 510,1 kN para os corpos de prova do Lote A (Apêndice B), deve ser atingido em um período em torno de 5 minutos. Depois, a carga deve ser mantida por 5 minutos adicionais e então aliviada, conforme indica a Figura 5.16. Este tempo de ensaio foi definido com base em uma velocidade de carregamento de, no mínimo, 100 kN/min, estimada com fundamento nos estudos de Ferreira (1999), uma vez que o propósito do Protocolo A foi a obtenção de um procedimento equivalente ao realizado por esse autor.

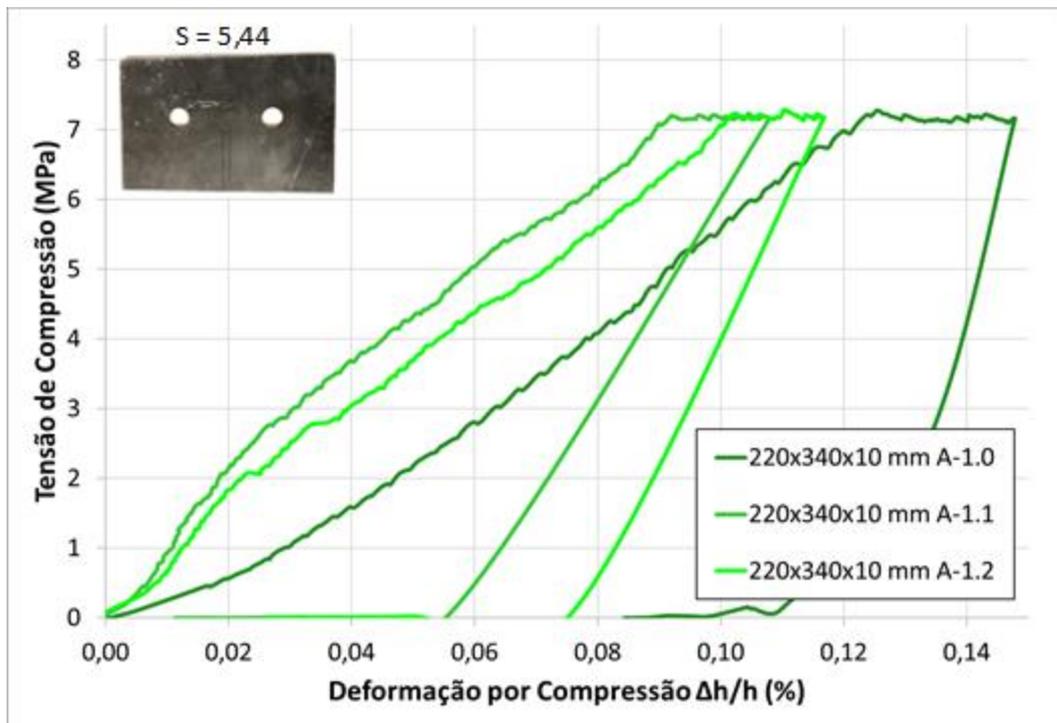
Figura 5.16: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo A.



Fonte: Autora (2019).

Ainda, visando esse mesmo propósito de equivalência de ensaios, além da adequação de um procedimento que pudesse ser realizado com atuador hidráulico, definiu-se a repetição de três séries de carregamentos (seguidas pelo descarregamento), dado que em Ferreira (1999) os ensaios foram efetuados através da aplicação de carregamento cíclico, por meio da utilização de um atuador servo-hidráulico. A Figura 5.17 ilustra as três séries de carregamentos de compressão para o modelo A-1, realizado segundo o Protocolo A.

Figura 5.17: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-1 sem descontar os deslocamentos iniciais influenciados pela acomodação do aparelho de apoio.



Fonte: Autora (2019).

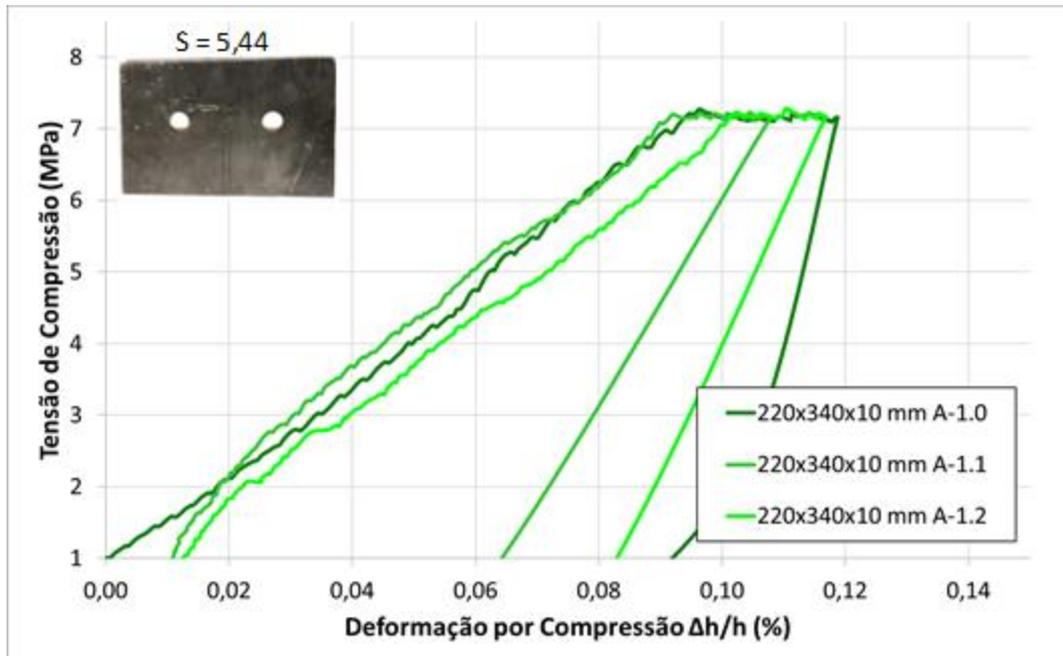
Na primeira série de carregamento, denominada série zero (A-1.0), notam-se valores de deformação elevados em relação às séries 1 e 2 (A-1.1 e A-1.2), até aproximadamente a tensão de 1 MPa. Isso ocorre devido ao efeito da acomodação inicial significativa do aparelho de apoio à medida que o carregamento é aplicado pela primeira vez.

De modo a minimizar o efeito da acomodação inicial nos ensaios à compressão simples em aparelhos de apoio elásticos fretados, a EN 1337-3:2016 recomenda que seja aplicada, primeiramente, uma carga correspondente à pressão de contato de 1 MPa e, então os medidores de deflexão sejam zerados e a carga de ensaio aplicada progressivamente. Visto que o efeito da acomodação inicial ocorreu também no ensaio à compressão simples dos aparelhos não fretados, optou-se por aderir à essa recomendação da norma europeia.

Para isso, definiu-se que os deslocamentos para as tensões inferiores a 1 MPa deveriam ser descontados no gráfico obtido para a primeira série de carregamento. Como nas séries 1 e 2 não foram verificados efeitos da acomodação inicial do aparelho, os deslocamentos não foram desconsiderados para essas séries. Assim, a série A-1.0 funcionou como uma espécie de escorvamento do modelo.

A Figura 5.18 ilustra as três séries de carregamentos de compressão para o modelo A-1, descontando os deslocamentos para a primeira série de carregamentos (A-1.0).

Figura 5.18: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-1 descontando os deslocamentos iniciais para a série 0.

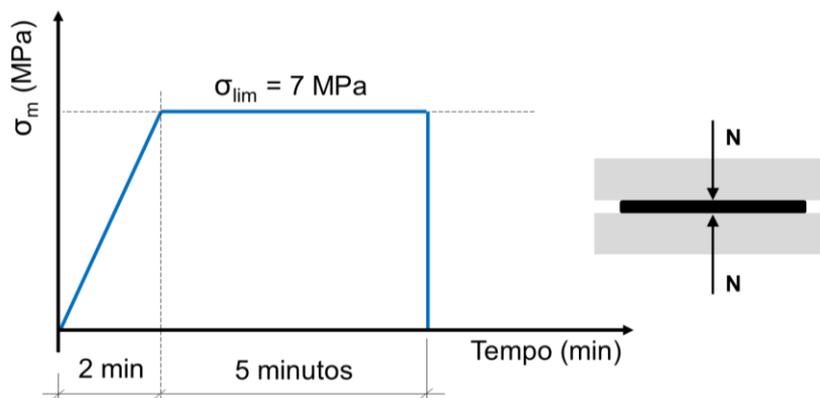


Fonte: Autora (2019).

b) PROTOCOLO B – MODELO A-2

O limite para a pressão de contato do aparelho de apoio de 7 MPa, correspondente à uma carga de ensaio de 510,1 kN para os corpos de prova do Lote A, deve ser atingido em um período em torno de 2 minutos, depois, a carga deve ser mantida por 5 minutos adicionais e então aliviada, conforme indica a Figura 5.19. Definiu-se a repetição desse procedimento por três séries de carregamentos (seguidas pelo descarregamento).

Figura 5.19: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo B.

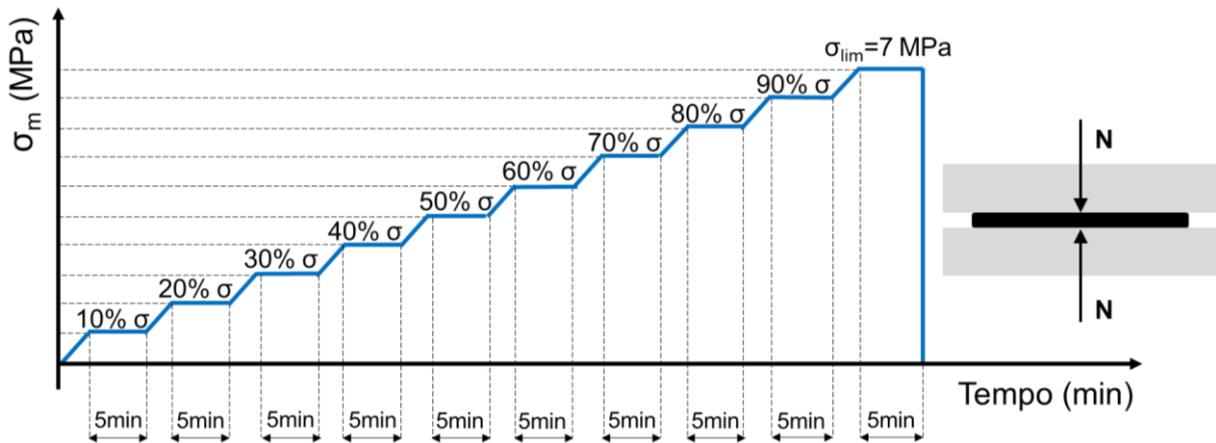


Fonte: Autora (2019).

Na sequência, realiza-se uma série de ensaio complementar com carregamento lento, na qual a aplicação da carga deve ser feita em dez etapas de 10% da carga máxima de ensaio, que corresponde à 51 kN para os corpos de prova do Lote A. Em cada uma das etapas, a

carga deve ser mantida por 5 minutos, conforme esquematizado na Figura 5.20. O Protocolo B foi um procedimento alternativo definido com o intuito de anular o efeito da acomodação inicial no ensaio de carregamento lento, além de analisar o efeito das diferentes velocidades de aplicação de carregamento.

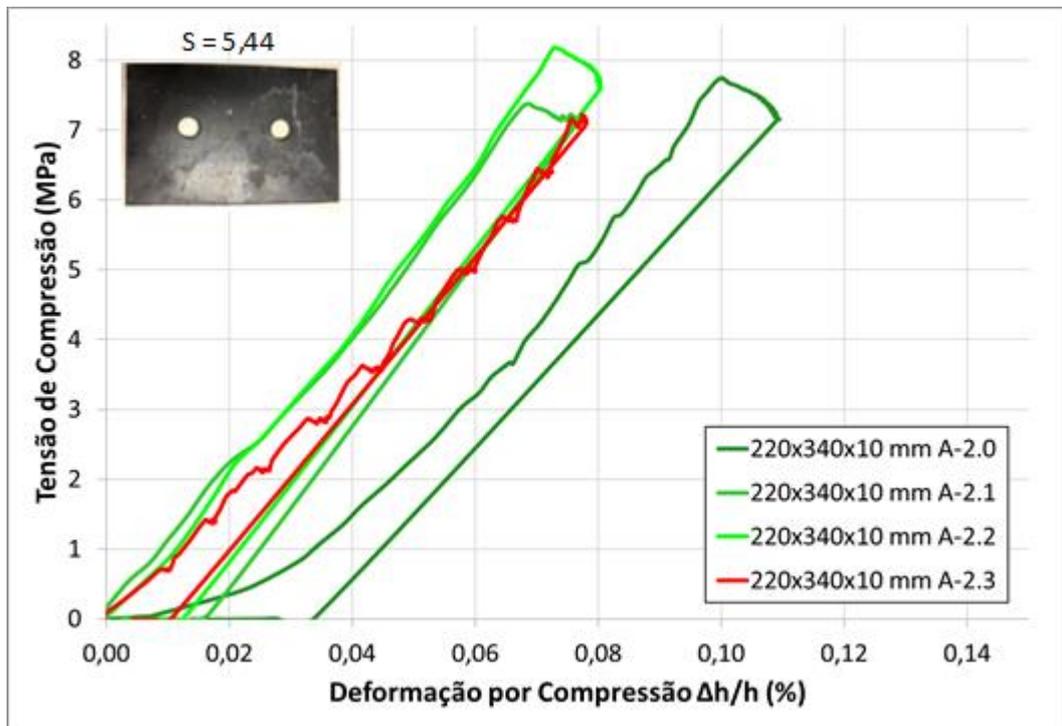
Figura 5.20: Procedimento de aplicação de carregamento para o Protocolo B na série de ensaio complementar com carregamento lento.



Fonte: Autora (2019).

A Figura 5.21 ilustra as quatro séries de carregamentos de compressão para o modelo A-2, realizado segundo o Protocolo B.

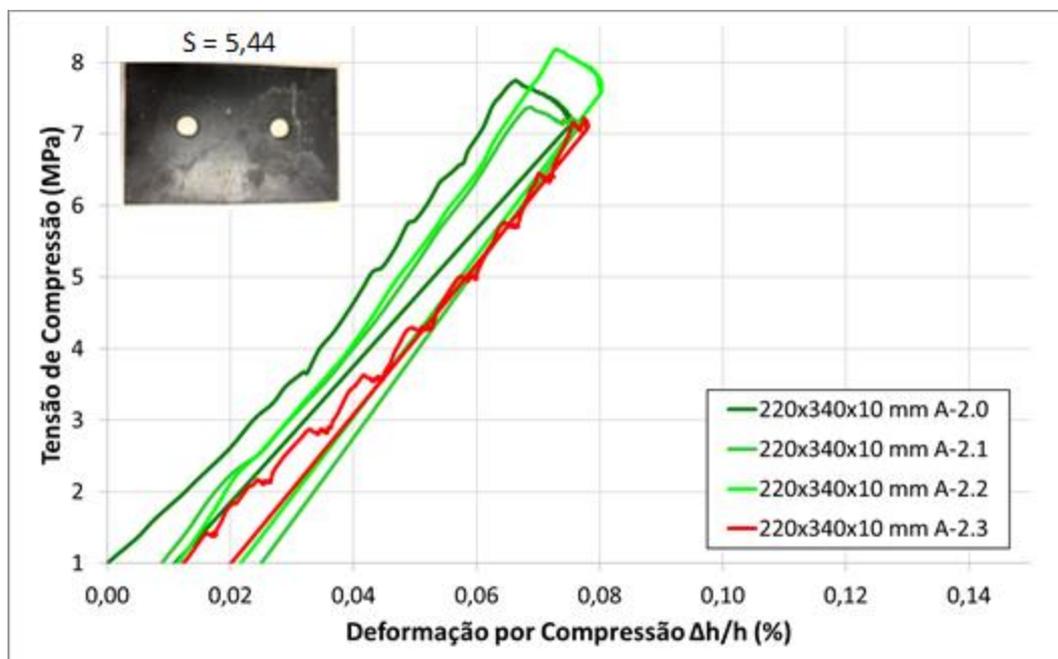
Figura 5.21: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-2 sem descontar os deslocamentos iniciais influenciados pela acomodação do aparelho de apoio.



Fonte: Autora (2019).

Assim como no Protocolo A, os deslocamentos para tensões inferiores a 1 MPa foram descontados para a primeira série de carregamento, conforme ilustra a Figura 5.22.

Figura 5.22: Gráfico tensão x deformação para o modelo A-2 descontando os deslocamentos iniciais para a série 0.



Fonte: Autora (2019).

Ao fim dos ensaios preliminares, através da análise dos resultados obtidos, foi possível verificar que o efeito dos deslocamentos iniciais causados pela acomodação do aparelho de apoio independe da velocidade de aplicação do carregamento. Isso é, a aplicação de carga em uma maior velocidade no modelo A-2 não anulou ou reduziu esse efeito, que ocorreu da mesma maneira para a primeira série dos ensaios de ambos os modelos (A-1 e A-2).

Além disso, verificou-se que até mesmo no ensaio de carregamento lento não ocorreram deslocamentos iniciais significativos. Assim, conclui-se que uma vez que o escorvamento é realizado, as deflexões medidas posteriormente representam bem o comportamento do aparelho de apoio elastomérico, anulando, ou ao menos reduzindo os efeitos da acomodação inicial. Logo, para todos os modelos ensaiados posteriormente no programa experimental da presente pesquisa, foram descontados os deslocamentos para a primeira série de carregamentos.

Ainda, visto que neste programa experimental o carregamento foi aplicado por meio da utilização de um atuador hidráulico, alimentado por uma bomba manual, notou-se que para o Protocolo A, no qual a carga foi aplicada a uma velocidade de 100 kN/min, houve maior facilidade no controle da velocidade pelo operador da bomba. Portanto, por uma questão operacional e de modo a haver maior conformidade entre os resultados, adotou-se o Protocolo A para a realização dos ensaios dos aparelhos de apoio do Lote B.

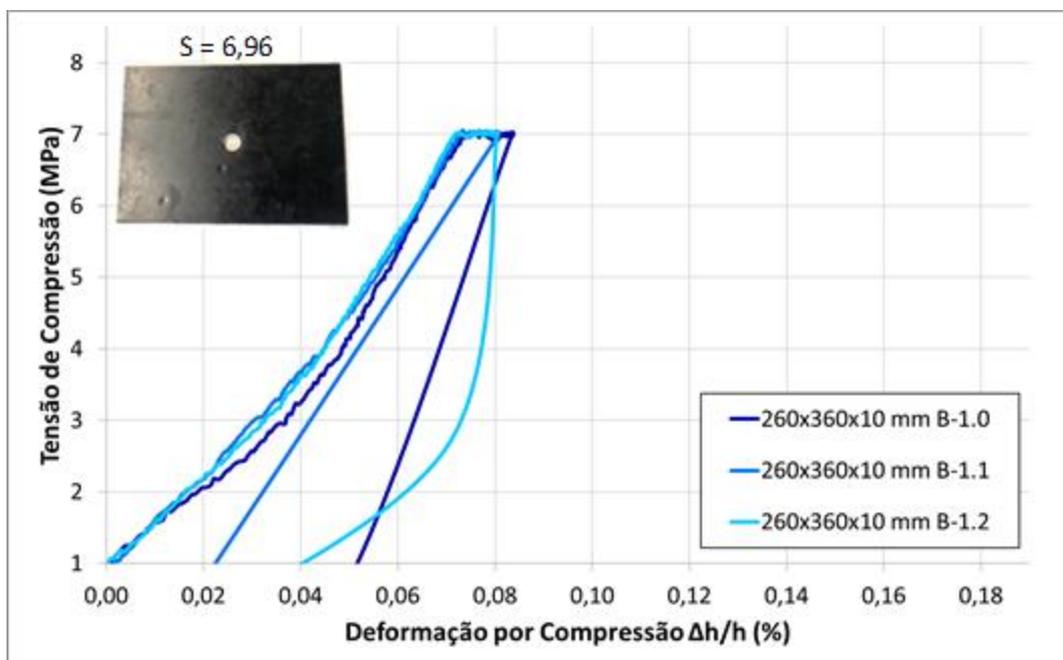
5.6.2 LOTE B

Os modelos do Lote B foram ensaiados segundo o Protocolo A e os resultados obtidos serão apresentados na sequência.

a) MODELO B-1

Aplicou-se, nesse modelo, uma carga de ensaio limite de 650,3 kN, que foi atingida em aproximadamente 5 minutos a uma velocidade de aplicação de 130 kN/min. A Figura 5.23 ilustra as três séries de carregamentos à compressão para o modelo B-1.

Figura 5.23: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-1.



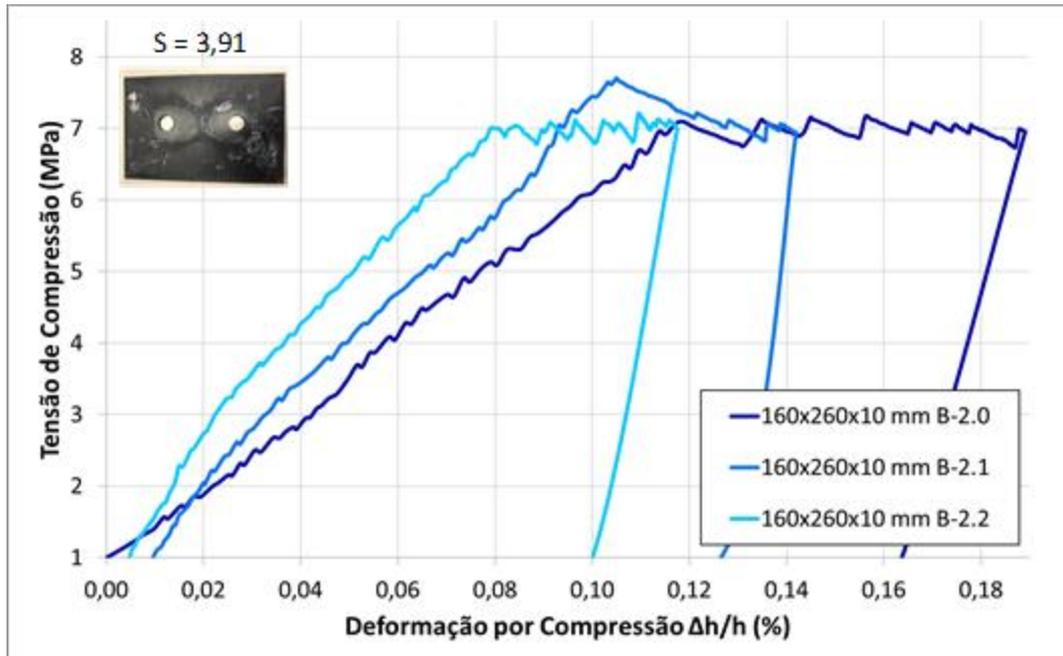
Fonte: Autora (2019).

b) MODELO B-2

A carga de ensaio limite aplicada para esse modelo foi de 281,3 kN e, para atingi-la em 5 minutos, a velocidade de aplicação do carregamento seria em torno de 56 kN/min, valor muito inferior aos 100 kN/min estimados com fundamento em Ferreira (1999).

Logo, definiu-se que nos ensaios para os quais fossem obtidas velocidades de carregamento baixas, deveria ser adotada a velocidade de aplicação mínima de 100 kN/min. Isso significa que, mesmo que o tempo de aplicação da carga seja inferior aos 5 minutos propostos no Protocolo A, deve-se respeitar o critério de aplicação da taxa de velocidade mínima de 100 kN/min para garantir conformidade entre os ensaios. A Figura 5.24 ilustra as séries de carregamentos à compressão para o modelo B-2.

Figura 5.24: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-2.

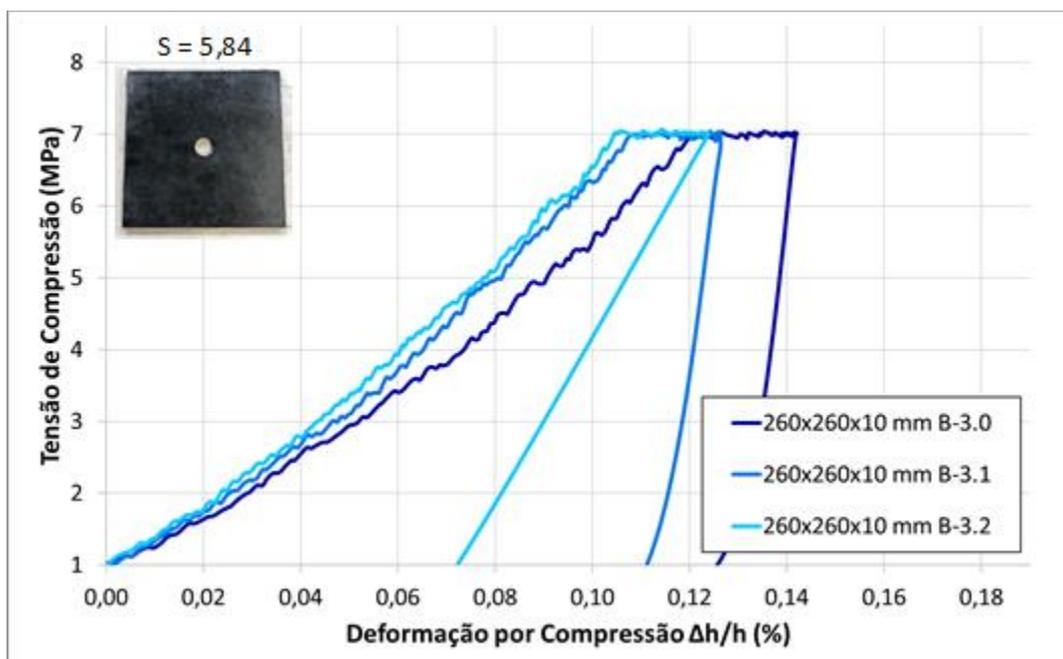


Fonte: Autora (2019).

c) *MODELO B-3*

Aplicou-se, nesse modelo, uma carga de ensaio de 467,2 kN, que foi atingida em aproximadamente 5 minutos a uma velocidade em torno de 100 kN/min. A Figura 5.25 ilustra as três séries de carregamentos à compressão para o modelo B-3.

Figura 5.25: Gráfico tensão x deformação para o modelo B-3.



Fonte: Autora (2019).

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO EXPERIMENTALMENTE E SEGUNDO A NBR 9062:2017

De acordo com a NBR 9062:2017, a deformação por compressão dos aparelhos de apoio elastoméricos simples, pode ser expressa pela Equação 6.1.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma_m}{10.G.S + 2.\sigma_m} \quad (6.1)$$

Dessa forma, o módulo de elasticidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado, segundo a NBR 9062:2017, pode ser expresso pela Equação 6.2.

$$E_n = 10.G.S + 2.\sigma_m \quad (6.2)$$

Para o caso da obtenção experimental do módulo de elasticidade, foram utilizados os gradientes das curvas obtidas nos ensaios de compressão, conforme apresenta a Equação 6.3, para o intervalo de tensão apresentado na Equação 6.4.

$$E_{n,a} = \tan(\theta) = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta(\Delta h / h)} \quad (6.3)$$

$$\Delta\sigma_m = \Delta\sigma_{m,\text{lim}} - 3 = 7 - 3 = 4\text{MPa} \quad (6.4)$$

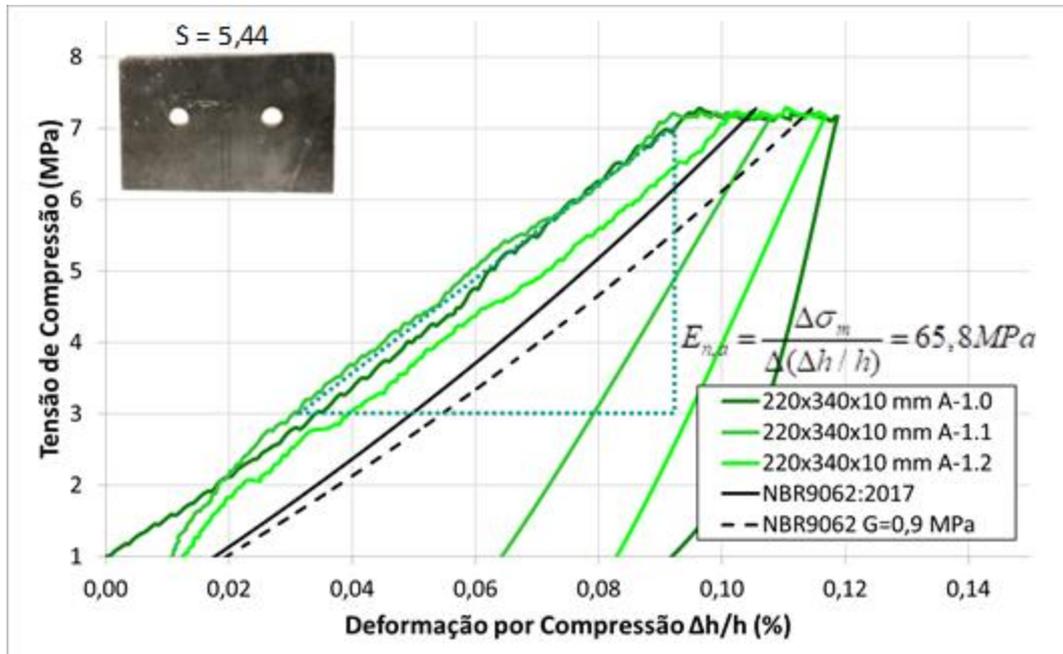
Para a análise dos ensaios de compressão, primeiramente, foram obtidas curvas teóricas com base na expressão para o cálculo da deformação por compressão da NBR 9062:2017 (Equação 6.1), com variações no valor do módulo G de 1 MPa e 0,9 MPa, correspondentes à Dureza Shore 60 A.

Na sequência foram calculados os valores do módulo de elasticidade, conforme a expressão da NBR 9062:2017 (Equação 6.2) para as mesmas variações no módulo de deformação transversal G. Por fim, foram calculados os valores do módulo de elasticidade aparente, através da utilização dos gradientes definidos para as curvas ensaiadas (Equações 6.3 e 6.4).

Nas Figuras de 6.1 a 6.5 são apresentadas as séries de carregamentos à compressão para cada um dos modelos ensaiados e também as curvas teóricas obtidas segundo a NBR

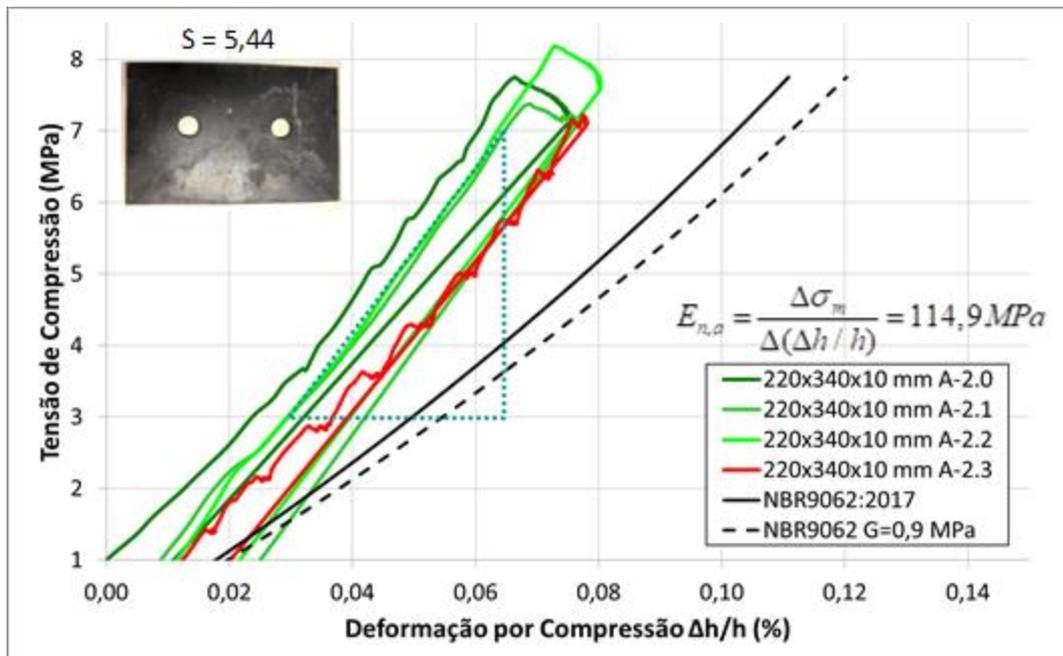
9062:2017. Além disso, estão apresentados os gradientes para o cálculo do módulo de elasticidade aparente.

Figura 6.1: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo A-1.



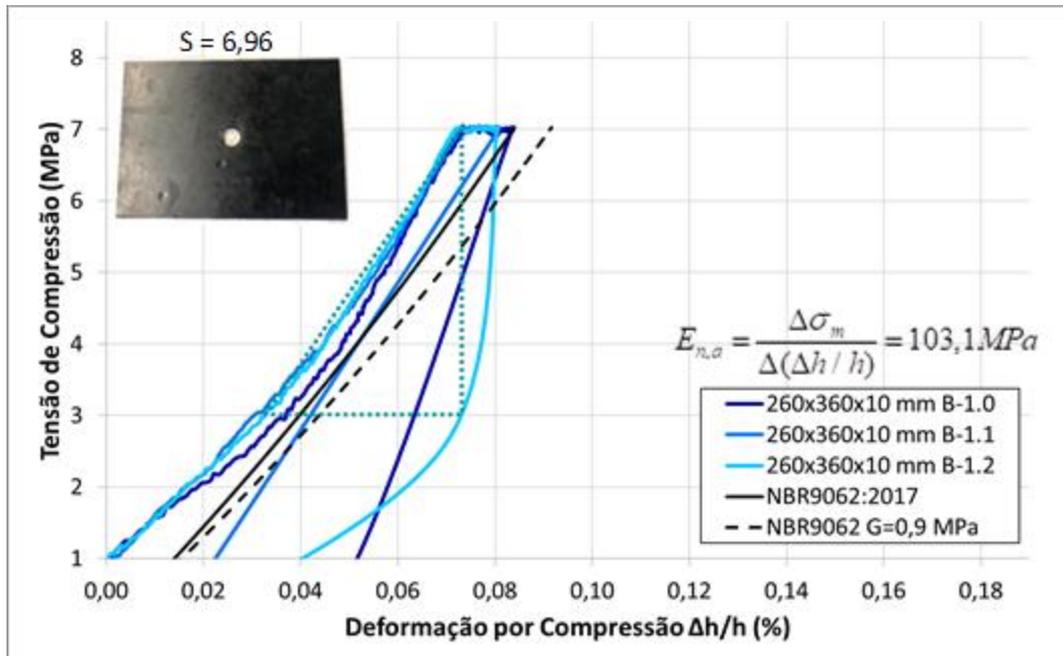
Fonte: Autora (2019).

Figura 6.2: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo A-2.



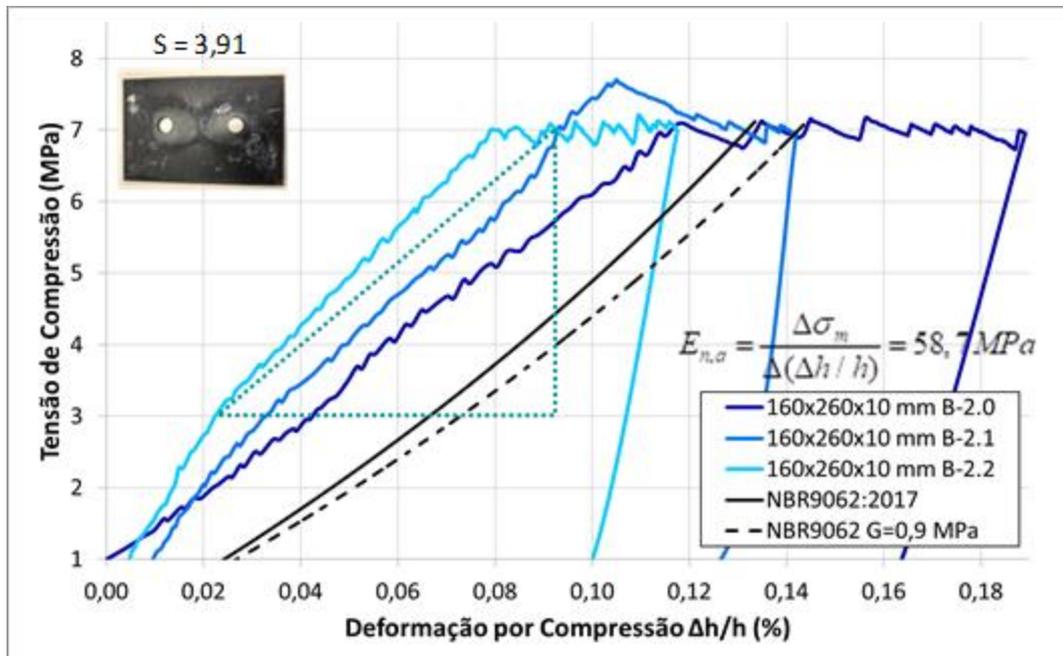
Fonte: Autora (2019).

Figura 6.3: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-1.



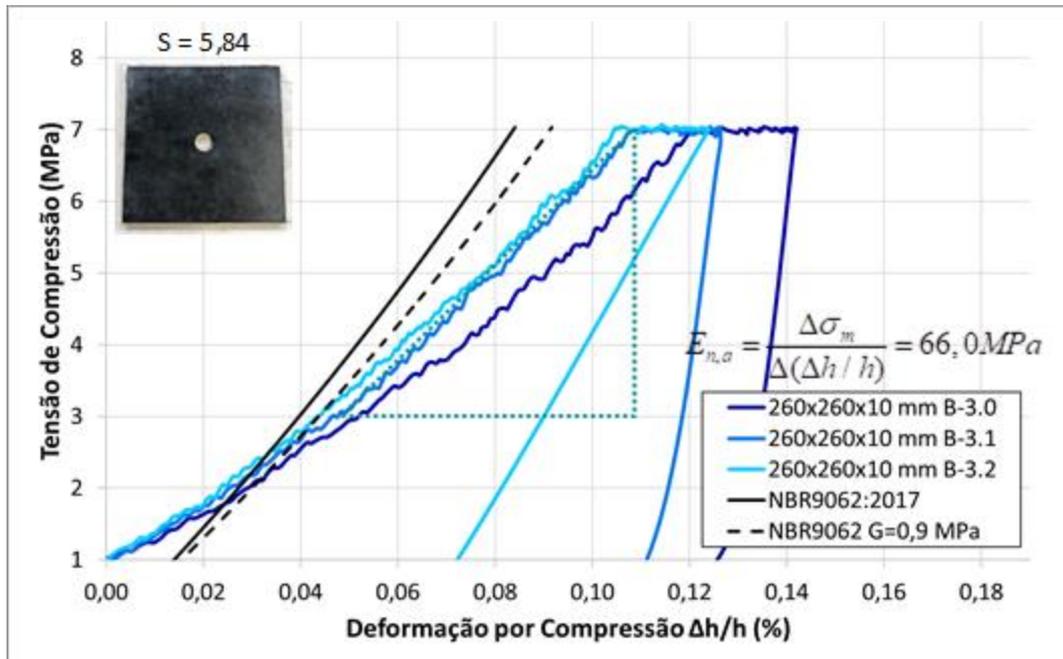
Fonte: Autora (2019).

Figura 6.4: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-2.



Fonte: Autora (2019).

Figura 6.5: Relação entre as curvas obtidas nos ensaios e segundo a NBR 9062:2017 para o modelo B-3.



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 6.1 apresenta os valores dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e segundo o equacionamento da NBR 9062:2017.

Tabela 6.1: Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e segundo equacionamento da NBR 9062:2017

Corpo de Prova	S	$E_{n,a}$ (MPa)	E_n (G = 1,0) (MPa)	E_n (G = 0,9) (MPa)
A-1	5,44	65,8	62,4	57,0
A-2	5,44	114,9	62,4	57,0
B-1	6,96	103,1	77,6	70,7
B-2	3,91	58,7	47,1	43,2
B-3	5,84	66,0	66,4	60,5

Fonte: Autora (2019).

Através das figuras apresentadas anteriormente, pode-se observar que, para os modelos dos Lotes A e B, as curvas obtidas experimentalmente apresentaram inclinações semelhantes ou superiores às curvas teóricas obtidas através da expressão da NBR 9062:2017, variando o módulo G em 1,0 e 0,9 MPa. Além disso, conforme apresentado na Tabela 6.1, os valores obtidos para o módulo de elasticidade aparente também foram superiores em relação ao módulo de elasticidade obtido através da expressão da norma para esses lotes.

Portanto, conclui-se que a expressão adotada pela NBR 9062:2017 se mostrou satisfatória para avaliar a deformabilidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado, sendo adequada para a verificação da deformação por compressão no limite elástico de 15%, mesmo para pressões médias de contato na ordem de 7 MPa.

6.2 VERIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL OBTIDO EXPERIMENTALMENTE

O módulo de deformação transversal aparente do aparelho de apoio elastomérico não fretado pode ser obtido através do módulo de elasticidade aparente, conforme expressa a Equação 6.5.

$$G_a = \frac{(E_{n,a} - 2.\Delta\sigma_m)}{10.S} \quad (6.5)$$

Desse modo, os valores do módulo G aparente foram calculados para todos os modelos ensaiados na presente pesquisa e estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Módulo de deformação transversal aparente obtido através do módulo de elasticidade aparente

Corpo de Prova	S	Dureza Shore A	$E_{n,a}$ (MPa)	G_a (MPa)
A-1	5,44	62	65,8	1,06
A-2	5,44	62	114,9	1,97
B-1	6,96	65	103,1	1,37
B-2	3,91	65	58,7	1,30
B-3	5,84	65	66,0	0,99

Fonte: Autora (2019).

Conforme diferentes bibliografias internacionais, podem ser adotados valores indicativos de correspondência entre a dureza Shore A e o módulo de deformação transversal G e, para um aparelho de apoio elastomérico simples com dureza Shore em torno de 60 A, espera-se obter um valor entre 0,75 e 1,05 MPa para o módulo G.

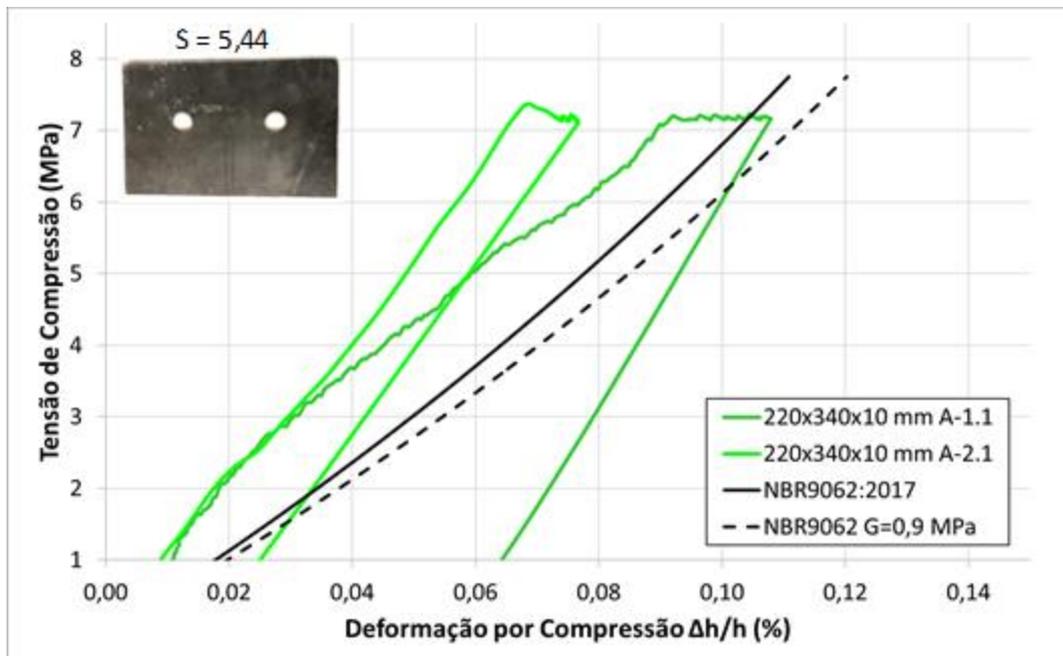
Através da Tabela 6.2, pode-se observar que para os modelos dos Lotes A e B, foram obtidos valores para o módulo G próximos ou superiores a 1,0 MPa. Logo, conclui-se que os ensaios de compressão simples podem ser utilizados para verificação da conformidade dos valores de módulo de deformação transversal obtidos experimentalmente, em relação aos

valores indicativos de correspondência com a dureza Shore A. Assim, pode ser feito o controle de qualidade do elastômero.

6.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO

A influência da velocidade da aplicação do carregamento foi verificada através da comparação das curvas obtidas para os ensaios preliminares dos corpos de prova do Lote A, em que foram analisados dois protocolos de ensaios que se diferenciavam, sobretudo, pela velocidade. Na Figura 6.6 estão apresentadas as curvas *tensão de compressão x deformação por compressão* obtidas na série de carregamento 1 para os modelos A-1 e A-2.

Figura 6.6: Influência da velocidade de aplicação do carregamento.



Fonte: Autora (2019).

Através da figura, observa-se uma maior inclinação na curva obtida para o modelo A-2, em relação à curva obtida para o modelo A-1. No modelo A-2, foi empregada uma velocidade de carregamento superior, dessa forma, entende-se que, quanto maior a velocidade de aplicação do carregamento, maior a rigidez obtida para um aparelho de apoio elastomérico de mesmas dimensões.

Ainda, ao comparar as inclinações das curvas obtidas experimentalmente com as curvas teóricas obtidas através do equacionamento proposto pela NBR 9062:2017, pode-se verificar maior conformidade entre a curva do modelo A-1 e as curvas teóricas. Assim, conclui-se que a velocidade de carregamento de 100 kN/min empregada nesse modelo se mostrou mais satisfatória para avaliar as deformabilidades à compressão dos aparelhos de apoio elastoméricos simples, segundo a expressão da NBR 9062:2017.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo caracterizou o comportamento à compressão simples dos aparelhos de apoio elastoméricos não fretados submetidos à compressão, através da determinação experimental do módulo tangente de deformação à compressão (módulo de elasticidade aparente) e da rigidez à compressão desses elementos.

Diante da realização do programa experimental proposto nessa pesquisa, bem como das análises dos resultados dos ensaios, podem ser feitas as seguintes considerações finais:

- A calibração do equacionamento estabelecido pela NBR 9062:2017 se mostrou satisfatória para avaliar a deformabilidade do aparelho de apoio elastomérico não fretado, sendo adequada para a verificação da deformação por compressão no limite elástico de 15%, mesmo para pressões médias de contato na ordem de grandeza do limite de 7 MPa;
- Os ensaios de compressão simples podem ser utilizados para verificação da conformidade dos valores de módulo de deformação transversal obtidos experimentalmente, em relação aos valores indicativos de correspondência com a dureza Shore A. Desse modo, pode ser feito o controle de qualidade do elastômero;
- Os ensaios podem ser realizados através do emprego de atuador hidráulico com controle da velocidade de aplicação de força, isso é, nessa pesquisa foi possível a adequação de um procedimento que pudesse ser reproduzido com equipamentos simples;
- Quanto maior a velocidade de aplicação do carregamento no ensaio, maior é a rigidez obtida para um aparelho de apoio elastomérico não fretado.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da realização da presente pesquisa, verificou-se temas aqui não aprofundados, que podem ser objeto de estudo em trabalhos futuros. Os tópicos são os seguintes:

- Estudo dos efeitos da compressão excêntrica nos aparelhos de apoio elastoméricos simples, em especial, a rotação;
- Estudo dos aparelhos de apoio elastoméricos simples submetidos à carga de uma viga pré-moldada extensa e com significativo peso próprio;

- Estudo do método de ensaio de cisalhamento para a caracterização do módulo de deformação transversal do aparelho de apoio elastoméricos simples, para a obtenção de dados passíveis de comparação com a presente pesquisa;
- Estudo do método de ensaio de compressão cíclica, através do uso de atuador servo-hidráulico, para a caracterização do módulo de deformação transversal do aparelho de apoio elastomérico simples, através da inclinação do gráfico, para a obtenção de dados passíveis de comparação com a presente pesquisa;
- Estudo *in loco* para a análise da real velocidade de aplicação de carregamento, por exemplo, durante a montagem de vigas sobre estruturas de apoio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. J. **Desenvolvimento de metodologia de ensaios para avaliação comparativa do envelhecimento de borrachas nitrílicas expostas à diversas condições de temperatura e ambiente.** São Paulo, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **Standard Specifications for Highway Bridges.** 11 ed. Washington, D.C., 1973.

ARDITZOGLU, Y. J.; YURA, J. A.; HAINES, A. H. **Test Methods for Elastomeric Bearings on Bridges.** Austin, 94p., 1995. Research Report 1304-2 (Center for Transportation Research/ The University of Texas at Austin).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 19783: Aparelhos de Apoio de Elastômero Fretado - Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **DRAFT NBR s/n°: Aparelhos de Apoio Estruturais - Parte 3: Aparelhos de Apoio Elastoméricos.** Rio de Janeiro, 2019.

BARROS, L. P. **Verificação do comportamento de ligações viga-pilar com continuidade de armadura negativa por meio de luvas rosqueadas.** São Carlos, 142 p., Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2018.

BRAGA, W.A. **Aparelhos de Apoio das Estruturas.** São Paulo, Edgard Blücher, 107p., 1986.

DITZ, J. D. **Desempenho de almofadas de argamassa modificada na transferência de tensões de compressão em ligações de concreto pré-moldado.** São Carlos, 142p., Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2015.

EUROPEAN STANDARD. **DRAFT EN 1337: Structural Bearings - Part 3: Elastomeric Bearings.** Karlsruhe, 2016.

FERREIRA, M. A. **Capacidade à Compressão em Aparelhos de Apoio com Elastômero Simples**. São Carlos, 12p., 2017. Relatório Técnico EXT2016 (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto NETPre/UFSCar).

FERREIRA, M. A.; MERLOS, R. S.; CATOIA, B. **Considerações sobre o Comportamento de Aparelhos de Apoio Elastoméricos Não Fretados sob Compressão Simples**. São Carlos, 17p., 2018. Relatório Técnico 10166 (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto NETPre/UFSCar).

FERREIRA, M. A. **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. São Carlos, 232p., Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 1999.

FERREIRA, M. A. **Deformabilidade de Aparelhos de Apoio Elastoméricos Não Fretados**. Reunião da Comissão da ABNT de Aparelhos de Apoio Estruturais - Parte 3: Aparelhos de Apoio Elastoméricos, São Paulo, 2018.

FERREIRA, M. A. **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados de concreto**. São Carlos, 166p., Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 1993.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). **Guide to good practice: Structural Connections for Precast Concrete Buildings**. Commission 6: Prefabrication - Task Group 6.2: Structural connections for precast concrete. Stuttgart, 360p., 2008.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). **Planning and design handbook on precast building structures**. Commission 6: Prefabrication – Task Group 6.12: *fib* Design Handbook. Lausanne, 2013.

MUSCARELLA, J. V.; YURA, J. A. **An Experimental Study of Elastomeric Bridge Bearings with Design Recommendations**. Austin, 178p., 1995. Research Report 1304-3 (Center for Transportation Research/ The University of Texas at Austin).

PRECAST/ PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI). **PCI Design Handbook**. 7. ed. Chicago, 2010.

ROEDER, C. W.; STANTON, J. F. **Elastomeric Bearings: State-of-the-art**. Journal of Structural Engineering, p.2853-2871, 1983.

SKENDER, A.; DAMJANOVIĆ, D.; ŠIMUNIĆ, Z. **Shear Modulus Testing Method for Elastomeric Bearings**. 29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 2012.

STANTON, J.; TETZLAFF, S. **Behavior of Plain Elastomeric Pads.** AASHTO SCOBS T-2 Meeting, Austin, 2012.

VINJE, L. **Behavior and Design of Plain Elastomeric Bearing Pads in Precast Structures.** Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI) Journal, p.120-146, Nov.-Dez., 1985.

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA

O fator de forma é definido pela relação entre a superfície de apoio carregada do aparelho de apoio e a superfície livre para expandir lateralmente. Assim, o fator de forma para o aparelho sem furos pode ser calculado de acordo com a Equação A.1. No caso de o aparelho de apoio possuir furos, esses devem ser considerados para o cálculo do fator de forma. Desse modo, quando tais furos são circulares, deduz-se a Equação A.2.

$$S = \frac{a.b}{2.(a+b).h} \quad (\text{A.1})$$

$$S = \frac{(a.b) - n.\left(\pi.\frac{\phi_f^2}{4}\right)}{h.\left[2.(a+b) + n.(\pi.\phi_f)\right]} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

S – fator de forma do aparelho de apoio;

a e b – dimensões em planta do aparelho de apoio;

h – espessura do aparelho de apoio;

n – número de furos circulares no aparelho de apoio;

ϕ_f – diâmetro do(s) furo(s).

Logo, para os aparelhos de apoio dos lotes A e B, os quais possuíam furos, o fator de forma foi calculado através da Equação A.2. Para exemplificar, apresenta-se na sequência o cálculo do fator de forma para o modelo A-1.

$$S = \frac{(a.b) - n.\left(\pi.\frac{\phi_f^2}{4}\right)}{h.\left[2.(a+b) + n.(\pi.\phi_f)\right]} = \frac{(220.340) - 2.\left(\pi.\frac{35^2}{4}\right)}{10.\left[2.(220+340) + 2.(\pi.35)\right]} = 5,44$$

Na Tabela A.1, apresenta-se o fator de forma obtido para cada um dos modelos ensaiados na presente pesquisa.

Tabela A.1: Fator de forma obtido para os modelos ensaiados

Corpo de Prova	a (mm)	b (mm)	h (mm)	Furos (mm)	S
A-1	220	340	10	2 x Ø _f 35	5,44
A-2	220	340	10	2 x Ø _f 35	5,44
B-1	260	360	10	1 x Ø _f 30	6,96
B-2	160	260	10	2 x Ø _f 30	3,91
B-3	260	260	10	1 x Ø _f 33	5,84

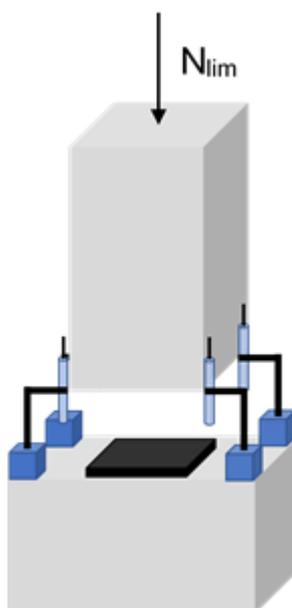
Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA

Os modelos estariam submetidos à uma carga de ensaio concentrada no centro do bloco B02, como indica a Figura B.1. Para a realização do cálculo das cargas de ensaio para cada um dos modelos, considerou-se o limite para pressão de contato dos aparelhos de apoio de 7,0 MPa – recomendado pela NBR 9062:2017 – e a área do aparelho de apoio ensaiado, através da Equação B.1.

Figura B.1: Aplicação das cargas de ensaio à compressão.



Fonte: Autora (2019).

$$\sigma_{m,lim} = \frac{N_{lim}}{A} \quad (B.1)$$

Onde:

$\sigma_{m,lim}$ – limite para pressão média de contato do aparelho de apoio (7,0 MPa = 0,007 kN/mm², segundo a NBR 9062:2017);

N_{lim} – força normal de compressão limite (carga de ensaio);

A – área inicial do aparelho de apoio (caso possua furos, esses devem ser considerados no cálculo).

Para exemplificar, apresenta-se na sequência o cálculo da carga de ensaio para o modelo A-1.

$$0,007 = \frac{N_{\text{lim}}}{(220 \cdot 340) - 2 \cdot \left(\pi \cdot \frac{35^2}{4} \right)} \rightarrow N_{\text{lim}} = 510,1$$

Na Tabela B.1 estão apresentadas as cargas de ensaio obtidas para cada um dos modelos da presente pesquisa.

Tabela B.1: Cargas de ensaio obtidas para os modelos ensaiados

Corpo de Prova	a (mm)	b (mm)	Furos (mm)	N_{lim} (kN)
A-1	220	340	2 x Øf 35	510,1
A-2	220	340	2 x Øf 35	510,1
B-1	260	360	1 x Øf 30	650,3
B-2	160	260	2 x Øf 30	281,3
B-3	260	260	1 x Øf 33	467,2

Fonte: Autora (2019).