

GUSTAVO EMILIO SOARES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DINÂMICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

L732a
2017
Lima, Gustavo Emilio Soares de, 1985-
Avaliação dinâmica do comportamento estrutural de vigas
de concreto armado submetidas à degradação da rigidez /
Gustavo Emilio Soares de Lima. – Viçosa, MG, 2017.
xiii, 157f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndice.

Orientador: José Luiz Rangel Paes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.80-84.

1. Degradação da rigidez. 2. Avaliação dinâmica.
3. Concreto Armado. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 624.171

GUSTAVO EMILIO SOARES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DINÂMICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2017.


Reginaldo Carneiro da Silva


Leonardo Gonçalves Pedroti
(Coorientador)


Regina Helena Ferreira de Souza


José Luiz Rangel Paes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. José Luiz Rangel**, pela orientação neste trabalho, pela amizade, por acreditar no meu trabalho, por compreender minhas limitações e pelos precisos conselhos.

Ao **Prof. Gustavo de Souza Veríssimo**, pela co-orientação neste trabalho, pela amizade e pelos valiosos conselhos no desenvolvimento do programa experimental.

Ao **Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti**, pela co-orientação neste trabalho, pela amizade e pela confiança no meu trabalho em laboratório.

À **Prof^a. Regina Helena Ferreira de Souza**, pela participação na banca examinadora e pelas valiosas contribuições.

Ao **Prof. Reginaldo Carneiro da Silva**, pelos ensinamentos durante o estágio em ensino, pela participação na banca examinadora e pelas valiosas contribuições.

Aos **professores e funcionários** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo apoio e pelos ensinamentos.

Ao **Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção**, por ceder gentilmente alguns equipamentos e software.

À **Pró-Reitoria de Administração**, pelo apoio logístico que viabilizou o desenvolvimento do programa experimental deste trabalho.

À **Universidade Federal de Viçosa**, por mais uma vez me acolher de braços abertos.

À **Pedreira Um Valemix**, pelo apoio na produção dos modelos experimentais.

À minha esposa, **Kelly**, pelo carinho, pelo incentivo, pela força nos momentos de dificuldade e pela companhia nesta caminhada.

Aos meus pais, **Ricardo e Rosinha**, pelo carinho, por compreenderem minha ausência, pelo incentivo e pelo apoio.

Aos companheiros da pós-graduação, **André Candian, Anderson Caetano e Roseli Guedes**, pela força, pela amizade e pela ajuda.

Aos amigos, **Roberto, Luís Fernando, André e Olindo**, pela amizade, pela força, pela disponibilidade e ajuda nos momentos de dificuldade.

À **todos que participaram desta jornada**, mesmo que com pequenas contribuições, meu sincero muito obrigado. Estes foram só os primeiros passos desta caminhada!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativa e relevância do tema	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Comportamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão	5
2.2 Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado	11
2.2.1 <i>Módulo de elasticidade do concreto</i>	11
2.2.2 <i>Momento de inércia da seção transversal de concreto armado</i>	14
2.2.3 <i>Estimativa da rigidez à flexão para o concreto fissurado</i>	15
2.3 Características dinâmicas de vigas de concreto armado	16
2.3.1 <i>Frequências naturais e modos de vibração</i>	16
2.3.2 <i>Vibração em vigas</i>	18
2.4 Deterioração do concreto nas estruturas	19
2.5 Ensaio Não Destrutivo	20
2.6 Modelos em escala reduzida	21
2.7 Estudos sobre degradação da rigidez de vigas de concreto armado realizados por outros autores	22
2.7.1 <i>Garaygordobil (2003)</i>	22
2.7.2 <i>Almeida (2005)</i>	22
2.7.3 <i>Amancio (2016)</i>	23
2.7.4 <i>Salgado, Ayala e Rangel (2016)</i>	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Características dos modelos experimentais	25
3.2 Características dos materiais	28
3.2.1 <i>Cimento</i>	28
3.2.2 <i>Agregado miúdo natural</i>	29
3.2.3 <i>Agregado miúdo artificial</i>	29

3.2.4	<i>Agregado graúdo</i>	30
3.2.5	<i>Aditivo</i>	30
3.2.6	<i>Água</i>	31
3.2.7	<i>Aço</i>	31
3.3	Características dos concretos produzidos	31
3.4	Produção dos modelos experimentais	34
3.5	Análises numéricas e analíticas preliminares	35
3.6	Ensaio de flexão	36
3.6.1	<i>Equipamentos utilizados</i>	36
3.6.2	<i>Instrumentação e procedimento de ensaio</i>	37
3.7	Ensaio para determinação das características dinâmicas	41
3.7.1	<i>Equipamentos utilizados</i>	41
3.7.2	<i>Instrumentação e procedimento de ensaio</i>	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Considerações preliminares	45
4.2	Estimativa de flecha e degradação da rigidez de vigas de concreto armado	46
4.2.1	<i>Modelos T60A50</i>	46
4.2.2	<i>Modelos T60A63</i>	50
4.2.3	<i>Modelos T60A80</i>	53
4.2.4	<i>Discussão dos resultados</i>	56
4.3	Estudo do comportamento de vigas sujeitas à variação da taxa de armadura	58
4.3.1	<i>Modelos T45 (concreto a/c=0,45)</i>	58
4.3.2	<i>Modelos T60 (concreto a/c=0,60)</i>	60
4.3.3	<i>Modelos T70 (concreto a/c=0,70)</i>	62
4.3.4	<i>Modelos T80 (concreto a/c=0,80)</i>	64
4.3.5	<i>Discussão dos resultados</i>	66
4.4	Estudo do comportamento de vigas sujeitas à variação das características mecânicas do concreto	67
4.4.1	<i>Modelos A50 (taxa de armadura de 0,41%)</i>	68
4.4.2	<i>Modelos A63 (taxa de armadura de 0,56%)</i>	70
4.4.3	<i>Modelos A80 (taxa de armadura de 0,79%)</i>	72
4.4.4	<i>Discussão dos resultados</i>	75
5	CONCLUSÕES	76
5.1	Conclusões gerais	76
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
	APÊNDICE A - RELATÓRIOS DE ENSAIO	85
	ANEXO 1 – GUIA DO USUÁRIO DO PROGRAMA DEFORME	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetro de vibração (Adaptado de LEISSA e QATU, 2011).....	18
Tabela 3.1 – Identificação dos modelos em função da variação da relação a/c.	26
Tabela 3.2 – Identificação dos modelos em função da variação da taxa de armadura. ..	26
Tabela 3.3 – Identificação do conjunto de modelos experimentais de viga considerados.	27
Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento.....	28
Tabela 3.5 – Composição química do cimento (HOLCIM, 2014).	29
Tabela 3.6 – Características do agregado miúdo natural.	29
Tabela 3.7 – Características do agregado miúdo artificial.	30
Tabela 3.8 – Características do agregado graúdo.	30
Tabela 3.9 – Características do aditivo (MC-BAUCHEMIE, 2014).....	31
Tabela 3.10 – Características mecânicas dos aços.....	31
Tabela 3.11 – Traços adotados (kg/m ³).....	32
Tabela 3.12 Evolução da resistência à compressão e módulo de elasticidade secante...	32
Tabela 3.13 – Resistência à tração por compressão diametral.	34
Tabela 3.14 – Equipamentos utilizados no ensaio estático.	36
Tabela 3.15 – Equipamentos utilizado no ensaio para determinação das características dinâmicas.	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Carga-Deformação (Adaptado de CEB, 1985).....	6
Figura 2.2 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio I (PINHEIRO, 2007).....	7
Figura 2.3 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio II (PINHEIRO, 2007).....	7
Figura 2.4 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio III (PINHEIRO, 2007).....	8
Figura 2.5 – Diagrama Momento-Curvatura (Adaptado de LEONHARDT, 1979).....	9
Figura 2.6 - Modelo para consideração do <i>Tension Stiffening</i> (STRAMANDINOLI E LA ROVERE, 2008).....	11
Figura 2.7 - Diagrama Tensão-Deformação para a pasta de cimento, agregado e concreto (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	12
Figura 2.8 - Determinação do módulo de elasticidade estático (ALMEIDA, 2005).....	12
Figura 2.9 - Comportamento Tensão x Deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	13
Figura 2.10 - Comportamento Tensão x Deformação do concreto sob compressão uniaxial (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	13
Figura 2.11 - Primeiros quatro modos de vibração de uma viga biapoiada (NETO, 2007).....	17
Figura 3.1 – Identificação adotada para os modelos de viga.....	26
Figura 3.2 – Detalhamento da armadura dos modelos experimentais: a) Tipo A50; b) Tipo A63 e c) Tipo A80.....	28
Figura 3.3 – Aspecto geral da produção do concreto em caminhão betoneira.....	32
Figura 3.4 – Evolução da resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo.....	33
Figura 3.5 – Evolução do módulo de elasticidade secante dos concretos ao longo do tempo.....	33
Figura 3.6 – Preparação das armaduras e das formas: (a) limpeza das armaduras; (b) aspecto geral das formas.....	34
Figura 3.7 – Moldagem dos modelos de viga: (a) slump test; (b) vigas concretadas.....	35
Figura 3.8 – Aspecto geral dos modelos produzidos: (a) vigas desmoldadas; (b) vigas em processo de cura.....	35
Figura 3.9 – Esquema de carregamento para o ensaio de flexão.....	37
Figura 3.10 – Montagem geral do ensaio de flexão.....	38
Figura 3.11 – Montagem do ensaio de flexão: a) vista frontal; b) vista lateral.....	38
Figura 3.12 – Configuração do ensaio: (a) vista lateral; (b) vista frontal.....	39
Figura 3.13 – Parte do conjunto das vigas ensaiadas.....	39
Figura 3.14 – Fissuração em conjunto de vigas.....	40

Figura 3.15 – Diagrama Carga-Deslocamento típico dos ensaios de flexão.....	40
Figura 3.16 – Instrumentação do ensaio para determinação das características dinâmicas: (a) Acelerômetro unidirecional; (b) Rack e módulo analógico <i>NI</i>	42
Figura 3.17 – Montagem do ensaio para determinação das propriedades dinâmicas. ...	42
Figura 3.18 – Aplicação de impacto para obtenção da frequência fundamental.	43
Figura 3.19 – Tela do VI para leitura dos dados de vibração obtidos via Labview.	43
Figura 3.20 – Frequência natural fundamental obtida com auxílio do Matlab.	44
Figura 4.1 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A50.....	47
Figura 4.2 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A50.	47
Figura 4.3 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A50. ...	48
Figura 4.4 – Equação de regressão linear estimativa do Estádio I.	48
Figura 4.5 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A50 com representação dos resultados experimentais e analíticos.	49
Figura 4.6 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A50.....	50
Figura 4.7 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A63.....	51
Figura 4.8 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A63.	51
Figura 4.9 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A63. ...	52
Figura 4.10 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A63 com representação dos resultados experimentais e analíticos.	52
Figura 4.11 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A63.....	53
Figura 4.12 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A80.....	54
Figura 4.13 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A80.	54
Figura 4.14 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A80. .	55
Figura 4.15 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A80 com representação dos resultados experimentais e analíticos.	55
Figura 4.16 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A80.....	56
Figura 4.17 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T45.....	58
Figura 4.18 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T45.	59
Figura 4.19 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T45.	59
Figura 4.20 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T45.....	60
Figura 4.21 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T60.....	61

Figura 4.22 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T60.	61
Figura 4.23 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T60.	62
Figura 4.24 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T60.	62
Figura 4.25 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T70.	63
Figura 4.26 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T70.	63
Figura 4.27 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T70.	64
Figura 4.28 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T70.	64
Figura 4.29 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T80.	65
Figura 4.30 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T80.	65
Figura 4.31 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T80.	66
Figura 4.32 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T80.	66
Figura 4.33 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A50.	68
Figura 4.34 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A50.	69
Figura 4.35 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A50.	69
Figura 4.36 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A50.	70
Figura 4.37 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A63.	71
Figura 4.38 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A63.	71
Figura 4.39 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A63.	72
Figura 4.40 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A63.	72
Figura 4.41 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A80.	73
Figura 4.42 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A80.	73
Figura 4.43 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A80.	74
Figura 4.44 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A80.	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b_w	largura da alma da viga
d	altura útil
h	altura da viga
f	frequência fundamental transversal
f_0	frequência fundamental da viga
f_c	resistência à compressão do concreto
f_{ct}	resistência à tração direta do concreto
$f_{ct,D}$	resistência à tração por compressão diametral do concreto
f_{ctm}	resistência à tração média do concreto
f_u	tensão última do aço
f_y	tensão de escoamento do aço
m	massa total do elemento
x_I	altura da linha neutra no Estádio I
x_{II}	altura da linha neutra no Estádio II
x_{III}	altura da linha neutra no Estádio III
y_t	distância do centro de gravidade da seção até a fibra mais tracionada
A_s	área de armadura tracionada
E	módulo de elasticidade
E_c	módulo de elasticidade estático
E_{cs}	módulo de elasticidade secante do concreto
$E_{c,0}$	módulo de elasticidade tangente inicial
$E_{c,tg}$	módulo de elasticidade tangente
E_s	módulo de elasticidade do aço
EI	rigidez à flexão
EI_I	rigidez à flexão no Estádio I
EI_{II}	rigidez à flexão no Estádio II
$EI_{variável}$	rigidez à flexão variável
$(EI)_{eq}$	rigidez equivalente
I	momento de inércia
I_I	momento de inércia no Estádio I
I_{II}	momento de inércia no Estádio II

K_0	curvatura referida ao centroide da seção transversal
K_n	coeficiente que depende do modo de vibração
L	vão entre apoios
LN	linha neutra
M	momento fletor
M_I	momento fletor no Estádio I
M_{II}	momento fletor no Estádio II
M_{III}	momento fletor no Estádio III
M_a	momento fletor na seção crítica
M_r	momento de fissuração
P_r	carga de fissuração
R_{cc}	resultante de compressão no concreto
R_{ct}	resultante de tração no concreto
R_s	resultante de tração no aço
α	relação a resistência à tração na flexão e a resistência à tração direta
β^2	parâmetro de vibração
$\Delta\varepsilon$	contribuição do concreto íntegro entre fissuras
ε_0	deformação axial no centroide da seção transversal
ε_{cc}	deformação no concreto comprimido
ε_{cr}	deformação de ruptura à tração
ε_{ct}	deformação no concreto tracionado
ε_{cu}	deformação última no concreto comprimido
ε_s	deformação no aço tracionado
ε_{sm}	deformação específica média da armadura
ρ	densidade
σ_{cc}	tensão no concreto comprimido
σ_{cd}	tensão de cálculo no concreto comprimido
σ_{ct}	tensão no concreto tracionado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEB	<i>Comité Euro-International du Béton</i>
CFL	<i>Carbon Fiber Laminate</i>

CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CV	coeficiente de variação
DP	desvio padrão
DT	<i>Displacement Transducer</i> (Transdutor de deslocamento)
END	Ensaio Não Destrutivo
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SG	<i>Strain Gage</i> (Extensômetro)
VI	<i>Virtual Instrument</i>

RESUMO

LIMA, Gustavo Emilio Soares. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Avaliação dinâmica do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidos à degradação da rigidez**. Orientador: José Luiz Rangel Paes. Coorientadores: Gustavo de Souza Veríssimo e Leonardo Gonçalves Pedroti.

A deterioração de uma estrutura de concreto armado causa a redução da rigidez dos elementos estruturais e, por consequência, modifica sua frequência natural. A partir da frequência natural é possível estimar a rigidez residual de um elemento estrutural. Neste trabalho avalia-se o comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas à degradação mecânica da rigidez, com auxílio das características dinâmicas. Para o desenvolvimento do programa experimental foram utilizados 36 modelos de viga de concreto armado, nos quais buscou-se variar as características mecânicas do concreto e a taxa de armadura. A fim de promover a degradação da rigidez das vigas de concreto armado os modelos experimentais foram submetidos a ensaios de flexão até alcançar uma carga próxima ao colapso. Para diversos estágios de carga do ensaio de flexão foi obtida a frequência fundamental da viga por meio de um ensaio para determinação das características dinâmicas. Para efeitos de comparação de resultados, os modelos de viga foram simulados com auxílio do programa computacional Deforme v3.02-c1 e por meio de um modelo analítico. Com base nos resultados obtidos conclui-se que o procedimento para estimativa de flechas a partir das características dinâmicas descreve de forma adequada os fenômenos que ocorrem em uma viga de concreto armado submetida à flexão simples, como por exemplo efeito de *Tension Stiffening*. Outro aspecto importante de se destacar é que para a faixa de serviço os elementos apresentaram cerca de 70% a 80% de sua rigidez inicial. Para cargas próximas ao colapso, as vigas ainda conservaram uma parcela significativa de sua rigidez, que varia entre 50% e 60% de sua rigidez inicial. De uma forma mais ampla, concluiu-se que a estimativa da rigidez residual e de flechas de vigas de concreto armado por meio de sua frequência fundamental, mostra-se como uma metodologia adequada para avaliação da integridade destes elementos.

ABSTRACT

LIMA, Gustavo Emilio Soares. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Dynamic assessment of the structural behavior of reinforced concrete beams subjected to the stiffness degradation.** Advisor: José Luiz Rangel Paes. Co-advisors: Gustavo de Souza Veríssimo and Leonardo Gonçalves Pedroti.

The deterioration of the structure of reinforced concrete beams causes a reduction of the structural stiffness which consequently brings about modifications in their natural frequency. From the natural frequency, it is possible to estimate the residual stiffness of a structural element. The aim of this work is to assess the structural behavior of reinforced concrete beams subjected to the stiffness degradation, by using the dynamic characteristics. Regarding the development of the experimental program, 36 models of reinforced concrete beam were used so that different behaviors of the mechanical characteristics of the concrete and the reinforcement ratio could be assessed. In order to promote the stiffness degradation of the reinforced concrete beams, the experimental models were subjected to bending tests until reaching a load close to collapse. In respect to the different loading stages of the flexural test, the fundamental frequency of the beam was obtained by means of a test to determine the dynamic characteristics. For comparison purposes, the beam models were simulated using the Deforme v3.02-c1 software and an analytical model. By taking into account the obtained results, it is possible to conclude that the procedure for estimating the deflection from the dynamic characteristics accurately describes the phenomena that occur in a reinforced concrete beam subjected to simple bending, as for instance the Tension Stiffening effect. An important point to be detached is that for the service range, the elements presented about 70% to 80% of their initial stiffness. For loads close to collapse, the beams retained a significant portion of their stiffness, ranging from 50% to 60% of their initial stiffness. In a more comprehensive manner, it was concluded that the estimation of the residual stiffness and the deflection of reinforced concrete beams, by means of their fundamental frequency, is shown as an adequate methodology to assess the integrity of these elements.

1

INTRODUÇÃO

As condições de serviço e de segurança de uma estrutura de concreto armado podem ser alteradas ao longo do tempo em função do envelhecimento precoce, características ambientais, carregamentos impostos, eventos extraordinários, dentre outros.

Estas situações provocam a deterioração das estruturas e podem ser causadas por efeitos intrínsecos ou extrínsecos. Os efeitos intrínsecos são inerentes à própria estrutura, como por exemplo, falhas dos materiais e presença de contaminantes no concreto. Já os efeitos extrínsecos independem da estrutura e estão ligados aos carregamentos excessivos, ataques químicos e biológicos, choque de veículos, dentre outros (SOUZA e RIPPER, 1998).

De uma maneira geral, a deterioração do concreto e das armaduras de aço em uma estrutura provocam uma gradativa redução da rigidez dos elementos e, conseqüentemente, um aumento das deformações e flechas, podendo comprometer o desempenho da estrutura em condições de serviço. Em casos extremos, uma estrutura de concreto armado pode atingir um nível de deterioração tão elevado, que pode colocá-la numa situação de colapso iminente.

Desde os anos 90, normas técnicas e manuais nacionais e internacionais relacionados às estruturas de concreto armado vêm estabelecendo parâmetros para garantir a durabilidade e prolongar a vida útil das estruturas. Observa-se também uma demanda crescente pelo desenvolvimento de metodologias que permitam avaliar a capacidade residual de estruturas deterioradas.

Neste contexto, os Ensaio Não Destrutivos (END) apresentam-se como uma forte alternativa para a identificação e avaliação de danos, permitindo avaliar características físicas e mecânicas de elementos estruturais. Pode-se dizer que estas técnicas vêm se tornando grandes aliadas para a rápida identificação de problemas patológicos e para a avaliação da capacidade residual de estruturas de concreto.

Os END para obtenção das características dinâmicas permitem determinar, de forma rápida e confiável, os parâmetros modais da estrutura (frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento). Dentre estes END, aqueles que permitem a obtenção da frequência natural são os mais utilizados para a identificação de danos em elementos e estruturas (SALAWU, 1997).

O processo de deterioração de uma estrutura de concreto armado provoca uma gradativa redução da rigidez dos elementos, o que implica em mudanças nas suas frequências naturais. A determinação destas frequências permite estimar de forma realista a rigidez residual dos elementos, que é um parâmetro de difícil mensuração. Este parâmetro é de significativa importância em projetos de recuperação e reforço de estruturas, pois a adoção de uma rigidez mais realista leva a um projeto mais seguro e econômico. A rigidez residual também tem grande importância em trabalhos periciais que buscam avaliar a integridade estrutural ou estimar a capacidade de carga de um elemento isolado ou de uma estrutura.

O presente trabalho trata da avaliação da degradação da rigidez de vigas de concreto armado submetidas a um processo de dano progressivo, com vistas ao desenvolvimento de uma metodologia para estimar os deslocamentos e a rigidez residual destes elementos, a partir da modificação da frequência fundamental.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas à degradação mecânica da rigidez, com auxílio das características dinâmicas.

Os objetivos específicos são:

- ✓ avaliar as alterações da frequência natural de vigas de concreto armado, com diferentes resistências à compressão e taxas de armadura, quando submetidas a um processo de dano progressivo gerado por efeito mecânico;
- ✓ estimar a rigidez à flexão e os deslocamentos de vigas de concreto armado a partir das características dinâmicas;
- ✓ comparar os resultados experimentais de deslocamento com resultados numéricos e analíticos;
- ✓ avaliar a influência da variação da resistência à compressão e da taxa de armadura sobre a rigidez de vigas de concreto armado, simulando a deterioração do concreto e das armaduras;

1.2 Justificativa e relevância do tema

No âmbito da recuperação e reforço de estruturas de concreto armado, devido à dificuldade de se estimar o grau de degradação dos elementos estruturais, em muitos casos se despreza a capacidade residual dos mesmos. Este procedimento tem implicações técnicas, uma vez que não conhecendo as reais características mecânicas dos elementos, torna-se difícil prever as respostas da estrutura de forma realista. Adicionalmente, esta forma de tratar o assunto tem implicações econômicas, já que a capacidade residual dos elementos estruturais pode ser entendida como um valor disponível que deixa de ser aproveitado.

Nos últimos anos, a aplicação dos END dinâmicos têm se consolidado como uma importante alternativa para a avaliação do comportamento de estruturas de concreto, permitindo a identificação de danos e a estimativa do grau de degradação da rigidez de elementos estruturais.

Os END dinâmicos apresentam uma grande sensibilidade às modificações da rigidez dos elementos estruturais. Em função disso, torna-se importante envidar esforços para estabelecer correlações realistas entre os parâmetros modais e a rigidez dos elementos

estruturais, o que pode representar um avanço para a avaliação da capacidade residual de elementos de concreto armado deteriorados.

De uma forma mais ampla, o presente trabalho irá contribuir com a Linha de Pesquisa relacionada à avaliação das características dinâmicas de estruturas no âmbito da Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 apresenta-se uma fundamentação teórica com os conceitos fundamentais para a compreensão e o desenvolvimento deste trabalho. Também apresenta-se um breve relato de pesquisas recentes relacionadas à avaliação da degradação da rigidez de estruturas de concreto armado desenvolvidas por outros autores.

No Capítulo 3 apresenta-se as características dos modelos utilizados no programa experimental, as propriedades dos materiais, as normas técnicas aplicadas, a descrição da instrumentação e dos equipamentos utilizados e os procedimentos para execução dos ensaios de flexão e de determinação das características dinâmicas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão e dos ensaios de determinação das características dinâmicas para os modelos experimentais de viga. Na sequência é apresentado um estudo do comportamento de vigas sujeitas à variação da taxa de armadura e um estudo de vigas sujeitas à variação das características mecânicas do concreto.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo são apresentados os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Apresentam-se também um breve relato de trabalhos relacionados à avaliação da degradação de rigidez de vigas de concreto armado realizados por outros autores.

2.1 Comportamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão

O comportamento de uma viga de concreto armado submetida à flexão é marcado por duas fases distintas. Na primeira fase o elemento está íntegro e o material se comporta de forma linear, enquanto que na segunda fase o elemento apresenta fissuras na região tracionada e o material se comporta de maneira não-linear (PAES, 1994). Na Figura 2.1 apresenta-se um Diagrama Carga-Deformação típico de uma viga de concreto armado, no qual pode-se observar as regiões sem fissuração e com a presença de fissuras no elemento estrutural.

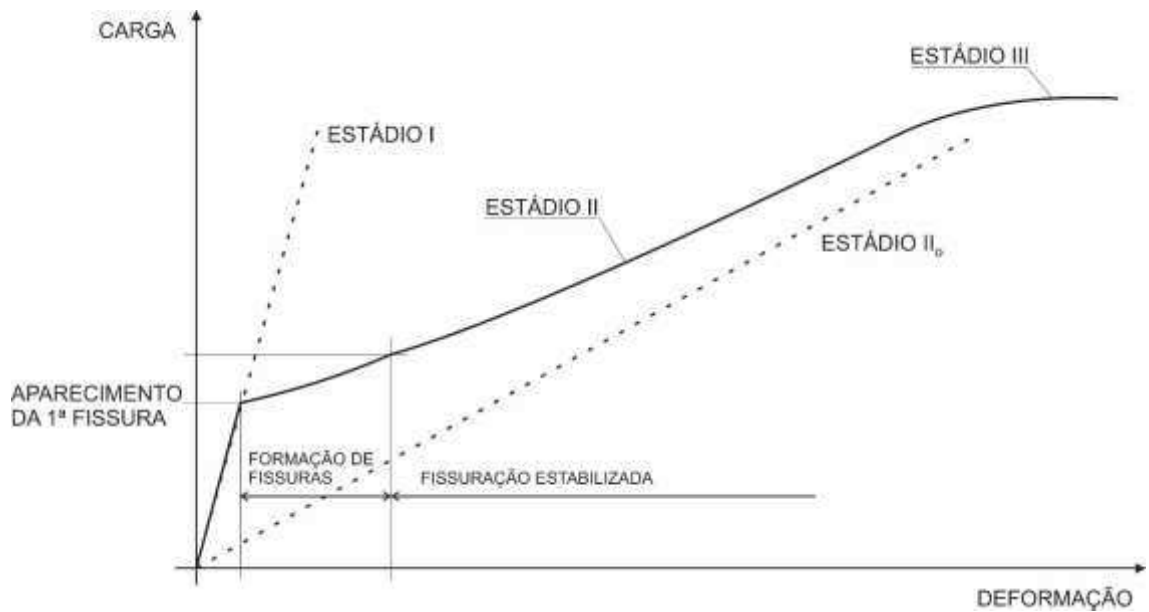


Figura 2.1 – Diagrama Carga-Deformação (Adaptado de CEB, 1985).

Segundo Pinheiro (2007), para avaliar o comportamento de um elemento de concreto armado submetido à flexão, deve-se aplicar um carregamento progressivo até o seu colapso. A medida que é carregado, o elemento passa por situações, denominadas Estádios I, II e III (Figura 2.1). No Estádio I o elemento não apresenta fissuras (Figura 2.1). No momento que a tensão de tração no elemento ultrapassa a resistência à tração do concreto, o que leva ao surgimento da primeira fissura, caracterizando a passagem do Estádio I para o Estádio II e, por consequência, provocando uma queda da rigidez do elemento. No Diagrama Carga-Deformação da Figura 2.1 indica-se também a reta referente ao Estádio II₀, que corresponde à situação em que somente o aço resiste aos esforços na zona tracionada do elemento.

No Estádio I (Figura 2.2), devido às baixas taxas de carregamento, o concreto é capaz de resistir aos esforços de tração sozinho, ou seja, a seção permanece íntegra e a distribuição de deformações é linear. A passagem do Estádio I para o II acontece com a abertura da primeira fissura.

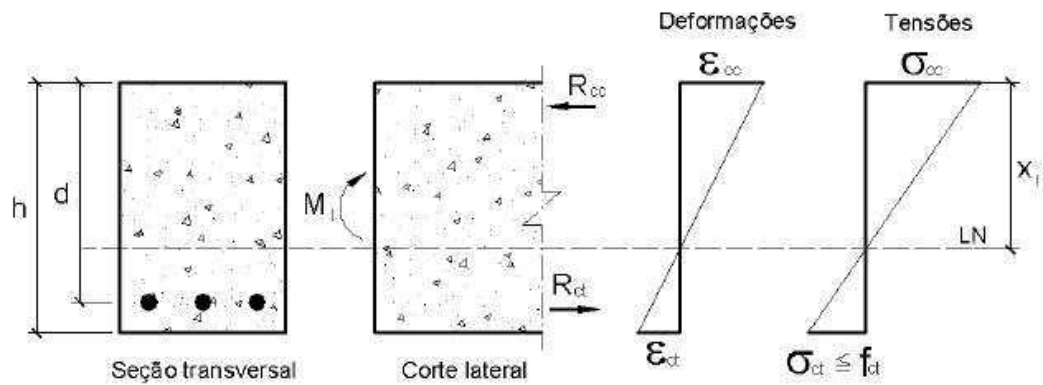


Figura 2.2 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio I (PINHEIRO, 2007).

No Estádio II puro ou II₀ (Figura 2.3), considera-se que o concreto não é mais capaz de resistir as tensões de tração. Na região tracionada da seção transversal a resistência do concreto é desprezada, a distribuição de deformações é linear e o concreto comprimido trabalha em regime elástico-linear. O início da plastificação do concreto comprimido corresponde à transição do Estádio II para o III.

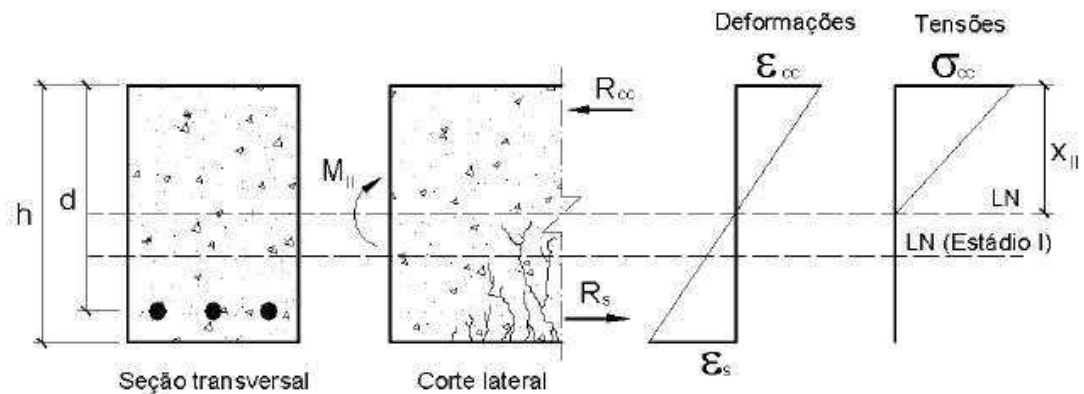


Figura 2.3 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio II (PINHEIRO, 2007).

No Estádio III (Figura 2.4), considera-se que a região tracionada da seção transversal está completamente fissurada e o concreto comprimido encontra-se plastificado, podendo atingir o colapso a qualquer momento.

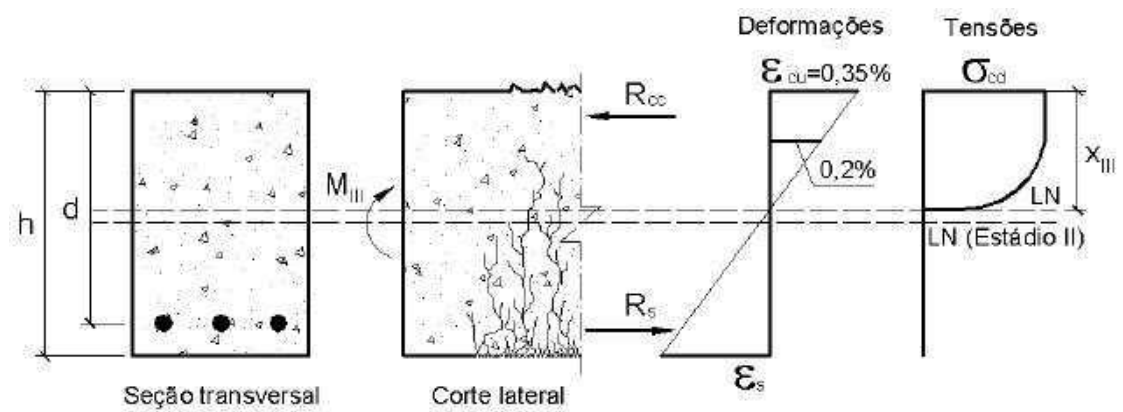


Figura 2.4 – Diagrama de deformação e tensão para o Estádio III (PINHEIRO, 2007).

No Estádio II, o concreto contido entre duas fissuras adjacentes pode conservar parte de sua resistência à tração devido à aderência entre as barras de aço e o concreto que está no seu entorno. Este fenômeno é chamado de *Tension Stiffening*, e é conhecido desde os anos 70, porém não era levado em consideração pelo fato de não contribuir para a resistência última da peça. Entretanto, a partir dos anos 80, diversos códigos e guias de dimensionamento internacionais passaram a considerar o efeito do *Tension Stiffening*, dada sua importância para o cálculo das respostas de um elemento estrutural em condições de serviço.

Na Figura 2.5 apresenta-se um Diagrama Momento-Curvatura típico de elementos de concreto armado submetidos à flexão, que expressa o comportamento do elemento até o colapso. Neste diagrama pode-se observar a variação da rigidez à flexão do elemento (EI) à que se aplica o carregamento e que ocorre a fissuração. Na Figura 2.5 pode-se observar também a contribuição do concreto íntegro entre fissuras (fenômeno de *Tension Stiffening*) para a rigidez do elemento, neste caso representado pela deformação $\Delta\epsilon$.

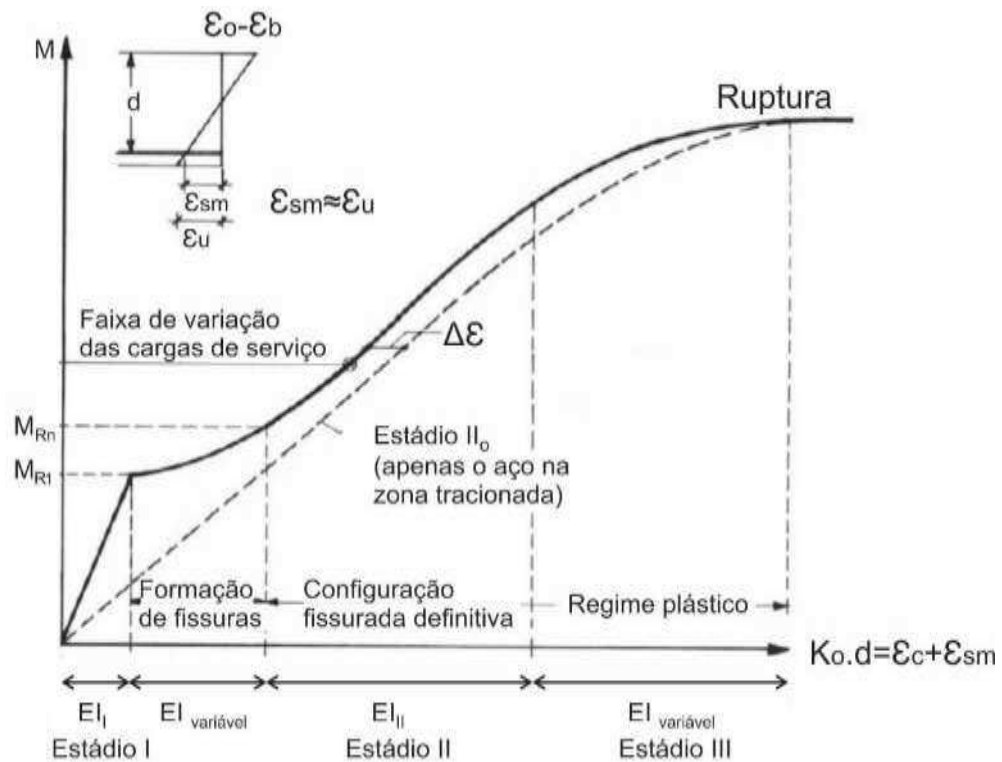


Figura 2.5 – Diagrama Momento-Curvatura (Adaptado de LEONHARDT, 1979).

Ao desenvolver fissuras, um elemento de concreto armado submetido à flexão se comporta como uma viga de rigidez variável. A integridade do concreto entre fissuras promove um enrijecimento do elemento devido à contribuição do concreto tracionado (fenômeno de *Tension Stiffening*), o que é relevante para o cálculo de flechas na faixa de variação das cargas de serviço. Com base na Figura 2.5 pode-se observar que a não consideração do concreto tracionado (Estádio II₀) subjugaria a rigidez da peça e levaria à obtenção de flechas maiores do que as que realmente ocorrem.

O fenômeno do *Tension Stiffening* sofre influência de diversos fatores, como a dimensão da peça, a taxa de armadura, as propriedades mecânicas dos materiais e a distribuição das fissuras, o que torna complexa a sua consideração para efeitos de cálculo.

Segundo Massicote (1990) *apud* Paes (1994), o fenômeno de *Tension Stiffening* pode ser interpretado como um “aumento de rigidez” de um elemento de concreto armado devido à interação entre concreto e armadura.

Ao longo do tempo foram apresentados vários modelos para consideração do fenômeno de *Tension Stiffening*. Branson (1968) propôs um dos modelos mais simples e bem aceitos, que permite levar em consideração o fenômeno de *Tension Stiffening* por meio da determinação de um parâmetro denominado Rigidez Equivalente (EI)_{eq}.

Alguns modelos propostos modificam a relação constitutiva do aço e/ou do concreto. Dentre os modelos que modificam a relação constitutiva do aço, pode-se citar Gilbert e Warner (1978) e Choi e Cheung (1994). Já entre os modelos que modificam a relação constitutiva do concreto estão Lin e Scordelis (1975) e Massicote (1990) *apud* Stramandinoli (2008).

Existem modelos mais complexos baseados no mecanismo de Aderência-Deslizamento (*Bond-Slip Mechanism*) entre os quais podem ser citados Russo e Romano (1992), Gupta e Maestrini (1990) *apud* Stramandinoli (2008). Tais modelos são também conhecidos como “modelos microscópicos” e levam em consideração uma série de características que são de difícil obtenção, demandando experimentos específicos para cada componente envolvido. Além disso, tais modelos têm a grande inconveniência de não poderem ser extrapolados para problemas de âmbito mais geral.

Geralmente, os modelos que modificam a equação constitutiva do concreto tracionado, em que o ramo descendente do Diagrama Tensão-Deformação do concreto é modificado para que se leve em consideração o fenômeno do *Tension Stiffening* de uma maneira média, são os mais utilizados. Esses modelos, também chamados de “modelos macroscópicos”, são de mais fácil modelagem e têm aplicabilidade mais ampla. Entretanto, há uma demasiada simplificação do fenômeno em estudo na medida em que se considera apenas uma equação para descrever o comportamento pós-fissuração, sem levar em consideração, por exemplo, a taxa de armadura da peça e as propriedades mecânicas dos materiais.

Atualmente diversos estudos sobre o fenômeno do *Tension Stiffening* continuam sendo realizados no contexto internacional. A título de exemplo, apresenta-se, na Figura 2.6, um modelo que leva em consideração o concreto tracionado entre fissuras proposto por Stramandinoli e La Rovere (2008).

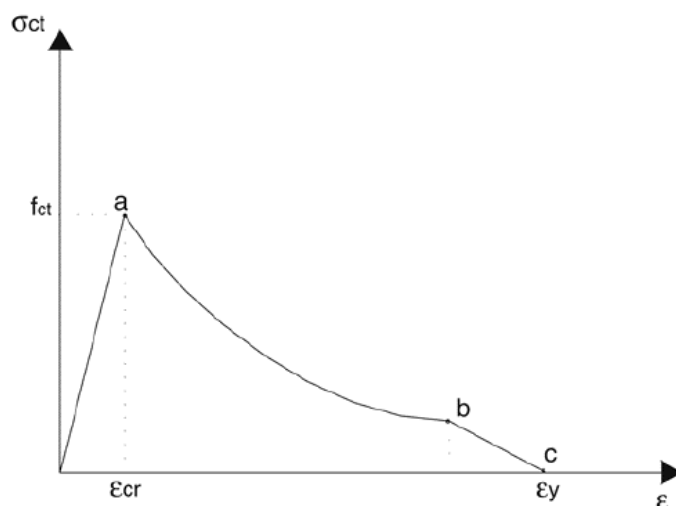


Figura 2.6 - Modelo para consideração do *Tension Stiffening* (STRAMANDINOLI E LA ROVERE, 2008).

2.2 Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado

2.2.1 Módulo de elasticidade do concreto

O módulo de elasticidade do concreto representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea do material. Para o concreto, este é um parâmetro imprescindível quando se deseja determinar as deformações e as tensões de projeto, apesar do comportamento não linear desse material.

O concreto é um material heterogêneo, de tal forma que mudanças em sua microestrutura, tais como o aumento do volume de vazios ou da quantidade de microfissuras, em especial na zona de transição (região de interface agregado-pasta), podem exercer uma grande influência em suas propriedades, principalmente na resistência mecânica e na deformabilidade. Na Figura 2.7 pode-se observar que a relação entre tensão e deformação para a pasta de cimento e para o agregado graúdo são lineares, entretanto para o material composto, ou seja, para o concreto, este comportamento é não linear para tensões mais elevadas. Segundo Neville e Brooks (2013), este fato é explicado pelo surgimento de microfissuras na zona de transição a partir de tensões que correspondem aproximadamente 30% da resistência última.

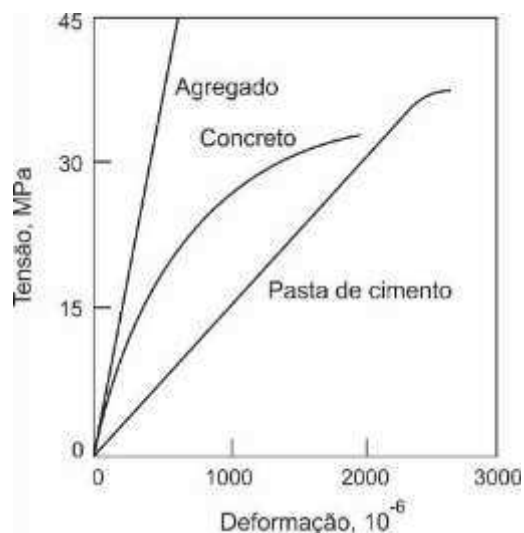


Figura 2.7 - Diagrama Tensão-Deformação para a pasta de cimento, agregado e concreto (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).

O módulo de elasticidade estático (E_c) é dado pela inclinação do Diagrama Tensão-Deformação e determinado por meio do ensaio definido pela ABNT NBR 8522:2008. De acordo com a reta utilizada para sua determinação, o módulo estático pode ser tangente ou secante (Figura 2.8). O Módulo tangente ($E_{c,tg}$) é dado pela inclinação da reta tangente em um ponto “A” qualquer. Quando esta reta for tangente à curva na origem, este será o Módulo tangente inicial ($E_{c,0}$). Já o Módulo secante ($E_{c,s}$) é a inclinação da reta secante ao diagrama definida de um valor mínimo “B” até ao ponto “C”, que equivale à tensão considerada.

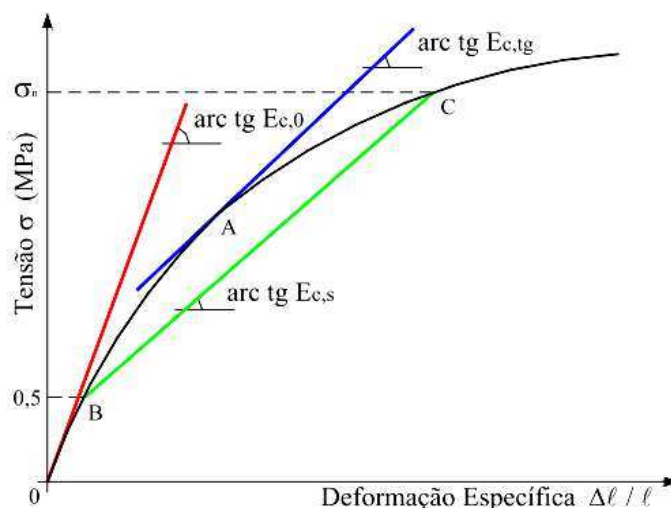


Figura 2.8 - Determinação do módulo de elasticidade estático (ALMEIDA, 2005).

Quando submetido a ciclos de carga-descarga, o concreto apresenta uma gradual degradação do módulo de elasticidade para níveis de tensão entre 50% e 75% de sua

resistência à compressão axial (f_c). Assim, ocorre um aumento da microfissuração na zona de transição e na matriz, gerando uma não-linearidade nas curvas de descarregamento, ou seja, o material vai perdendo suas propriedades elásticas (Figura 2.9).

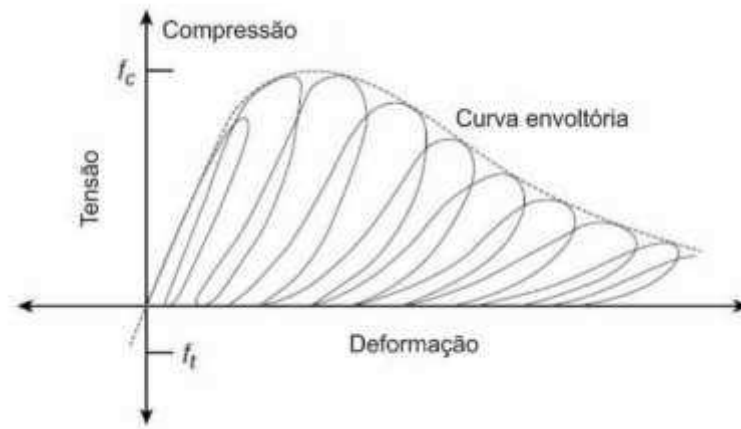


Figura 2.9 - Comportamento Tensão x Deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

O Diagrama Tensão-Deformação do concreto submetido à compressão uniaxial pode ser dividido em quatro etapas distintas de carregamento (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Na Figura 2.10 apresentam-se estes quatro estágios, que vão desde o regime elástico-linear para cargas até 30% de f_c (1ª Etapa), passando pelo aumento de tamanho e quantidade de microfissuras, até em cargas superiores a 75% de f_c (4ª Etapa), quando se inicia o processo de crescimento expontâneo de fissuras sob tensão constante.

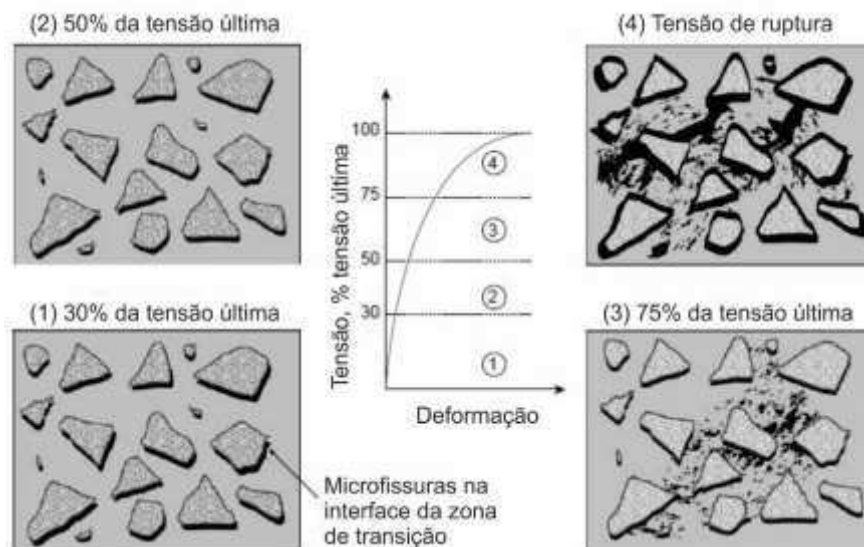


Figura 2.10 - Comportamento Tensão x Deformação do concreto sob compressão uniaxial (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Segundo Garaygordobil (2003), como O Diagrama Tensão-Deformação do concreto apresenta um comportamento não-linear, determinar um único valor de módulo de elasticidade estático é uma tarefa muito complexa. Assim o uso de ensaios dinâmicos não-destrutivos conduz a um valor mais preciso do módulo de elasticidade do material, pois estes fornecem uma ideia global da estrutura.

O módulo de elasticidade dinâmico ($E_{c,d}$) pode fornecer informações quanto à deformabilidade do concreto, a rigidez de um dado elemento estrutural ou até mesmo sobre a integridade deste elemento (ALMEIDA, 2005). Para o autor, a qualidade e a repetibilidade do ensaio tornam o módulo dinâmico um parâmetro global e de alto grau de confiabilidade.

No Brasil ainda não existem normas para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{c,d}$), sendo utilizados métodos propostos por normas internacionais, como a ASTM C215-14 e ASTM C597-16.

2.2.2 Momento de inércia da seção transversal de concreto armado

Para uma seção retangular, isenta de fissuração (Estádio I) e com armadura simples, o momento de inércia da seção transversal (I_I) é dado por:

$$I_I = b_w \frac{h^3}{12} + b_w h \left(x_I - \frac{h}{2} \right)^2 + \left(\frac{E_s}{E_{cs}} - 1 \right) A_s (d - x_I)^2 \quad (2.1)$$

onde:

I_I momento de inércia no Estádio I;

b_w largura da alma da viga;

h altura da viga;

x_I posição da linha neutra no Estádio I.

E_s módulo de elasticidade do aço;

E_{cs} módulo de elasticidade secante do concreto;

A_s área da armadura tracionada.

Para uma seção retangular fissurada (Estádio II₀), com armadura simples, o momento de inércia da seção transversal (I_{II0}) será dado por:

$$I_{II0} = \frac{b_w x_{II}^3}{3} + \frac{E_s}{E_{cs}} A_s (x - d)^2 \quad (2.2)$$

onde:

I_{II0} momento de inércia da seção fissurada;

x_{II} posição da linha neutra no Estádio II.

2.2.3 Estimativa da rigidez à flexão para o concreto fissurado

A rigidez à flexão (EI) sofre alterações à medida que o carregamento é incrementado sobre o elemento. Por um lado, as microfissuras causam mudanças na estrutura interna do concreto, influenciando no valor do seu módulo de elasticidade. Por outro lado, as macrofissuras diminuem a área resistente da seção transversal, reduzindo o momento de inércia. Logo, é necessário estudar as propriedades mecânicas do material e da variação das características geométricas do elemento estrutural, tendo em vista a fissuração em determinadas regiões.

Para Almeida (2005), enquanto a determinação do módulo de elasticidade estático é bastante difundida e utilizada, a avaliação da rigidez do elemento ainda pode conduzir a incertezas devido à dificuldade de avaliar realisticamente a fissuração. Ainda segundo o autor, para a avaliação dos esforços e deformações nas estruturas submetidas à flexão, deve-se dar preferência ao uso das relações momento-curvatura, pois estas indicam diretamente a rigidez. Em uma estrutura real, esta avaliação pode ser feita através de uma prova de carga.

A expressão proposta por Branson (Eq. 2.3) permite o cálculo de uma rigidez equivalente $(EI)_{eq}$ para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas de concreto armado e representa uma ponderação entre o Estádio I e o Estádio II₀. Essa expressão é recomendada pela ABNT NBR 6118:2014 e é dada por:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (2.3)$$

onde:

$(EI)_{eq}$ rigidez equivalente da seção transversal;

M_r momento de fissuração do elemento estrutural, dado pela Expressão 2.4;

M_a momento fletor na seção crítica do vão considerado.

O momento de fissuração corresponde ao momento necessário para gerar a abertura da primeira fissura na seção transversal, ou seja, a transição do estágio I para o II. Este momento é dado por:

$$M_r = \alpha f_{ct} \frac{I_c}{y_t} \quad (2.4)$$

onde:

α fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

f_{ct} resistência à tração direta do concreto;

y_t distância do centro de gravidade da seção até a fibra mais tracionada;

Clímaco (2013) destaca que a avaliação da rigidez equivalente considerando o momento de inércia da seção fissurada no Estádio II₀ é válida para seções retangulares com armadura simples, em função disso, pode-se observar que a resposta da expressão de Branson é conservadora, pois não considera a existência de armadura comprimida (porta estribo).

2.3 Características dinâmicas de vigas de concreto armado

2.3.1 Frequências naturais e modos de vibração

As frequências naturais e os modos de vibração de um elemento estrutural ou de uma estrutura dependem, basicamente, da massa, da rigidez e das condições de contorno. Qualquer mudança em um desses parâmetros altera a forma de vibrar. Logo, um elemento sujeito a um processo de degradação experimentará uma redução gradativa de rigidez e, conseqüentemente, de sua frequência natural.

Os modos de vibração de um elemento estrutural ou de uma estrutura representam as possíveis formas de vibrar e estão diretamente associados às frequências naturais

(Figura 2.11). O modo de vibração sofre grande influência da fissuração, principalmente em regiões nas quais os deslocamentos da estrutura apresentam maior amplitude (ALMEIDA, 2005).

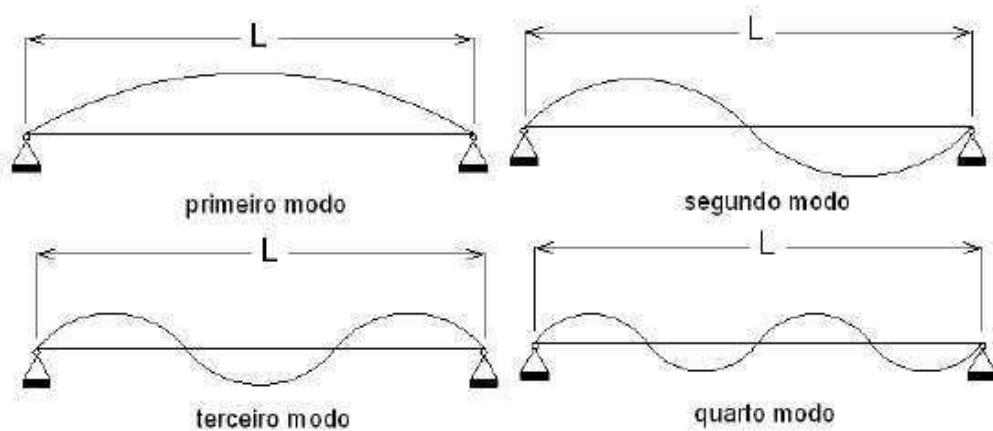


Figura 2.11 - Primeiros quatro modos de vibração de uma viga biapoiada (NETO, 2007).

Dentre as várias frequências naturais, a de menor valor é chamada de frequência fundamental e corresponde ao primeiro modo de vibração. Normalmente, esta é a frequência mais facilmente excitada nas estruturas em geral, por ser a que requer a menor energia.

Para um sistema contínuo, a frequência natural transversal (f), em Hertz, é dada por:

$$f = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{E I}{m L^3}} \quad (2.5)$$

onde:

K_n coeficiente que depende das condições de contorno e do modo de vibração;

E módulo de elasticidade do material (N/m²);

I momento de inércia da seção transversal (m⁴);

m massa total do elemento (kg);

L comprimento do elemento (m).

2.3.2 Vibração em vigas

As frequências naturais de uma viga com diferentes condições de contorno podem ser estimadas por meio de:

$$f = \frac{\beta^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho A}} \quad (2.6)$$

onde:

β^2 parâmetro de vibração;

ρ densidade do material.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os parâmetros de vibração referentes aos cinco primeiros modos de vibração para as condições de contorno apoiado-apoiado (A - A), engastado-engastado (E - E), engastado-apoiado (E - A) e engastado-livre (E - L).

Tabela 2.1 – Parâmetro de vibração (Adaptado de LEISSA e QATU, 2011).

Modo	A - A	E - E	E - A	E - L
1	9,869	22,373	15,418	3,516
2	39,478	61,673	49,965	22,034
3	88,826	120,903	104,248	61,697
4	157,914	199,859	178,270	120,902
5	246,740	298,559	272,031	199,860

A expressão para obtenção da vibração transversal de uma viga simplesmente apoiada nas duas extremidades, para os seus n modos de vibração e que atende as condições de Bernoulli-Euler, é dada por:

$$f = n^2 \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho A}} \quad (2.7)$$

onde:

n número do modo de vibração (1, 2, 3, ...);

Partindo-se da Expressão 2.7, pode-se estimar a rigidez (EI) da vigas partir da frequência fundamental por meio de:

$$EI = \frac{4 \rho A f^2 L^4}{\pi^2} \quad (2.8)$$

2.4 Deterioração do concreto nas estruturas

Existem diferentes formas da degradação se manifestar em estruturas de concreto. Segundo Gebregziabhier (2008), os sinais de degradação mais comuns observados nas estruturas de concreto são as fissuras, descamamentos ou delaminações, deslocamentos excessivos, alterações de coloração, erosão e corrosão das armaduras.

O conhecimento das causas da deterioração do concreto é indispensável para que se possam adotar procedimentos de reparo adequados e para evitar que a estrutura volte a se deteriorar (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para Bertolini (2010), a ação do ambiente sobre as estruturas de concreto armado pode levar a um processo de deterioração progressiva, tanto no concreto como nas armaduras. Segundo esse autor, as principais causas da deterioração do concreto são físicas (efeito da temperatura), químicas (ataque de sulfatos e cloretos), biológicas (proliferação de plantas) e mecânicas (choques e sobrecargas).

A deterioração causada por sobrecargas em estruturas de concreto armado pode acontecer por diversas razões, desde uma alteração na utilização da edificação, até circunstâncias incomuns como terremotos ou explosões. Estes danos podem ocorrer ainda durante a fase de execução da obra, com a remoção precoce de formas ou devido ao armazenamento inadequado de materiais e equipamentos (PCA, 2002).

Independentemente da causa, a deterioração do concreto provoca diferentes graus de degradação da rigidez de elementos estruturais. A quantificação da rigidez de elementos deteriorados é um aspecto de grande importância para efeitos de recuperação e reforço das estruturas.

2.5 Ensaios Não Destrutivos

Os Ensaio Não Destrutivos (END) representam um amplo conjunto de técnicas, baseadas principalmente em fenômenos físicos, que permitem uma avaliação rápida e econômica das características físicas e mecânicas dos materiais e das estruturas e que apresentam elevada reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados.

Malhotra e Carino (2004), citam que os END são uma prática comum na avaliação de metais, sendo seu uso rotineiro para a identificação de anomalias. Segundo esses autores, na inspeção de estruturas de concreto, o uso de END é relativamente novo e apresenta um desenvolvimento lento, pois diferentemente do aço, o concreto é um material heterogêneo e demanda cuidados especiais para este tipo de avaliação. Logo, o uso de END para a inspeção e manutenção de estruturas de concreto mostra-se uma ferramenta de grande utilidade, desde que ela seja aplicada por profissional qualificado, utilizando equipamentos de qualidade e seguindo os procedimentos executivos.

Os END também permitem avaliar se o comportamento de uma estrutura é ou não condizente com as funções para as quais foi projetada e permitem um monitoramento contínuo durante toda sua vida útil (MEDINA, 2013). Para Helal, Sofi e Mendis (2015), o propósito geral dos END é determinar a qualidade e a integridade dos materiais e componentes de um elemento estrutural, sem produzir danos ou afetar sua condição de serviço.

Garaygordobil (2003), destaca que os END apresentam uma variedade de técnicas para a verificação de danos em estruturas, permitindo obter informações quanto ao estado de deterioração do elemento.

O ACI (2013) define os END como métodos utilizados para determinar as propriedades do concreto e avaliar as condições reais das construções em geral, como fundações, pontes, edifícios e barragens. As principais razões para se utilizar os END em construções são o controle de qualidade em obras novas, a avaliação de um concreto velho que sofrerá alguma intervenção e garantia da qualidade de reparos.

Shull (2002) ressalta que para a correta escolha de um END, é necessário levar em consideração as propriedades dos materiais envolvidos, possíveis descontinuidades, os processos físicos que governam os métodos de ensaio, o potencial e limitações tecnológicas disponíveis, além de fatores econômicos, ambientais e regulatórios.

No presente trabalho trata-se especificamente dos END para determinação das características dinâmicas de elementos estruturais de concreto armado. Os ensaios dinâmicos são um subgrupo dos END que fornecem informações quanto à velocidade de propagação de som, frequência natural, amortecimento e modos de vibração. Como estes parâmetros estão ligados às propriedades físicas da estrutura (módulo de elasticidade, geometria e densidade), mudanças nessas propriedades refletem no resultado dos ensaios. Assim, é possível utilizar os ensaios dinâmicos para a avaliação de estruturas danificadas, verificando a severidade do dano, sua extensão e localização.

Segundo Breyssea (2010), a qualidade da avaliação das características dinâmicas por meio de END depende basicamente de três fatores:

- a quantidade de ruído na medição;
- a qualidade dos modelos que serão utilizados para a inversão ou identificação da propriedade que se pretende obter;
- a escolha da técnica de medição baseada na finalidade e sensibilidade requerida.

2.6 Modelos em escala reduzida

Segundo Carneiro (1993), para que um modelo reduzido possa representar o elemento real, ou seja, para que os resultados obtidos como o modelo possam ser extrapolados para o elemento real, é preciso que haja semelhança, a começar pela geometria.

Fonseca (2007) utilizou em sua pesquisa pórticos com escala geométrica de 1:3. O autor destaca que a utilização de modelos reduzidos otimiza o uso de ensaios dinâmicos, possibilita a execução de vários modelos e favorece o caráter exploratório do estudo.

Almeida (2010) salienta que a utilização de modelos reduzidos facilitam o manuseio dos corpos de prova e melhoram a qualidade dos resultados dos ensaios dinâmicos, pois as frequências naturais ficam mais nítidas e ocorre uma redução do ruído.

Nobrega (2004) realizou ampla revisão bibliográfica quanto ao uso de modelos com escala reduzida, concluindo que o uso da escala geométrica 1:4 e a redução da dimensão do agregado graúdo do concreto utilizado nos seus experimentos não acarretaram prejuízos significativos ao modelo, uma vez que os experimentos não se baseavam em uma estrutura real que se intencionava reproduzir, mas sim em conhecer o comportamento do material de forma ampla.

2.7 Estudos sobre degradação da rigidez de vigas de concreto armado realizados por outros autores

2.7.1 *Garaygordobil (2003)*

Garaygordobil (2003) realizou a avaliação dinâmica de diversos componentes estruturais em edificações de diferentes tipos e em ambiente de laboratório. Em particular, foram analisadas em laboratório dez vigas de concreto armado (Tipo I e II) na condição de contorno simplesmente apoiada. As vigas do Tipo I tinham 240 cm de comprimento, seção transversal de 30 x 20 cm, armadura longitudinal de tração de 2Ø16.0 mm e longitudinal de compressão de 2Ø8.0 mm, o que corresponde a uma taxa de armadura de 0,83%. Já as vigas do Tipo II tinham 250 cm de comprimento, seção transversal de 30 x 20 cm, armadura longitudinal de tração de 2Ø20.0 mm e longitudinal de compressão de 2Ø8.0 mm, o que corresponde a uma taxa de armadura de 1,21%.

As vigas foram submetidas a um carregamento progressivo em dois estágios. No primeiro estágio as vigas foram carregadas até o início da fissuração. Após isto, as vigas foram reforçadas com laminas de fibra de carbono (CFL) e iniciado o segundo estágio de carregamento, até as vigas alcançarem o colapso. As propriedades dinâmicas das vigas foram avaliadas antes da aplicação do carregamento, após o início da fissuração, após o reparo com CFL e após o colapso.

O estudo mostrou uma importante redução da rigidez após o aumento da carga. Para cargas em torno de 70% da carga de colapso, observou-se uma redução da frequência fundamental superior a 23%. Também foi destacada a importância que deve ser dada ao processo de moldagem, cura e manipulação dos elementos, visando manter a uniformidade das características de todas as vigas.

O autor desenvolveu também um estudo sobre a influência da posição do acelerômetro na identificação das frequências naturais. Este estudo consistiu na observação da resposta em frequência para um acelerômetro posicionado em diferentes pontos da viga. Concluiu-se que qualquer posição de instalação do acelerômetro ao longo da viga é apropriada para a identificação da frequência fundamental.

2.7.2 *Almeida (2005)*

Almeida (2005) avaliou a integridade de vigas de concreto armado de tamanho reduzido submetidas a uma degradação mecânica progressiva. Foram analisadas três vigas de

concreto armado com 106 cm de comprimento, 6 cm de largura e 12 cm de altura, com armadura longitudinal de tração de 2 Ø 6.3 mm e longitudinal de compressão de 2 Ø 4.2 mm.

Os elementos foram submetidos a quatro estágios progressivos de carga-descarga até atingir o colapso. Após cada ciclo, as características dinâmicas das vigas foram avaliadas na condição de apoio livre-livre.

Observou-se uma redução da frequência fundamental com o aumento da carga atuante sobre os elementos. Para o último estágio de carga, a rigidez à flexão (EI) residual média das vigas foi de 63,31% da rigidez inicial dos elementos.

O autor concluiu que um estudo baseado na variação da rigidez representa uma ferramenta adequada para avaliar a integridade estrutural de elementos de concreto armado submetido à flexão simples.

2.7.3 Amancio (2016)

No trabalho realizado por Amancio (2016) foi avaliada a integridade estrutural de vigas de concreto armado a partir da variação de suas propriedades modais. No estudo foram analisadas duas vigas de concreto armado com 350 cm de comprimento, 25 cm de largura e 35 cm de altura, com mesma taxa de armadura, porém com dois arranjos diferentes, 2Ø16.0 mm e 8Ø8.0 mm.

Os elementos foram submetidos a ciclos progressivos de carga-descarga até atingir o colapso. Após cada ciclo, as características dinâmicas das vigas foram avaliadas a fim de se obter o nível de degradação do elemento.

Foi observada uma redução da frequência de ressonância com o aumento do processo de fissuração dos elementos e foi detectado que o amortecimento apresentou uma variação não linear à medida que a rigidez à flexão das vigas foi sendo reduzida.

Concluiu-se que a frequência de ressonância é um parâmetro adequado e confiável para a avaliação da degradação de elementos estruturais de concreto armado por se conseguir estabelecer uma relação entre este parâmetro e a integridade do elemento avaliado. Por outro lado observou-se que o amortecimento não apresentou comportamento similar, não sendo recomendado seu uso para este tipo de avaliação.

2.7.4 *Salgado, Ayala e Rangel (2016)*

Salgado, Ayala e Rangel (2016) desenvolveram um trabalho que teve por objetivo avaliar a resposta dinâmica de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de matriz poliéster (CFRP). Foram analisadas três vigas (CI, CII e CIII) de concreto armado com 585 cm de comprimento, 12 cm de largura e 37 cm de altura, com mesma taxa de armadura. A viga CI foi usada como referência, a viga CII foi reforçada com três lâminas de CFRP e a CIII com sete lâminas.

A degradação dos elementos foi imposta por meio da aplicação a um carregamento progressivo até alcançar o colapso. As propriedades dinâmicas das vigas foram avaliadas antes e após a aplicação da degradação mecânica.

Observou-se que a carga de ruptura do modelo CII teve um aumento de 11,15% e do modelo CIII de 20,30% quando comparados com o modelo CI. Foram identificadas as cinco primeiras frequências naturais, os modos de vibração correspondentes e o amortecimento.

Também foram desenvolvidos modelos numéricos para simular o comportamento dos elementos antes e após a aplicação da degradação mecânica. O Método Modificado de Chistides e Barr foi escolhido para simulação do dano. Assim, na zona danificada, o momento de inércia foi considerado constante e o módulo de elasticidade variável.

Concluiu-se que a adição das lâminas de CFRP nas vigas de concreto armado não causou alterações significativas na resposta dinâmica dos elementos, mesmo com o significativo aumento da carga de colapso.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentadas as características dos modelos utilizados no programa experimental, as propriedades dos materiais, as normas técnicas aplicadas, a descrição da instrumentação e dos equipamentos utilizados e os procedimentos para execução dos ensaios estático e de determinação das propriedades dinâmicas.

3.1 Características dos modelos experimentais

Os modelos experimentais desenvolvidos para a realização do presente trabalho são vigas de concreto armado com dimensões reduzidas. Essas vigas foram identificadas pela letra **T** (símbolo de traço), um número que faz referência a relação água/cimento adotada no traço, da letra **A** (símbolo de aço) e um número que indica o diâmetro da armadura de tração utilizada no modelo (Figura 3.1).

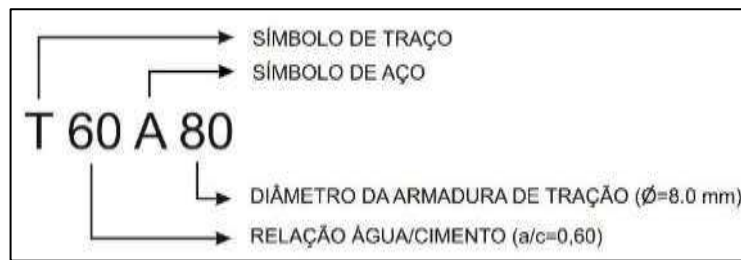


Figura 3.1 – Identificação adotada para os modelos de viga.

Para o desenvolvimento do programa experimental foi estabelecida uma variação das características das vigas de concreto armado, em função da combinação de quatro valores da relação água/cimento (a/c) para o traço e de três valores da taxa de armadura, o que corresponde a um delineamento fatorial 4×3 , que gerou 12 modelos distintos.

Para buscar uma melhor representatividade dos resultados, foram estabelecidas três repetições de cada modelo, o que levou a um total de 36 vigas. Na montagem do experimento foram adotadas parcelas subdivididas com blocos casualizados. Na Tabela 3.1 apresenta-se a identificação dos modelos em função da variação da relação a/c e na Tabela 3.2 a identificação em função da variação da taxa de armadura. Na Tabela 3.3 apresenta-se a identificação do conjunto de modelos considerados.

Tabela 3.1 – Identificação dos modelos em função da variação da relação a/c .

Série	a/c
T45	0,45
T60	0,60
T70	0,70
T80	0,80

Tabela 3.2 – Identificação dos modelos em função da variação da taxa de armadura.

Série	\varnothing (mm)	Taxa (%)
A50	5.0	0,41
A63	6.3	0,56
A80	8.0	0,79

Tabela 3.3 – Identificação do conjunto de modelos experimentais de viga considerados.

Modelo	Características		
	a/c	As	As'
T45A50	0,45	2Ø 5.0	2Ø 4.2
T45A63	0,45	2Ø 6.3	2Ø 4.2
T45A80	0,45	2Ø 8.0	2Ø 4.2
T60A50	0,60	2Ø 5.0	2Ø 4.2
T60A63	0,60	2Ø 6.3	2Ø 4.2
T60A80	0,60	2Ø 8.0	2Ø 4.2
T70A50	0,70	2Ø 5.0	2Ø 4.2
T70A63	0,70	2Ø 6.3	2Ø 4.2
T70A80	0,70	2Ø 8.0	2Ø 4.2
T80A50	0,80	2Ø 5.0	2Ø 4.2
T80A63	0,80	2Ø 6.3	2Ø 4.2
T80A80	0,80	2Ø 8.0	2Ø 4.2

Notas:

- 1) Para cada modelo foram confeccionados três exemplares identificados como R1, R2 e R3.
- 2) Diâmetros em milímetros.

Os modelos experimentais possuem dimensões nominais de 9x18x180 cm, armadura longitudinal de tração composta por duas barras de diâmetro variável conforme identificação da viga e porta-estribos composto por duas barras de aço CA-60 com diâmetro Ø4.2 mm. Para a armadura transversal foram utilizados estribos de aço CA-60 com diâmetro Ø4.2 mm, espaçados a cada 9,0 cm e cobrimento da armadura de 1,5 cm. Na Figura 3.2 apresenta-se o detalhamento da armadura dos modelos experimentais.

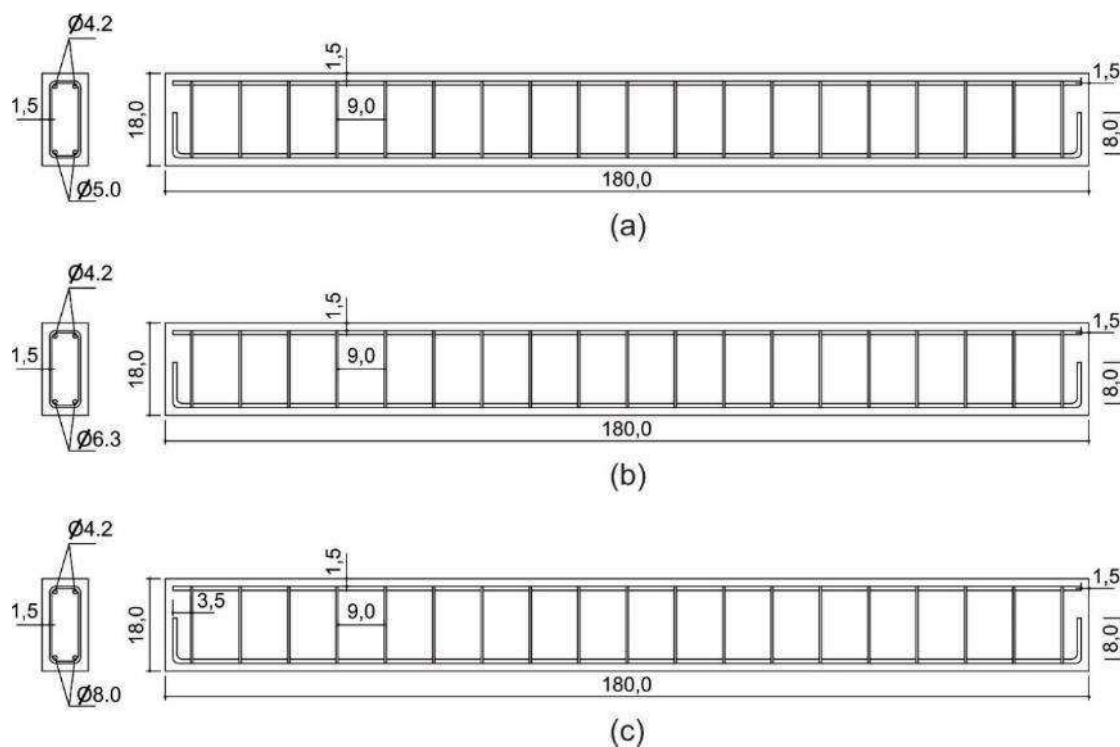


Figura 3.2 – Detalhamento da armadura dos modelos experimentais:

a) Tipo A50; b) Tipo A63 e c) Tipo A80.

3.2 Características dos materiais

3.2.1 Cimento

Para confecção do concreto dos modelos de viga foi utilizado o cimento CIII-40 da Holcim, cujas propriedades foram determinadas a partir de ensaios de caracterização, conforme mostrado na Tabela 3.4. Na Tabela 3.5 apresenta-se a composição química do cimento, fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento.

Característica	Valor	Método de ensaio
Massa Específica (g/cm ³)	2,92	NBR NM 23:2001
Área Específica (m ² /kg)	406,83	NBR 16372:2015
Índice de Finura (%)	0,26	NBR 11579:2012
Consistência Normal (%)	31,80	NBR NM 43:2003
Tempo de Pega (h:min)	Início	02:55
	Fim	02:10
Expansibilidade (%)	Frio	0,00
	Quente	0,00
Resistência à Compressão (MPa)	3	22,78
	7	31,46
	28	47,42

Tabela 3.5 – Composição química do cimento (HOLCIM, 2014).

Composição química		Teor (% em massa)	Método de ensaio
Óxido de cálcio	CaO	54,20	NBR 14656:2001
Dióxido de silício	SiO ₂	26,13	NBR 14656:2001
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	8,22	NBR 14656:2001
Óxido de magnésio	MgO	3,20	NBR 14656:2001
Anidro sulfúrico	SO ₃	2,65	NBR 14656:2001
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,24	NBR 14656:2001
Anidro carbônico	CO ₂	2,19	NBR NM 20:2012
Óxido de potássio	K ₂ O	0,61	NBR 14656:2001
Perda ao fogo	PF 1000°C	3,08	NBR NM 18:2012
Resíduo Insolúvel	R.I.	1,13	NBR NM 15:2012

3.2.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural utilizado na produção do concreto foi uma areia quartzosa proveniente do Areal Naque, situado na cidade de Belo Oriente/MG. Na Tabela 3.6 são apresentadas as propriedades do material.

Tabela 3.6 – Características do agregado miúdo natural.

Característica	Peneira (mm)	Massa (%)		Método de ensaio
		Retida	Acumulada	
Granulometria	4,8	0,15	0,15	NBR NM 248:2003
	2,4	1,78	1,93	
	1,2	6,14	8,08	
	0,6	25,39	33,47	
	0,3	49,51	82,98	
	0,15	15,45	98,43	
	Fundo	1,57	100,00	
Dimensão Máxima Característica		2,4mm		NBR NM 248:2003
Módulo de finura		2,25		NBR NM 248:2003
Massa Específica		2,61g/cm ³		NBR NM 52:2009
Absorção de água		0,26%		NBR NM 30:2001
Material pulverulento		1,10%		NBR NM 46:2003

3.2.3 Agregado miúdo artificial

O agregado miúdo artificial utilizado na produção do concreto foi um pó de pedra de origem gnáissica proveniente da Pedreira Um Valemix, da cidade de Timóteo/MG. Na Tabela 3.7 apresentam-se as características do material.

Tabela 3.7 – Características do agregado miúdo artificial.

Característica	Peneira (mm)	Massa (%)		Método de ensaio
		Retida	Acumulada	
Granulometria	6,3	0,09	0,09	NBR NM 248:2003
	4,8	0,39	0,48	
	2,4	10,36	10,84	
	1,2	18,17	29,01	
	0,6	19,13	48,14	
	0,3	20,70	68,84	
	0,15	18,44	87,28	
	Fundo	12,72	100,00	
Dimensão Máxima Característica		4,8mm		NBR NM 248:2003
Módulo de finura		2,45		NBR NM 248:2003
Massa Específica		2,70g/cm ³		NBR NM 52:2009
Absorção de água		0,30%		NBR NM 30:2001
Material pulverulento		5,04%		NBR NM 46:2003

3.2.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na produção do concreto foi uma brita gnáissica nº1 proveniente da Pedreira Um Valemix, da cidade de Timóteo/MG. Na Tabela 3.8 apresentam-se as características do material.

Tabela 3.8 – Características do agregado graúdo.

Característica	Peneira (mm)	Massa (%)		Método de ensaio
		Retida	Acumulada	
Granulometria	12,5	0,00	0,00	NBR NM 248:2003
	9,5	856,40	710,00	
	6,3	1276,00	1277,00	
	4,8	1174,00	1082,00	
	2,4	1156,00	1207,00	
	Fundo	402,00	500,00	
Dimensão Máxima Característica		12,5mm		NBR NM 248:2003
Módulo de finura		2,21		NBR NM 248:2003
Massa Específica		2,66g/cm ³		NBR NM 52:2009
Absorção de água		0,61%		NBR NM 30:2001
Material pulverulento		1,14%		NBR NM 46:2003

3.2.5 Aditivo

Na produção do concreto foi utilizado o aditivo plastificante multifuncional Muraplast FK 830 da MC-Bauchemie. Este aditivo age como agente dispersor das partículas de cimento, reduz a tensão superficial da água na mistura e por consequência, melhora a distribuição das partículas de cimento e do agregado, permitindo-se obter uma melhor

coesão e trabalhabilidade (MC-BAUCHEMIE, 2014). Na Tabela 3.9 apresentam-se as principais características físicas, químicas e de dosagem do aditivo utilizado.

Tabela 3.9 – Características do aditivo (MC-BAUCHEMIE, 2014).

Estado físico	Cor	ph	Densidade	Dosagem
Líquido	Castanho escuro	6,3	1,10 g/cm ³	0,2 a 1,0% do peso de cimento

3.2.6 Água

Para produção do concreto foi utilizada água potável, isenta de impurezas e materiais em suspensão, proveniente de poço profundo de propriedade da Concreteira Pedreira Um Valemix, situado na cidade de Santana do Paraíso/MG.

3.2.7 Aço

Na produção das vigas foram utilizados aços CA-50 e CA-60 da ArcelorMittal. Para os porta-estribos e estribos foram utilizadas barras com diâmetro Ø4.2 mm. Para as armaduras longitudinais de tração foram adotadas barras de 5.0, 6.3 e 8.0 mm, de acordo com a identificação do modelo de viga. Na Tabela 3.10 apresentam-se as características mecânicas dos aços utilizados, determinadas a partir de ensaios de caracterização.

Tabela 3.10 – Características mecânicas dos aços.

Diâmetro	Tipo	Limite de escoamento			Limite de resistência			Método de ensaio
		f _y (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	f _u (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	
4.2	CA-60	752	5,13	0,68	771	5,31	0,69	NBR ISO 6892-1:2013
5.0	CA-60	689	25,56	3,71	729	14,99	2,06	
6.3	CA-50	623	13,50	2,17	721	13,40	1,86	
8.0	CA-50	736	13,23	1,80	832	6,66	0,80	

Notas:

1) DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação

2) Diâmetros em milímetros.

3.3 Características dos concretos produzidos

Os concretos foram produzidos de acordo com a ABNT NBR 12655:2015, sendo adotados traços comerciais amplamente utilizados no mercado, desenvolvidos pela Pedreira Um Valemix, conforme mostrado na Tabela 3.11. Os concretos foram preparados em central automatizada, onde todos os materiais foram dosados em massa e misturados em caminhão betoneira (Figura 3.3).

Tabela 3.11 – Traços adotados (kg/m³).

Série	a/c	Cimento	Areia Nat.	Areia Art.	Brita 01	Água	Aditivo	Traço
T45	0,45	458	505	168	1013	206	0,50%	1,00 : 1,10 : 0,37 : 2,21 : 0,45
T60	0,60	350	591	197	981	210	0,50%	1,00 : 1,69 : 0,56 : 2,80 : 0,60
T70	0,70	306	626	209	964	214	0,50%	1,00 : 2,04 : 0,68 : 3,15 : 0,70
T80	0,80	270	656	219	950	216	0,50%	1,00 : 2,43 : 0,81 : 3,52 : 0,80



Figura 3.3 – Aspecto geral da produção do concreto em caminhão betoneira.

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade secante do concreto foram avaliados segundo as normas ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 8522:2008 respectivamente. Na Tabela 3.12, Figura 3.4 e Figura 3.5 apresenta-se a evolução dessas características dos concretos produzidos. A idade de 180 dias corresponde à data de início dos ensaios de flexão.

Tabela 3.12 Evolução da resistência à compressão e módulo de elasticidade secante.

Série	Idade (dias)	Resistência à compressão			Módulo de elasticidade		
		f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	E_{cs} (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
T45	7	35,62	0,50	1,41	22,38	0,34	1,50
	14	43,33	1,36	3,13	24,91	0,47	1,87
	180	64,83	2,26	3,48	30,49	0,60	1,97
T60	7	25,21	0,84	3,35	20,30	0,68	3,33
	14	31,85	0,68	2,15	21,53	0,33	1,51
	180	50,22	1,39	2,77	26,88	0,71	2,64
T70	7	18,10	0,28	1,56	17,50	0,57	3,26
	14	23,94	0,39	1,61	19,57	0,32	1,65
	180	36,70	1,30	3,54	24,76	1,08	4,34
T80	7	14,75	0,34	2,30	15,83	0,11	0,70
	14	18,77	0,44	2,35	17,35	0,44	2,55
	180	30,43	0,68	2,24	22,84	0,19	0,84

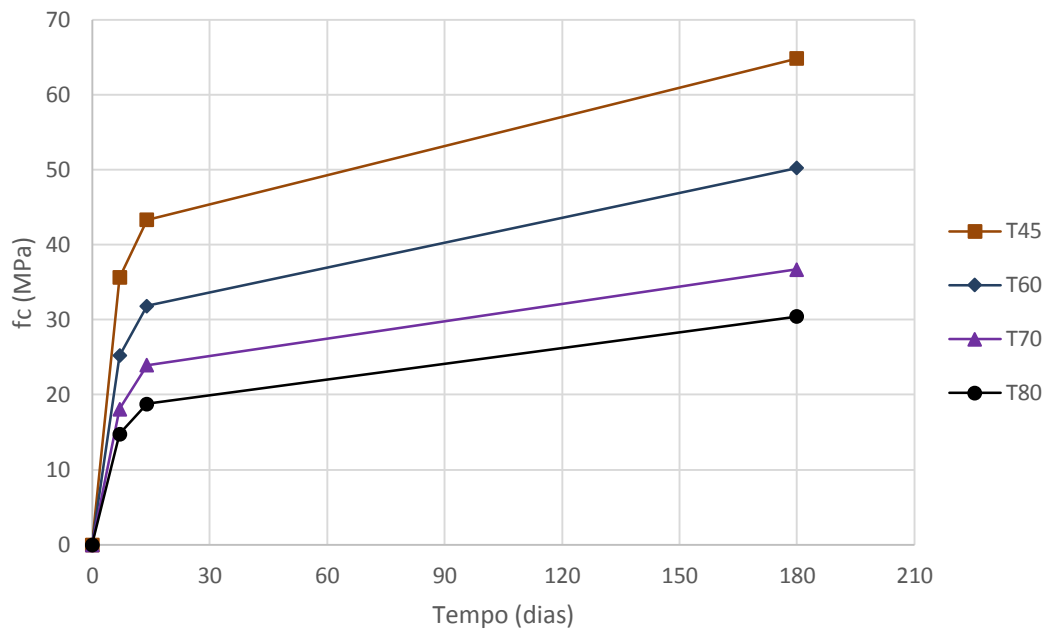


Figura 3.4 – Evolução da resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo.

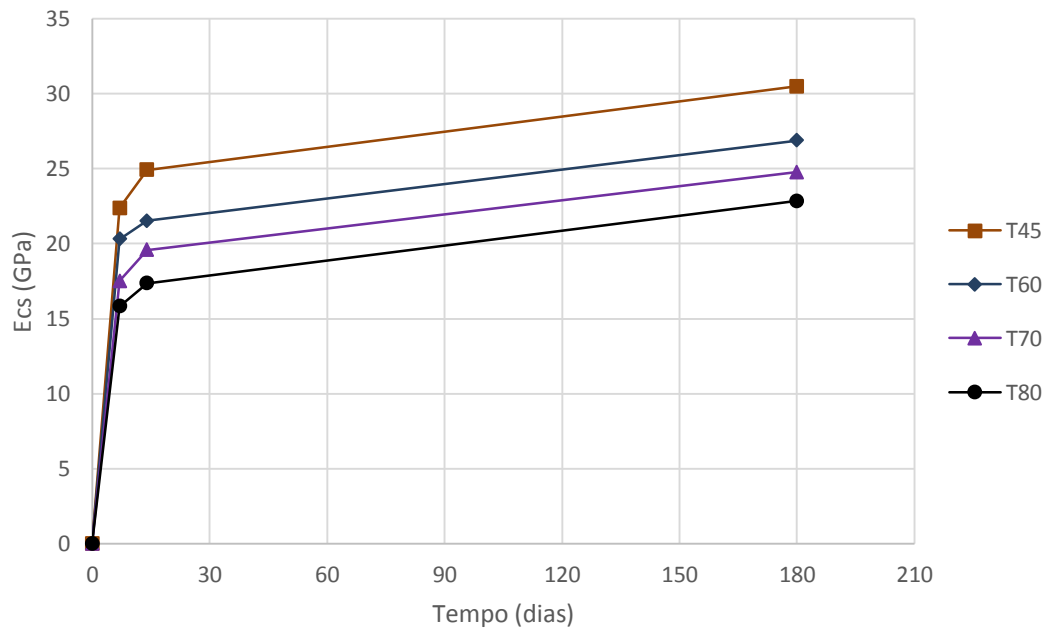


Figura 3.5 – Evolução do módulo de elasticidade secante dos concretos ao longo do tempo.

A resistência à tração do concreto foi avaliada por meio da compressão diametral, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7222:2011 para uma idade de 180 dias, que corresponde à data de início dos ensaios de flexão. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Resistência à tração por compressão diametral.

Série	Idade (dias)	Resistência à tração		
		$f_{ct,D}$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
T45	180	5,00	0,34	6,71
T60		4,46	0,29	6,60
T70		3,39	0,43	12,75
T80		3,18	0,24	7,48

3.4 Produção dos modelos experimentais

Para produção dos modelos de vigas foram confeccionadas 18 formas de madeira compensada plastificada. Em seguida, foram produzidos três tipos de armadura, conforme mostrado na Figura 3.2, com 12 unidades de cada configuração. Antes da concretagem as armaduras e formas foram limpas e foi aplicado um desmoldante de base mineral nas formas. Também foram utilizados espaçadores plásticos modelo S (circular universal) nas armaduras, a fim de garantir o adequado cobrimento de concreto.

Para a moldagem das vigas, foram desprezados os primeiros 0,50 m³ de concreto do caminhão betoneira. O concreto foi lançado nas formas, adensado com vibrador de imersão e o acabamento superficial foi realizado com desempenadeira de aço. Em seguida os modelos foram identificados com uma etiqueta. Durante as primeiras 24 horas após a moldagem, as vigas foram mantidas umedecidas e cobertas por uma lona plástica. Passado este período, os elementos foram desformados e colocados em um tanque, no qual foi realizada cura por imersão durante 28 dias. Na Figuras de 3.6 a 3.8 apresentam-se alguns aspectos da produção dos modelos de viga.



Figura 3.6 – Preparação das armaduras e das formas: (a) limpeza das armaduras; (b) aspecto geral das formas.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Moldagem dos modelos de viga: (a) slump test; (b) vigas concretadas.



(a)



(b)

Figura 3.8 – Aspecto geral dos modelos produzidos: (a) vigas desmoldadas; (b) vigas em processo de cura.

3.5 Análises numéricas e analíticas preliminares

Para estimar a carga de fissuração e a carga de colapso dos modelos experimentais foi utilizado o programa computacional Deforme v3.02-c1, destinado à análise não linear de elementos estruturais de concreto armado, desenvolvido por Paes e Veríssimo (2015) no âmbito do Grupo de Pesquisa de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. No Anexo 1 apresenta-se um Guia de Operação do Deforme v3.02-c1, no qual são apresentadas as características gerais e as opções para realização da análise não-linear de elementos de concreto armado. Informações detalhadas a respeito da metodologia de cálculo implementada e do funcionamento do programa Deforme podem ser encontrados no trabalho de Paes (1994).

A estimativa da frequência fundamental de vibração dos modelos de viga para uma condição biapojada, foi obtida analiticamente por meio da Expressão 2.8 e numericamente com o auxílio do programa computacional SAP2000.

3.6 Ensaio de flexão

3.6.1 Equipamentos utilizados

Na realização do ensaio de flexão foram utilizados os equipamentos indicados na Tabela 3.14. Nessa tabela são indicados os fabricantes, modelos e configurações.

Tabela 3.14 – Equipamentos utilizados no ensaio estático.

Equipamento	Descrição
	Máquina universal de ensaios, da EMIC, modelo DL60000, com capacidade de aplicação de 60tf.
	Transdutor de deslocamento, da RDP, modelo LDC 2000A, com curso útil de 100mm.
	Célula de carga, da HBM, modelo C6A, com capacidade nominal de 200kN.
	Extensômetro, da Kyowa, modelo KC-70-120-A1-11, configurado em 1/4 de ponte ligado a 4 fios.
	SAD, da HBM, modelos QuantumX MX1615 e MX840A, configurados com uma taxa de amostragem de amostragem de 5Hz.

Tabela 3.14 – Equipamentos utilizados no ensaio estático (continuação).



Microcomputador, da Dell, utilizado para controlar a máquina universal de ensaios por meio do software TESC.



Notebook, da Sony Vaio, utilizado para controlar o SAD da HBM.

3.6.2 Instrumentação e procedimento de ensaio

A fim de promover a degradação da rigidez das vigas de concreto armado, decidiu-se submeter os modelos experimentais a um ensaio de flexão até alcançar uma carga próxima ao colapso, cujo esquema de carregamento é mostrado na Figura 3.9.

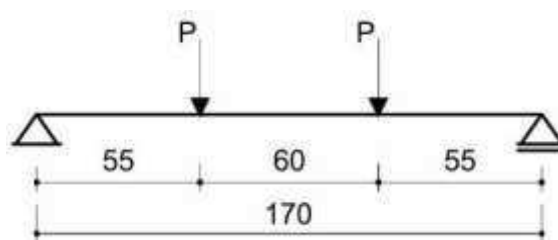


Figura 3.9 – Esquema de carregamento para o ensaio de flexão.

Para aplicação do carregamento, os elementos foram posicionados no eixo de uma máquina universal servo controlada, sobre uma viga de reação de aço previamente instalada, conforme mostrado na Figura 3.10. O dano foi promovido pela ação do atuador, aplicando um carregamento monotônico em dois pontos, com controle de deslocamentos, a uma taxa de 0,02 mm/s.



Figura 3.10 – Montagem geral do ensaio de flexão.

A configuração utilizada no ensaio foi do tipo Stuttgart (Figura 3.11), ficando os pontos de aplicação de carga a 55,0 cm da linha de eixo do apoio. Foram utilizados 4 transdutores de deslocamento (DT1 a DT4) instalados em diferentes posições. O DT1 e DT3 foram posicionados a 55,0 cm dos eixos de apoio e o DT2 e DT4 no eixo central da peça. No centro da peça, em sua parte superior, foi instalado um extensômetro (SG) para monitoramento das deformações no concreto. Sobre o atuador, foi posicionada uma célula de carga para obtenção do carregamento ao longo do ensaio. Na Figura 3.11 indica-se o esquema geral de instrumentação utilizado no ensaio.

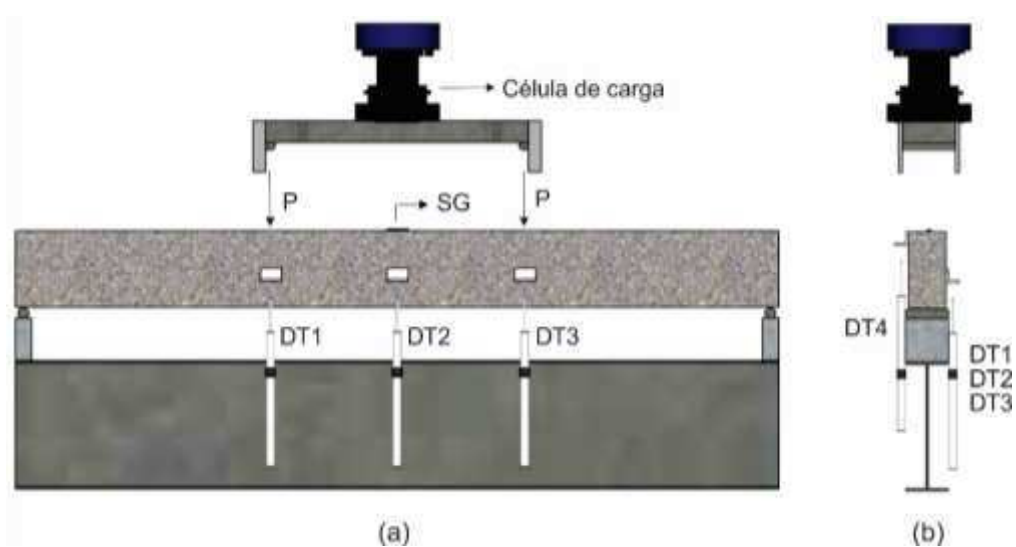


Figura 3.11 – Montagem do ensaio de flexão: a) vista frontal; b) vista lateral.

As vigas foram submetidas a estágios de carga progressivos, com medição dos deslocamentos. Após alcançar um determinado estágio de carga, o atuador era suspenso para

reestabelecer a condição biapoiada da viga. Este procedimento causou a recuperação da parcela elástica do deslocamento, ficando acumulada na viga a parcela inelástica. Na Figura 3.12 apresenta-se um aspecto geral da montagem do ensaio de flexão.



Figura 3.12 – Configuração do ensaio: (a) vista lateral; (b) vista frontal.

Os dados de carregamento, deslocamentos e deformação foram obtidos com auxílio de um SAD da HBM, no qual foram conectados uma célula de carga de 200kN, quatro transdutores de deslocamento com curso de 100mm e um extensômetro elétrico. A comunicação para aquisição dos dados foi realizada com auxílio do programa CatmanEasy v3.4. Na Figura 3.13 apresenta-se o aspecto geral de um conjunto de vigas após a realização dos ensaios.



Figura 3.13 – Parte do conjunto das vigas ensaiadas.

As fissuras do concreto foram registradas para cada estágio de carga a que o modelo foi submetido. Na Figura 3.14 mostra-se o aspecto final de três exemplares de um mesmo modelo de viga (mesmo traço e taxa de armadura) após a execução do ensaio de flexão.



Figura 3.14 – Fissuração em conjunto de vigas.

Na Figura 3.15 mostra-se um Diagrama Carga-Deslocamento dos ensaios piloto de flexão realizados, para o qual foram seis estágios de carga progressivos. A linha envoltória indicada no diagrama da Figura 3.15 representa a curva típica dos ensaios de flexão.

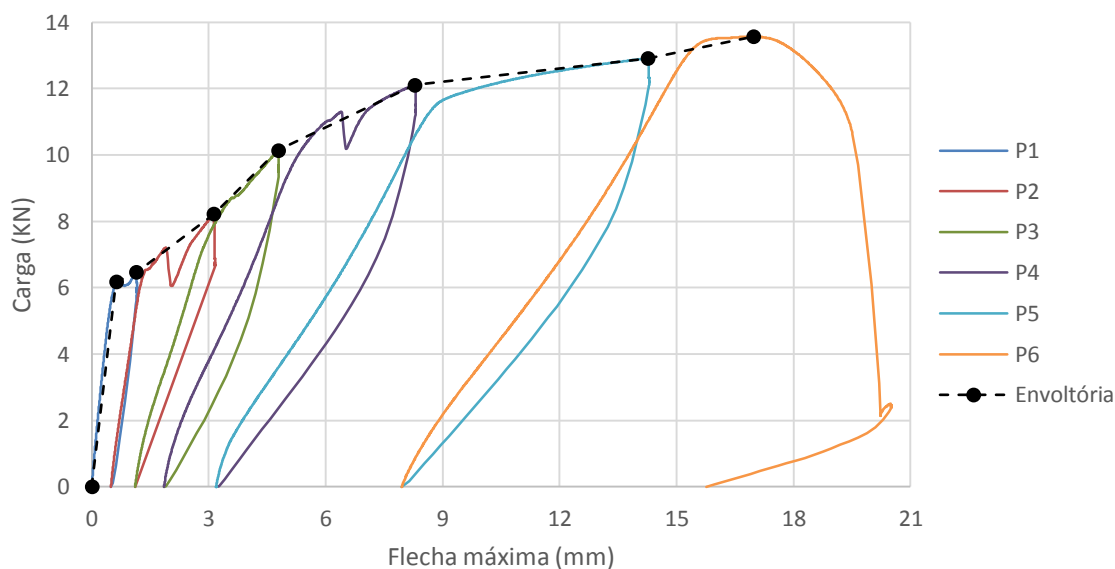


Figura 3.15 – Diagrama Carga-Deslocamento típico dos ensaios de flexão.

3.7 Ensaio para determinação das características dinâmicas

3.7.1 Equipamentos utilizados

Na realização do ensaio para determinação das características dinâmicas foram utilizados os equipamentos indicados na Tabela 3.15. Nessa tabela são indicados os fabricantes, modelos e configurações.

Tabela 3.15 – Equipamentos utilizado no ensaio para determinação das características dinâmicas.

Equipamento	Descrição
	Acelerômetro Piezoelétrico unidirecional, da PCB Piezotronics, modelo 353B33, fixado com pasta de cera de abelha com óleo mineral.
	Martelo de impacto, da PCB Piezotronics, modelo 086D05, montado com ponta de borracha.
	SAD, da National Instruments, modelos eDAQ-9178 e NI-9234, configurados com uma taxa de amostragem de 1000Hz.
	Notebook, da Asus, utilizado para controlar o SAD da National Instruments.

3.7.2 Instrumentação e procedimento de ensaio

Para obtenção das características dinâmicas foi utilizado o SAD modular da *Nacional Instruments (NI)*, dotado de um rack e um módulo de entrada analógica para conexão do martelo e do acelerômetro (Figura 3.16). A comunicação para aquisição dos dados foi realizada por meio do *Virtual Instrument (VI)* desenvolvido no software Labview v2010.

Na Figura 3.17 apresenta-se o esquema de montagem do ensaio para obtenção das características dinâmicas.



Figura 3.16 – Instrumentação do ensaio para determinação das características dinâmicas:

(a) Acelerômetro unidirecional; (b) Rack e módulo analógico NI.

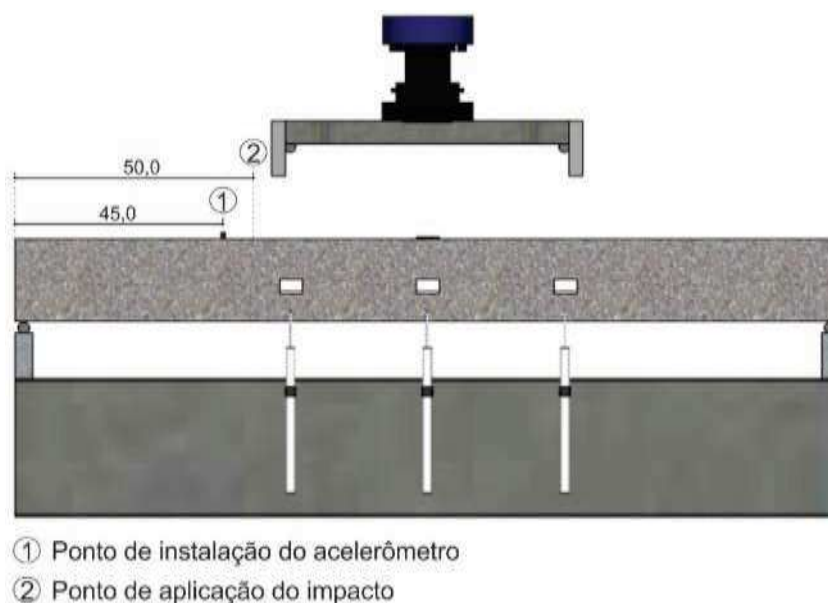


Figura 3.17 – Montagem do ensaio para determinação das propriedades dinâmicas.

Após alcançar um determinado estágio de carga durante a realização do ensaio de flexão, o atuador da máquina universal era suspenso e aplicado um golpe na viga com o martelo instrumentado no ponto 2 indicado na Figura 3.17, a fim de se obter a frequência fundamental correspondente àquele estágio de carga (Figura 3.18). O acelerômetro foi instalado no ponto 1 indicado na Figura 3.17, no qual permaneceu durante toda a realização do ensaio de flexão.



Figura 3.18 – Aplicação de impacto para obtenção da frequência fundamental.

Para a determinação da frequência fundamental para cada estágio de carga foi utilizado um programa computacional para processamento de sinais, que foi implementado sobre o software Labview v2010 (Figura 3.19). Posteriormente, os sinais obtidos no domínio do tempo foram processados com o auxílio do programa MatLab R2015a para obtenção das frequências naturais (Figura 3.20).

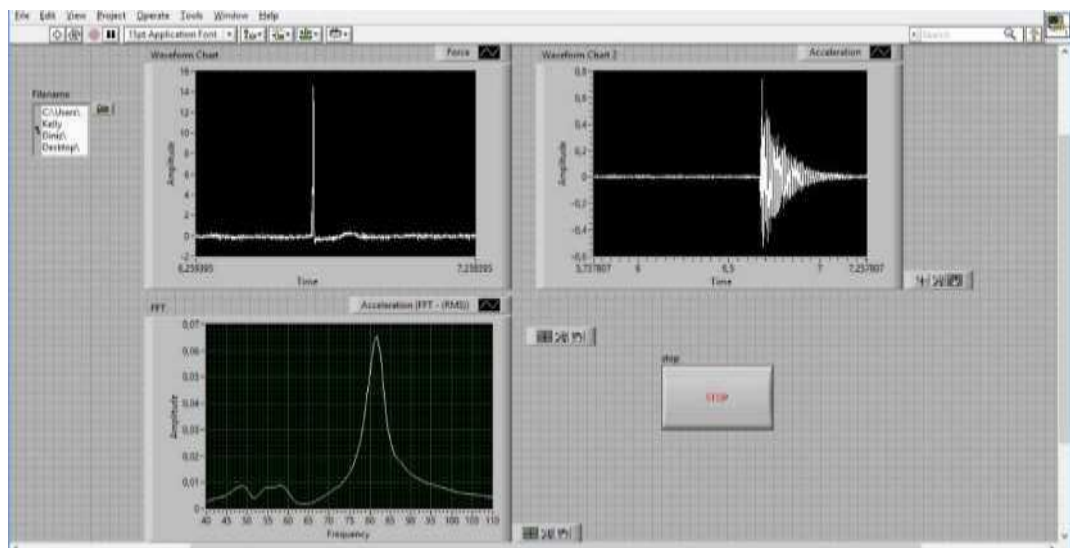


Figura 3.19 – Tela do VI para leitura dos dados de vibração obtidos via Labview.

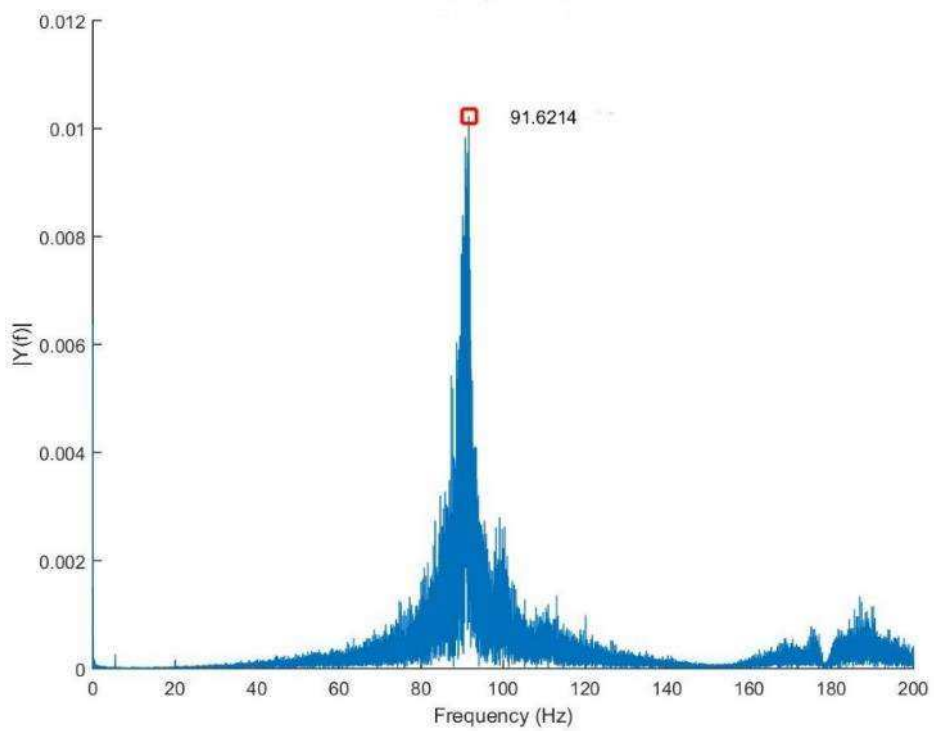


Figura 3.20 – Frequência natural fundamental obtida com auxílio do Matlab.

Tendo em vista que as condições de contorno dos modelos de viga são bem definidas e se aproximam de vínculos perfeitos (apoiado-apoiado), a frequência fundamental pode ser estimada por meio da Expressão 2.7. Conhecida a frequência fundamental, para se estimar a rigidez (EI) para cada estágio de carga, pode-se lançar mão de uma análise inversa, por meio da Expressão 2.8.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações preliminares

Neste Capítulo, inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de flexão e dos ensaios de determinação das características dinâmicas para os modelos experimentais de viga para os quais foi utilizado um mesmo traço de concreto (série T60) e a variação da taxa de armadura (séries A50, A63 e A80). O conjunto de resultados referente a todos os modelos ensaiados são apresentados no Apêndice A.

Os resultados referentes à série T60 com variação da taxa de armadura (séries A50, A63 e A80) são representativos do comportamento observado no conjunto de modelos de viga ensaiados. Com base nesses resultados pode-se observar o comportamento da viga à flexão até alcançar o colapso, a degradação da rigidez da viga (EI) ao longo da aplicação do carregamento e a estimativa da flecha máxima feita com base nos valores da rigidez (EI) calculados a partir dos ensaios.

Na sequência é apresentado um estudo do comportamento de vigas com um mesmo traço de concreto sujeitas à variação da taxa de armadura e um estudo de vigas sujeitas à variação das características mecânicas do concreto, mantendo-se constante a taxa de armadura. Em ambos estudos procura-se avaliar o potencial de uso das características dinâmicas para estimar a degradação da rigidez da viga (EI) ao longo da aplicação do carregamento.

4.2 Estimativa de flecha e degradação da rigidez de vigas de concreto armado

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de flexão e da degradação da rigidez (EI) ao longo da aplicação do carregamento para os modelos experimentais de viga da série T60 e sujeitos à variação de armadura (séries A50, A63 e A80).

Para o modelo T60A50 apresenta-se de forma detalhada o procedimento para estimativa da flecha máxima a partir da rigidez (EI) calculada com base nas características dinâmicas. Para os demais modelos da série T60 (T60A63 e T60A80) também são apresentados os Diagramas Carga-Flecha elaborados a partir das flechas estimadas com base nas características dinâmicas e do modelo analítico proposto por Branson. Ao final apresenta-se uma discussão acerca do comportamento observado em toda a série T60.

Para os demais modelos ensaiados no âmbito do presente trabalho, observou-se que o comportamento segue a mesma tendência verificada para a série T60. Portanto, o conjunto de resultados dos modelos ensaiados é apresentado no Apêndice A.

4.2.1 Modelos T60A50

Os ensaios de flexão dos modelos T60A50 foram executados conforme descrito no Item 3.7, a partir dos quais foi obtido o diagrama da Figura 4.1. Cada ponto desse diagrama representa um estágio de carga, para a qual foi obtida a flecha máxima da viga no centro do vão e a frequência fundamental de vibração do elemento (f_0).

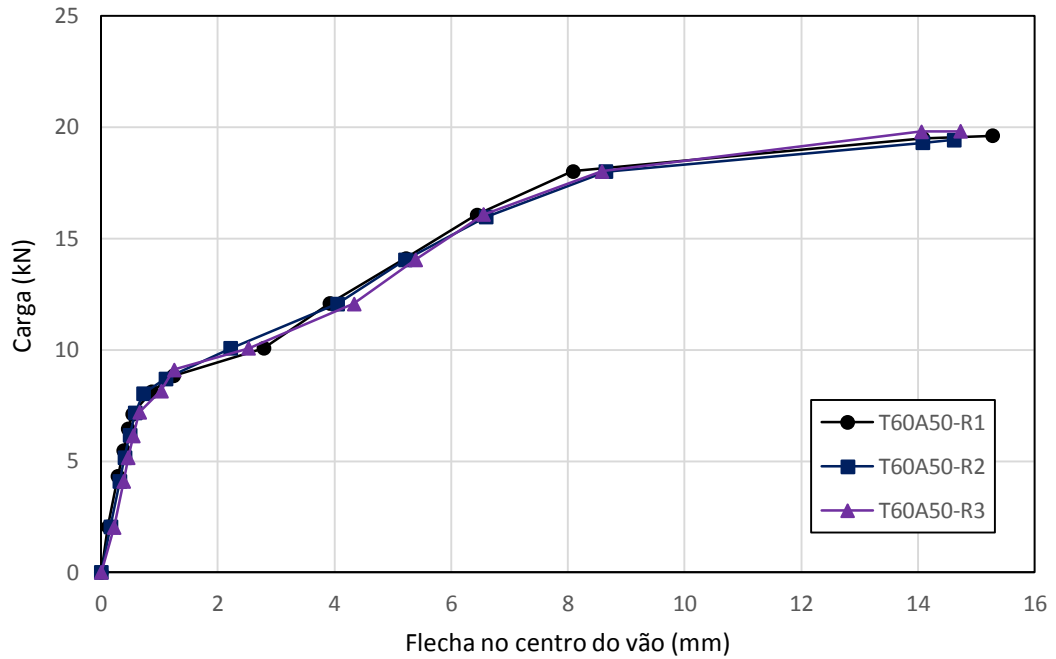


Figura 4.1 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A50.

Para cada estágio de carga, no qual se obteve também a frequência fundamental de vibração (f_0), foi calculada a rigidez da viga (EI), por meio da Expressão 2.8, o que permitiu obter as curvas de degradação da rigidez ao longo da aplicação do carregamento (Figura 4.2). Na Figura 4.3 apresenta-se a degradação da rigidez em termos percentuais.

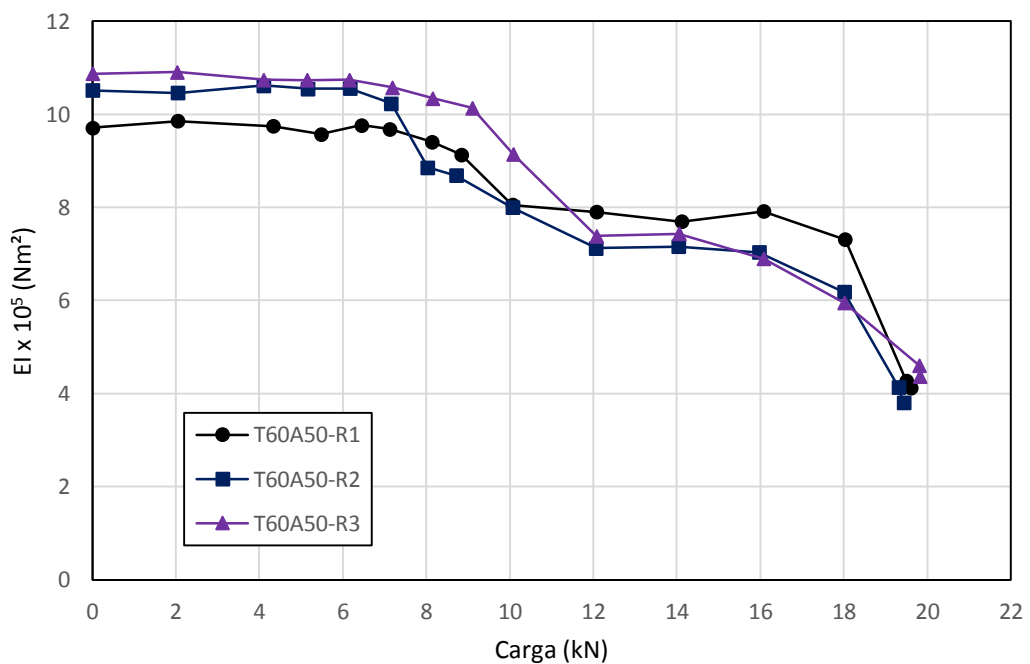


Figura 4.2 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A50.

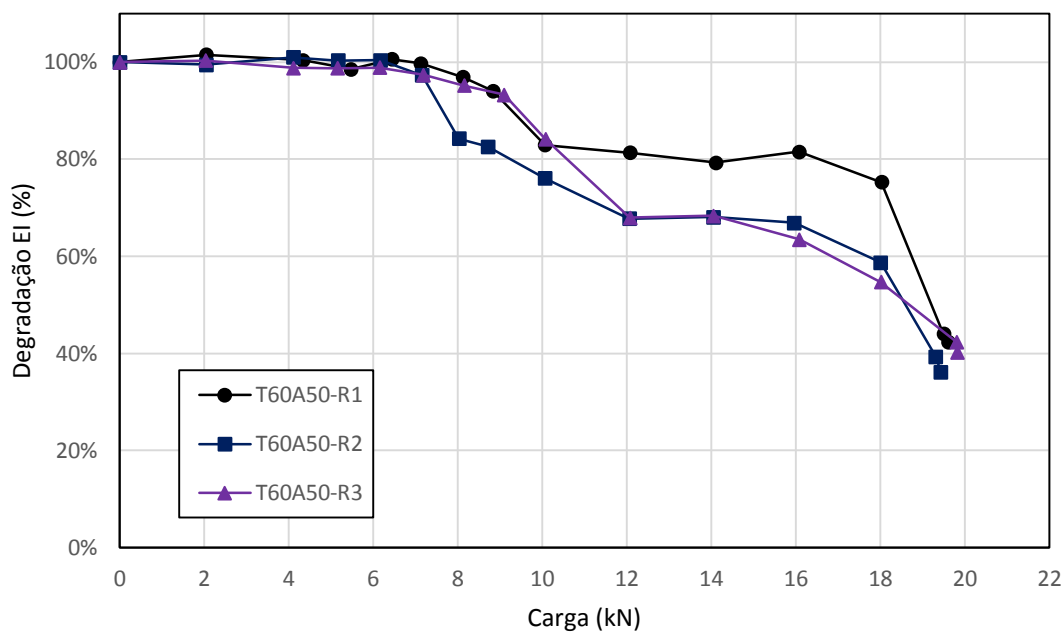


Figura 4.3 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A50.

Como os resultados obtidos no ensaio de flexão das três repetições (R1, R2 e R3) de todos os modelos experimentais apresentaram uma dispersão muito baixa, optou-se por utilizar a curva que corresponde à média dos resultados, denominada T60A50-EXP.MÉDIO. Para o trecho elástico-linear desta curva, foi ajustada a equação de uma reta (Figura 4.4) que representa o Estádio I da viga, para o qual o elemento estrutural não sofreu fissuração e não existe perda de rigidez. Esta reta está identificada como ESTÁDIO I (Figura 4.5).

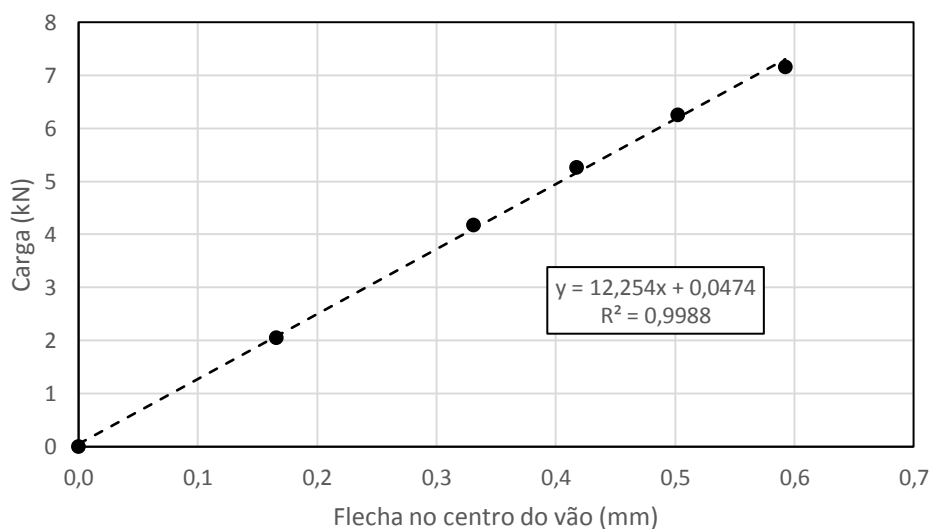


Figura 4.4 – Equação de regressão linear estimativa do Estádio I.

O comportamento da viga também foi estudado com o auxílio de um modelo analítico, neste caso identificado pela curva T60A50-ANALÍTICO (Figura 4.5). A curva analítica apresenta um trecho elástico-linear até atingir a carga de fissuração (P_f) e um trecho não-linear no qual a rigidez da viga (EI) varia de acordo com a Expressão de Brason (Eq 2.3).

Dispondo-se da rigidez da viga (EI) para cada estágio de carga, obtida a partir da frequência fundamental de vibração (f_0), determinou-se a flecha máxima da viga no centro do vão, o que permitiu a obtenção da curva T60A50-EXP.DIN (Figura 4.5).

Para manter as condições de contorno constantes durante o ensaio dinâmico, foi necessário suspender completamente o atuador de carga da máquina universal de ensaios. Desta forma, a parcela elástica do deslocamento vertical na viga para cada estágio de carga era recuperada, ficando acumulada apenas a porção inelástica. Assim, aos valores de flecha do trecho inelástico da curva T60A50-EXP.DIN foram adicionadas as parcelas elásticas do deslocamento vertical estimadas por meio da reta ESTÁDIO I, o que resultou na curva T60A50-EXP.DIN.COR. Na Figura 4.5 apresenta-se o Diagrama Carga-Flecha com o conjunto de curvas descrito anteriormente.

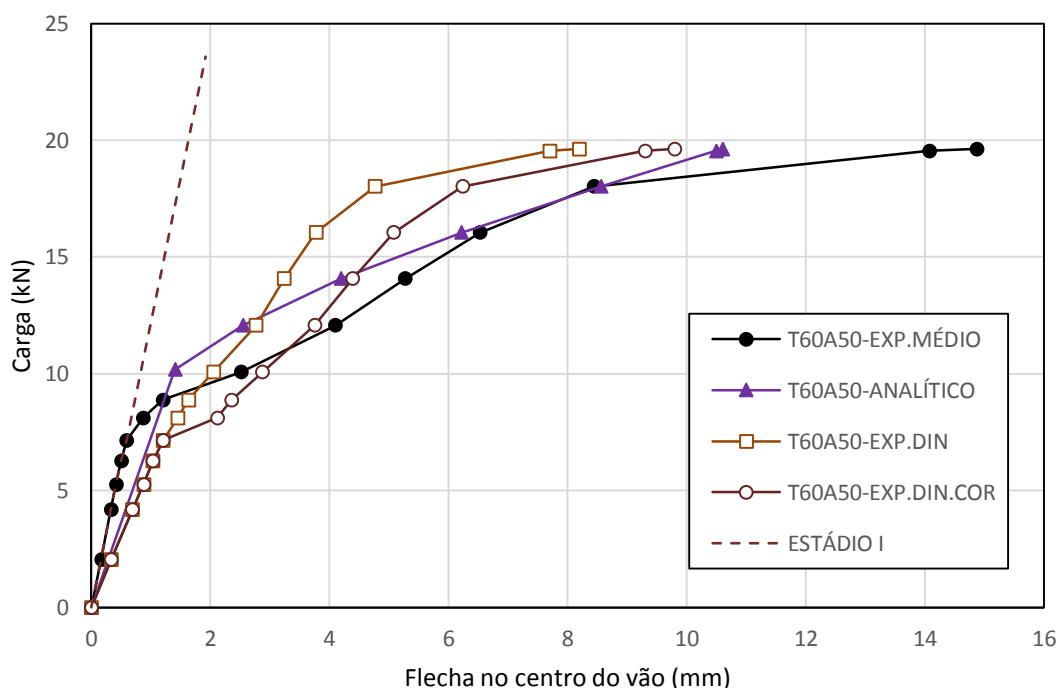


Figura 4.5 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A50 com representação dos resultados experimentais e analíticos.

Na Figura 4.6 apresenta-se uma síntese dos resultados experimentais, analíticos e numéricos. Os resultados numéricos (curva T60A50-DEFORME) foram obtidos a partir da simulação computacional com auxílio do programa computacional DEFORME v3.02-c1, conforme descrito no Capítulo 3.

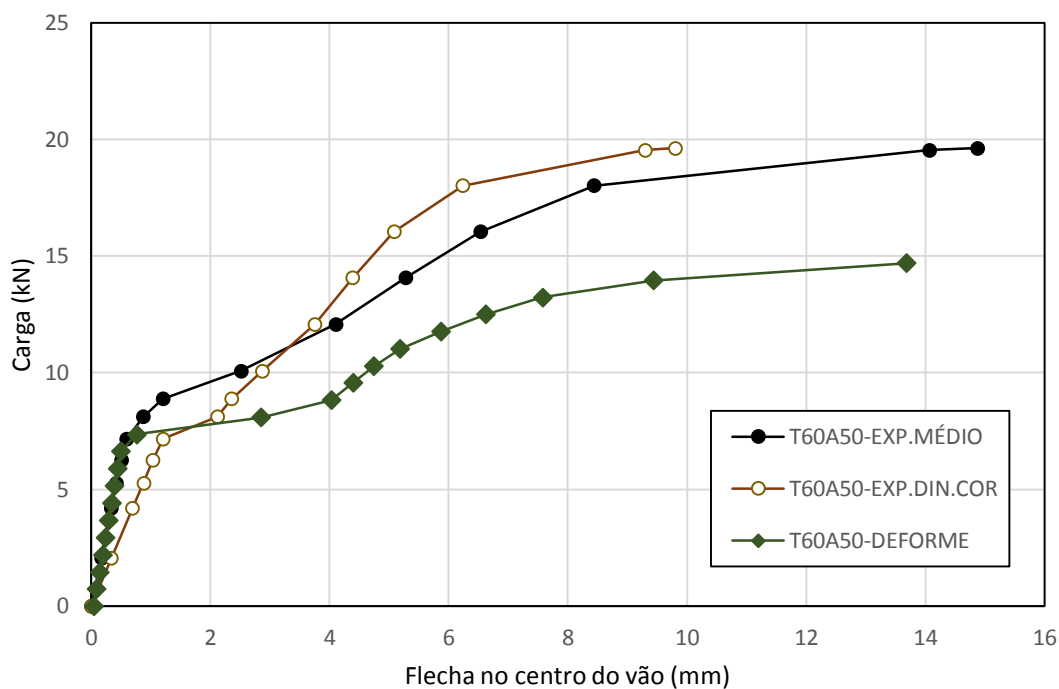


Figura 4.6 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A50.

4.2.2 Modelos T60A63

A seguir são apresentados os resultados dos modelos T60A63 seguindo a mesma lógica de apresentação dos modelos T60A50 (Item 4.2.1). São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.7), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.8), o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.9), o Diagrama Carga-Flecha experimental e analítico (Figura 4.10) e o Diagrama Carga-Flecha sintético (Figura 4.11).

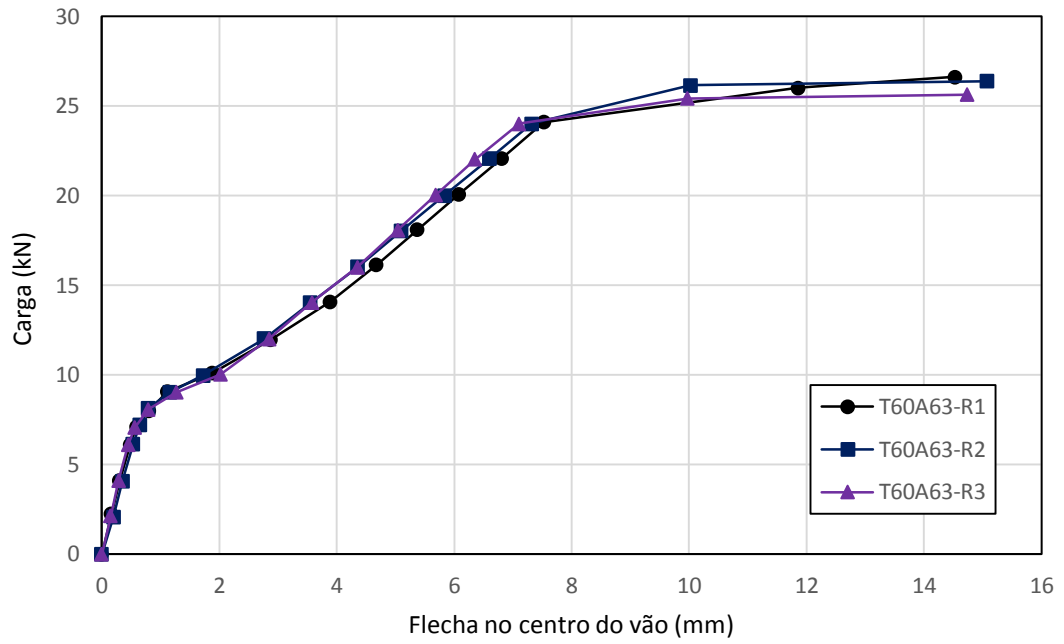


Figura 4.7 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A63.

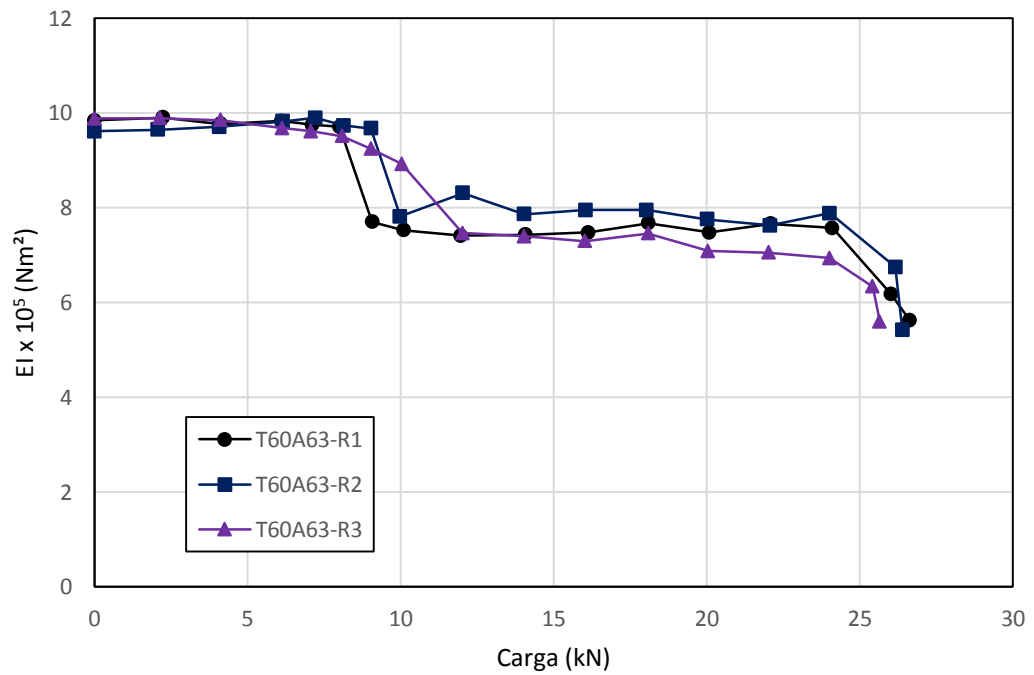


Figura 4.8 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A63.

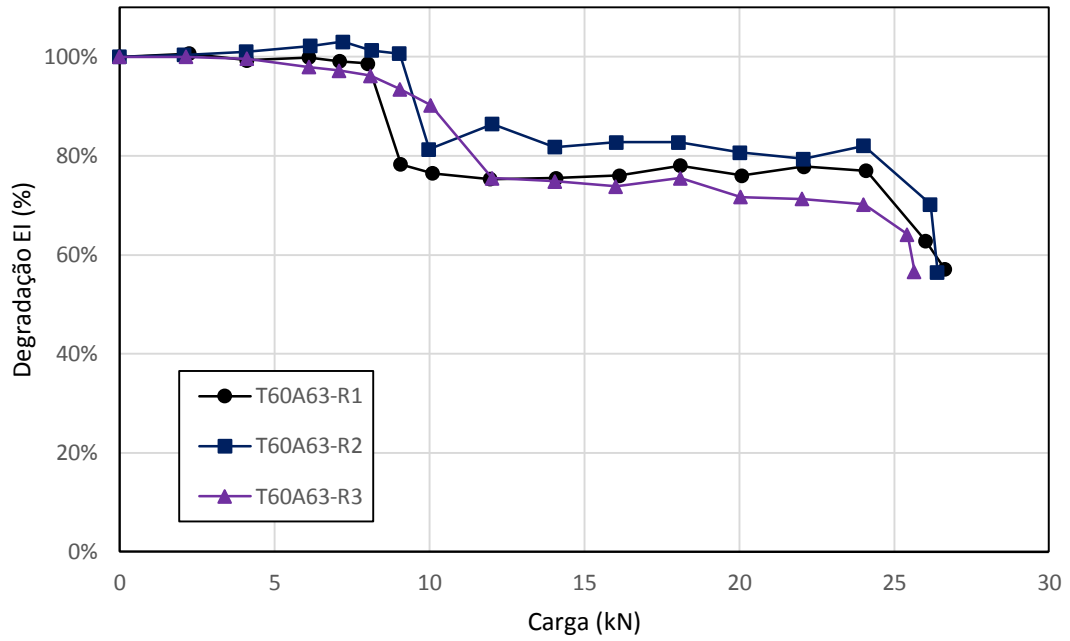


Figura 4.9 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A63.

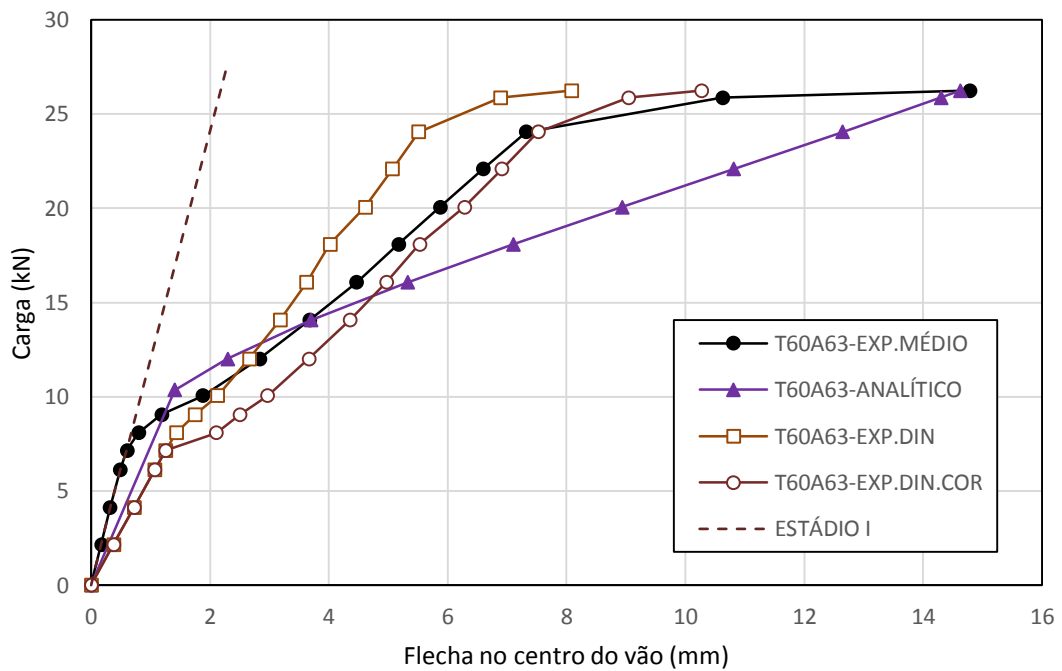


Figura 4.10 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A63 com representação dos resultados experimentais e analíticos.

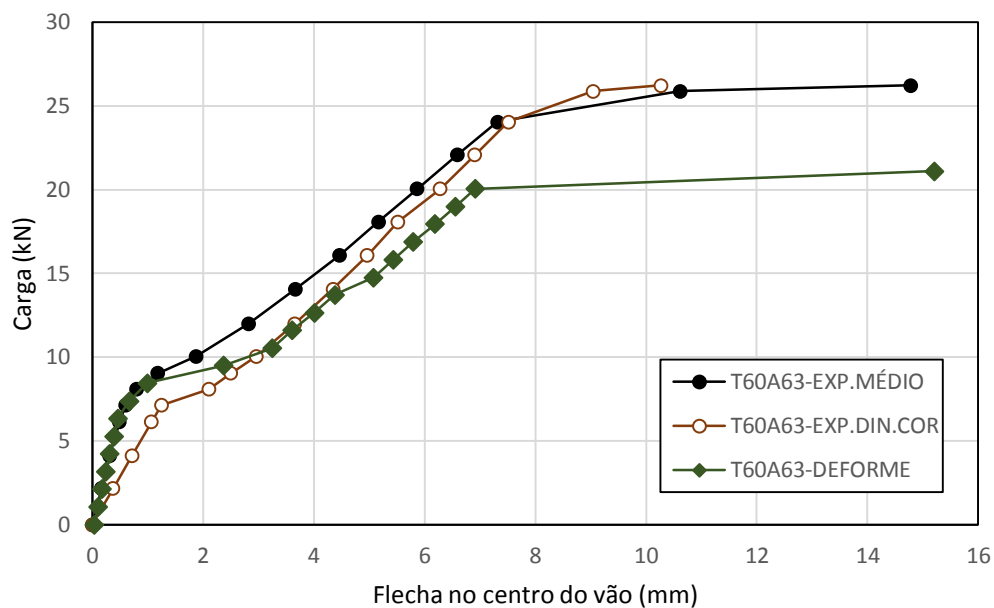


Figura 4.11 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A63.

4.2.3 Modelos T60A80

A seguir são apresentados os resultados dos modelos T60A80 seguindo a mesma lógica de apresentação dos modelos T60A50 (item 4.2.1). São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.12), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.13), o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.14), o Diagrama Carga-Flecha experimental e analítico (Figura 4.15) e o Diagrama Carga-Flecha sintético (Figura 4.16).

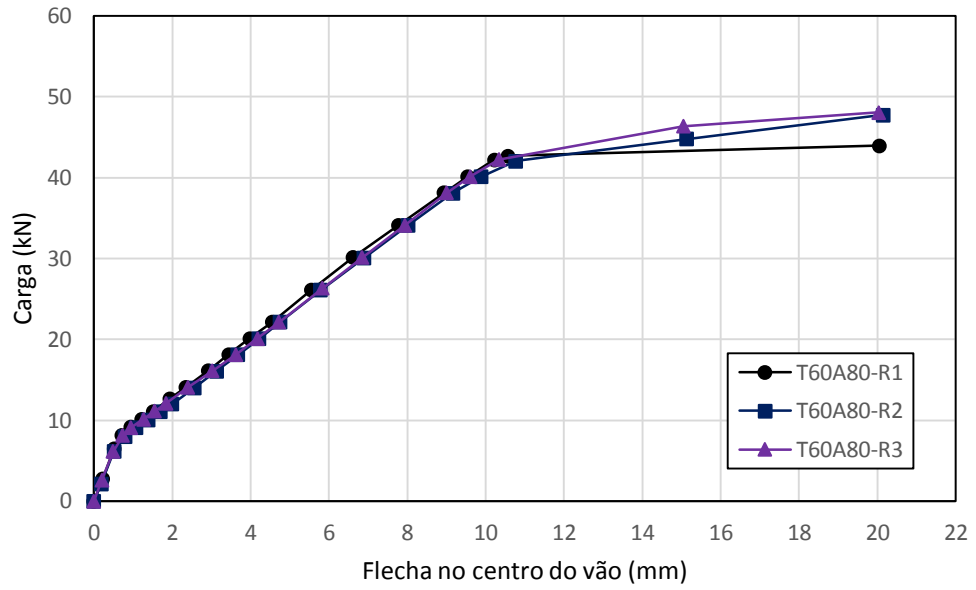


Figura 4.12 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A80.

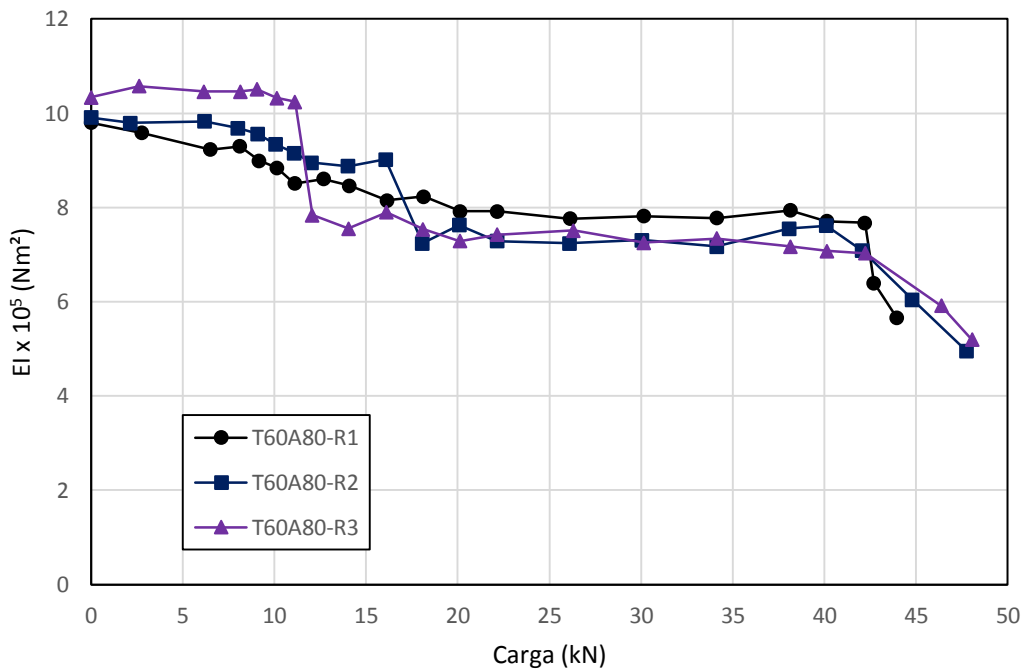


Figura 4.13 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos T60A80.

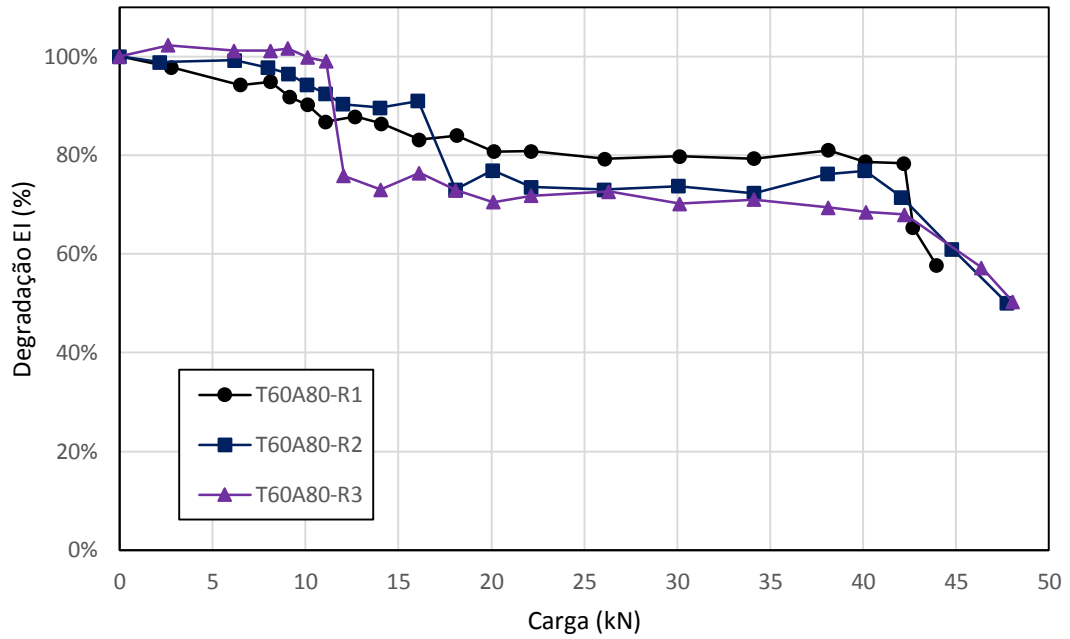


Figura 4.14 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos T60A80.

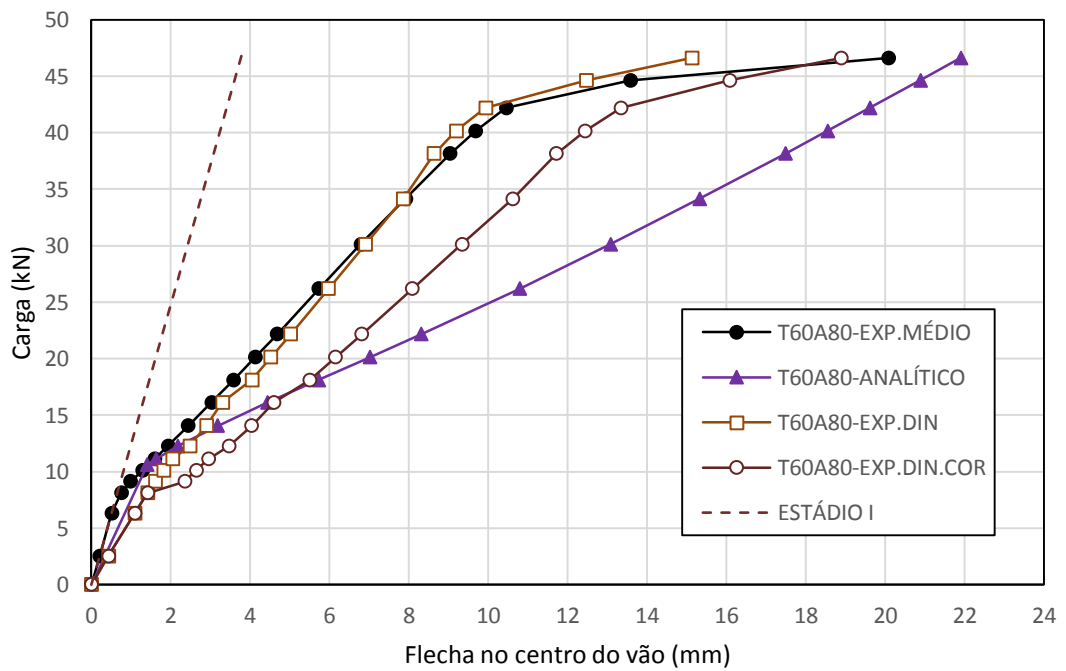


Figura 4.15 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos de viga T60A80 com representação dos resultados experimentais e analíticos.

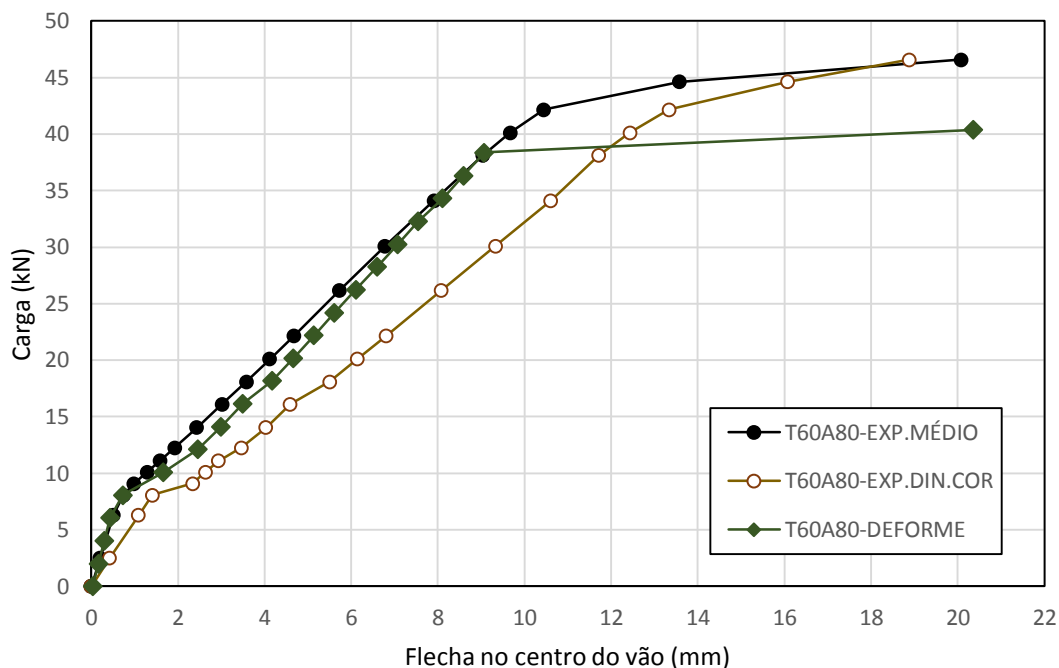


Figura 4.16 – Diagrama Carga-Flecha sintético dos modelos de viga T60A80.

4.2.4 Discussão dos resultados

Os Diagramas Carga-Flecha dos modelos (Figuras 4.1, 4.7 e 4.12) evidenciam a baixa dispersão dos resultados do ensaio para cada um dos modelos (R1, R2 e R3) de uma mesma série. Isto permitiu adotar valores médios como representativos para cada série.

Com relação à variação da rigidez (Figuras 4.2, 4.8 e 4.13), pode-se observar que existe uma dispersão maior entre as repetições de um mesmo modelo quando comparado com os resultados dos Diagramas Carga-Flecha. Isto pode ser explicado devido à dispersão típica da resistência à tração do concreto e do caráter aleatório da distribuição da fissuração em uma viga de concreto armado. No entanto, com base nas mesmas figuras, pode-se observar uma tendência clara da degradação da rigidez do modelo, o que torna razoável descrever o fenômeno por meio da média dos resultados.

Com base nos diagramas que representam a Degradação da Rigidez Percentual (Figuras 4.3, 4.9 e 4.14), pode-se observar que para a faixa de serviço¹ os elementos apresentam cerca de 70% a 80% de sua rigidez inicial. Para cargas próximas ao colapso, os elementos ainda conservam uma parcela significativa de sua rigidez, que varia entre 50% e 60%. A rigidez que o elemento ainda conserva é um aspecto de grande relevância, pois em

¹ Entende-se por faixa de serviço a região compreendida entre 40% e 60% da carga de colapso do elemento.

projetos de recuperação estrutural a rigidez residual do elemento é muitas vezes desprezada devido à dificuldade de se mensurar este parâmetro. Nesses casos deixa-se de contar com a capacidade resistente ainda disponível do elemento estrutural, o que torna a recuperação mais cara e dificulta prever o comportamento estrutural.

Um aspecto importante a destacar é que os valores de rigidez residual observados no presente trabalho foram obtidos em função de uma deterioração causada exclusivamente por efeito mecânico, ou seja, sem nenhuma deterioração de outra natureza (química, física ou biológica) do concreto ou da armadura. No entanto, a metodologia apresentada para estimar a rigidez à flexão pode ser utilizada independentemente da causa da deterioração.

Comparando-se os resultados experimentais e analítico (Figuras 4.5, 4.10 e 4.15), observa-se que no trecho elástico-linear as curvas T60A**-EXP.DIN.COR² apresentam uma rigidez menor que as curvas T60A**-EXP.MÉDIO e T60A**-ANALÍTICO. Por outro lado, as curvas T60A**-EXP.DIN.COR conseguem descrever melhor o comportamento observado nos ensaios de flexão (T60A**-EXP.MÉDIO), principalmente o da região que sofre maior influência do fenômeno do *Tension Stiffening*, o que indica que o procedimento para estimativa de flechas a partir da rigidez (*EI*) calculada com base nas características dinâmicas permitiu a obtenção de bons resultados e uma boa caracterização dos fenômenos que ocorrem em uma viga de concreto armado submetida à flexão simples.

Considerando-se os resultados das Figuras 4.6, 4.11 e 4.16, nota-se que para a carga de colapso dos modelos T60A50 a flecha calculada com base nas características dinâmicas é menor que a registrada nos modelos experimentais. Por outro lado, a carga de colapso estimada com o auxílio do DEFORME foi menor que a obtida nos modelos experimentais T60A63. O comportamento dos modelos experimentais é bastante semelhante ao estimado com base nas características dinâmicas, apesar das flechas para a carga de colapso apresentarem um maior desvio.

As flechas calculadas com base nas características dinâmicas são superiores às aquelas observadas nos modelos experimentais, enquanto que as flechas estimadas com auxílio do DEFORME são muito próximas daquelas observadas nos modelos experimentais.

² A designação A** faz referência aos modelos A50, A63 e A80

Apesar disto, a carga de colapso estimada no DEFORME é menor do que a dos modelos experimentais.

4.3 Estudo do comportamento de vigas sujeitas à variação da taxa de armadura

Por meio deste estudo buscou-se avaliar a influência da variação da taxa de armadura de tração, mantendo-se as mesmas características do concreto, sobre o comportamento de uma viga de concreto armado, com o auxílio das características dinâmicas. Esta situação busca simular uma redução da área de armadura provocada, por exemplo, pelo fenômeno de corrosão.

4.3.1 Modelos T45 (concreto $a/c=0,45$)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série T45, cujo concreto possui uma relação $a/c = 0,45$. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.17), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.18), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.19) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.20).

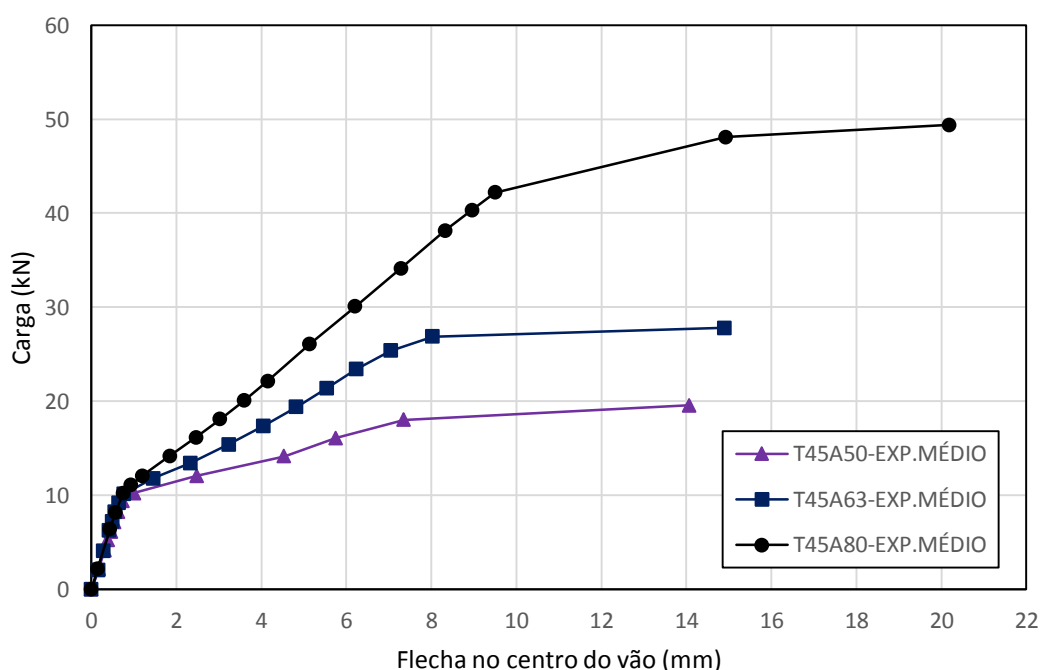


Figura 4.17 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T45.

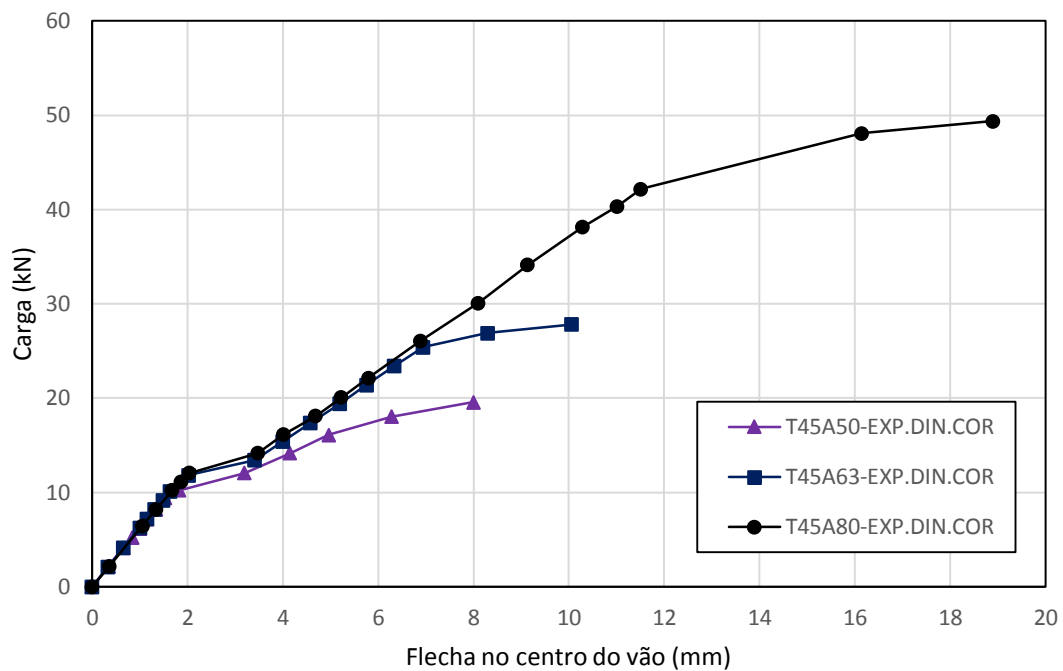


Figura 4.18 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T45.

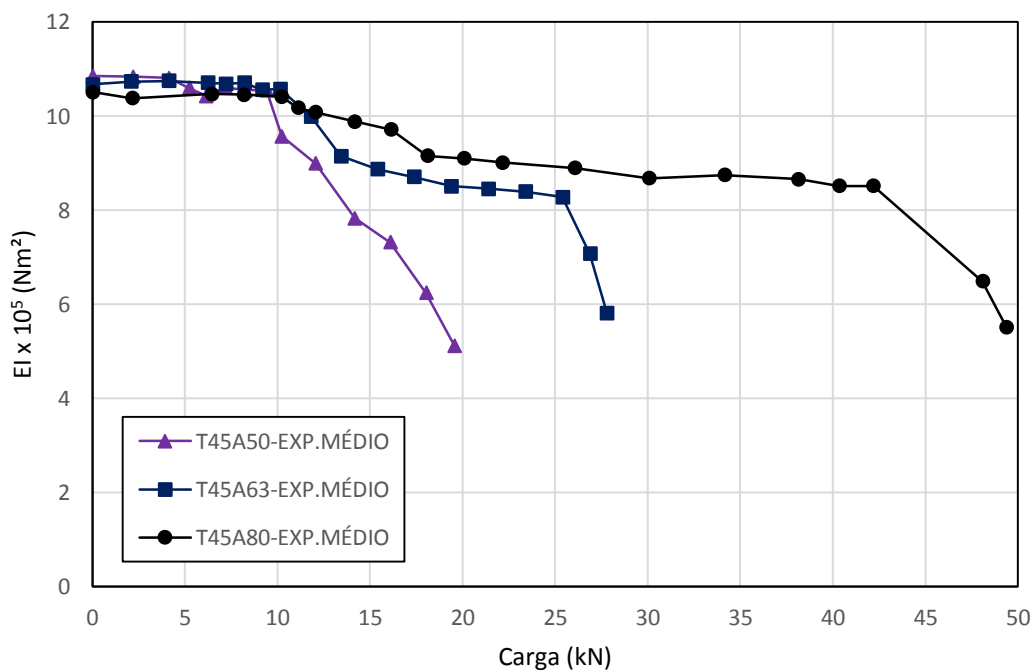


Figura 4.19 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T45.

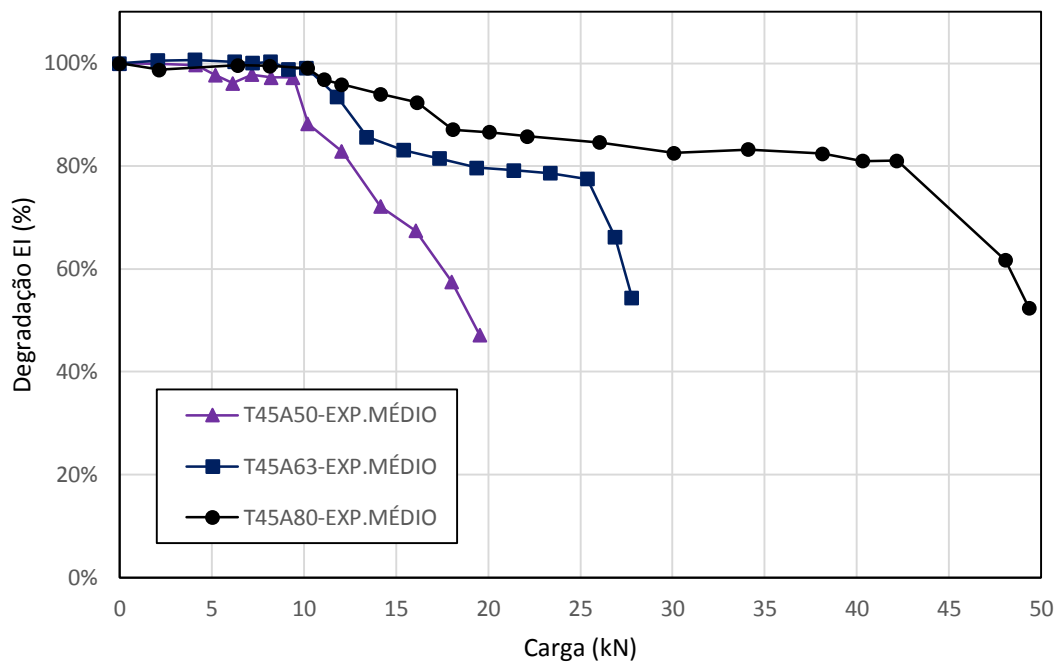


Figura 4.20 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T45.

4.3.2 Modelos T60 (concreto $a/c=0,60$)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série T60, cujo concreto possui uma relação $a/c = 0,60$. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.21), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.22), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.23) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.24).

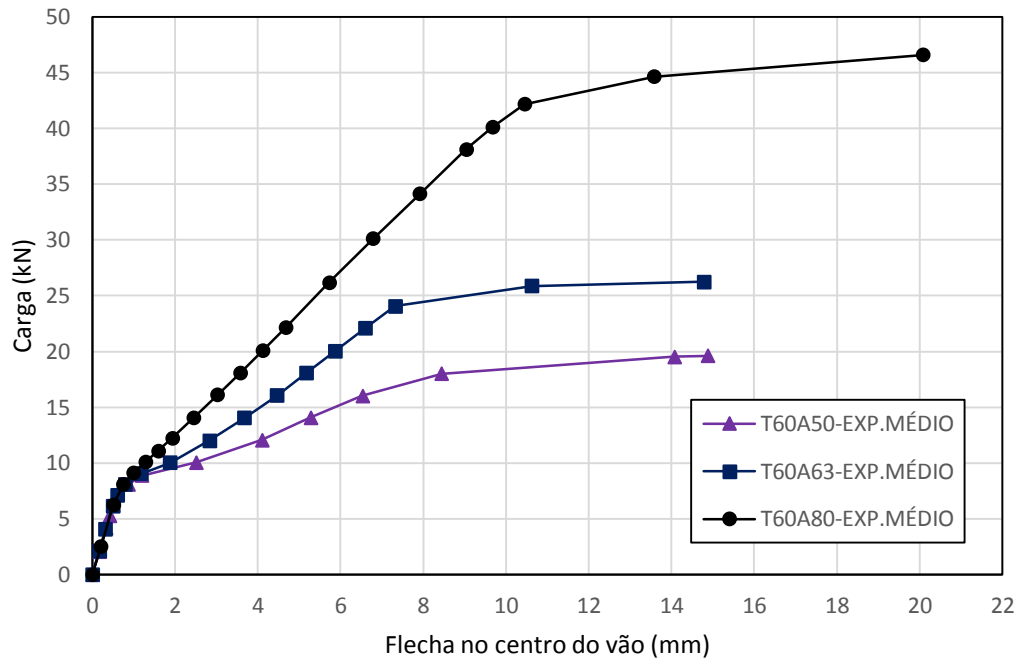


Figura 4.21 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T60.

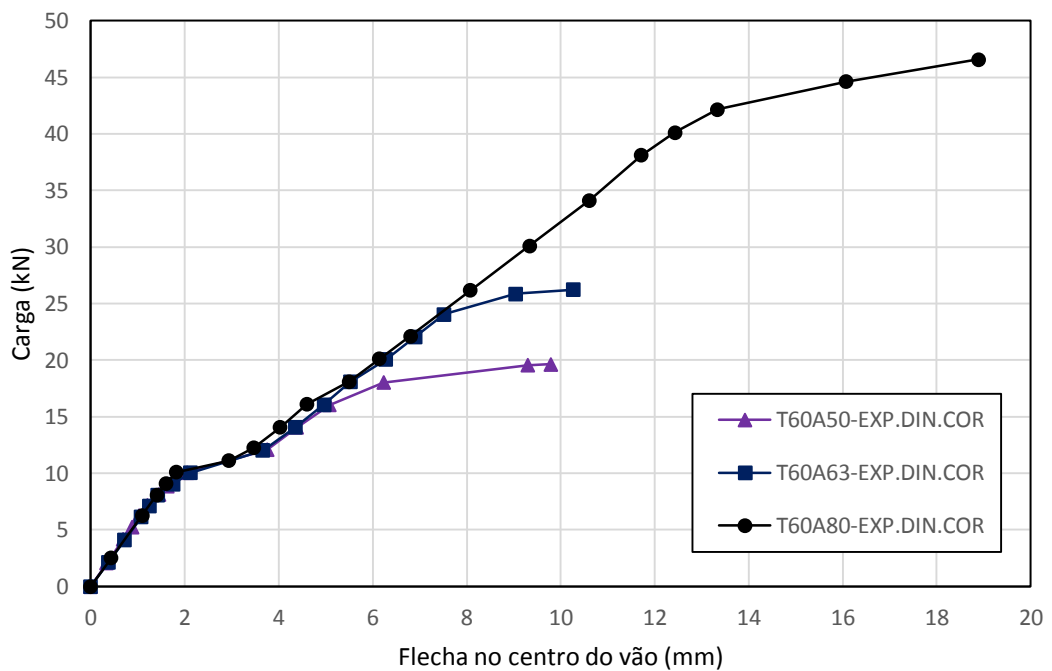


Figura 4.22 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T60.

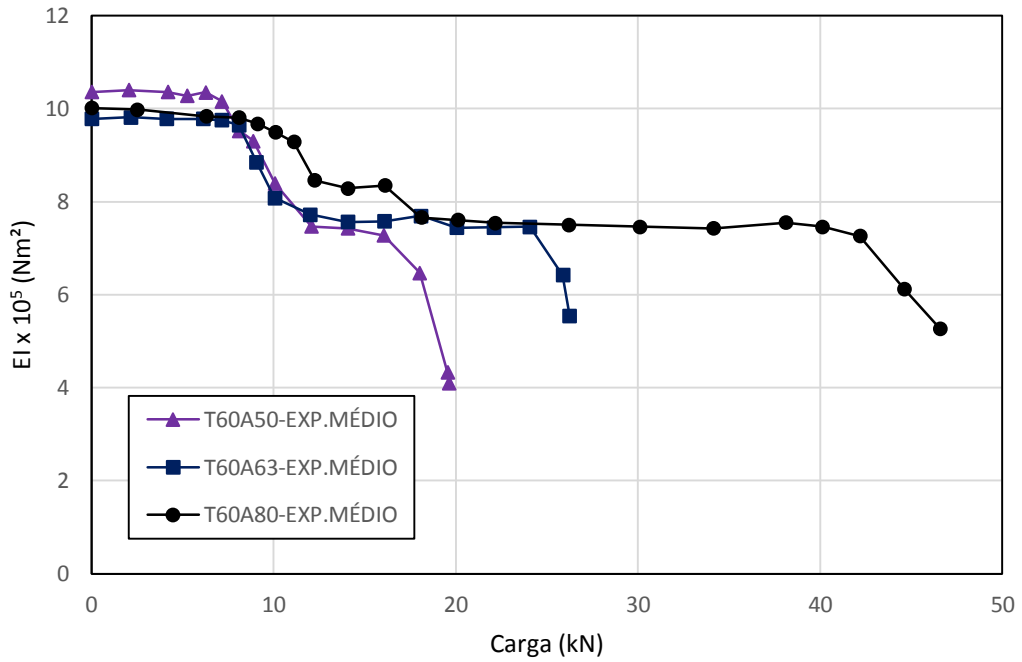


Figura 4.23 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T60.

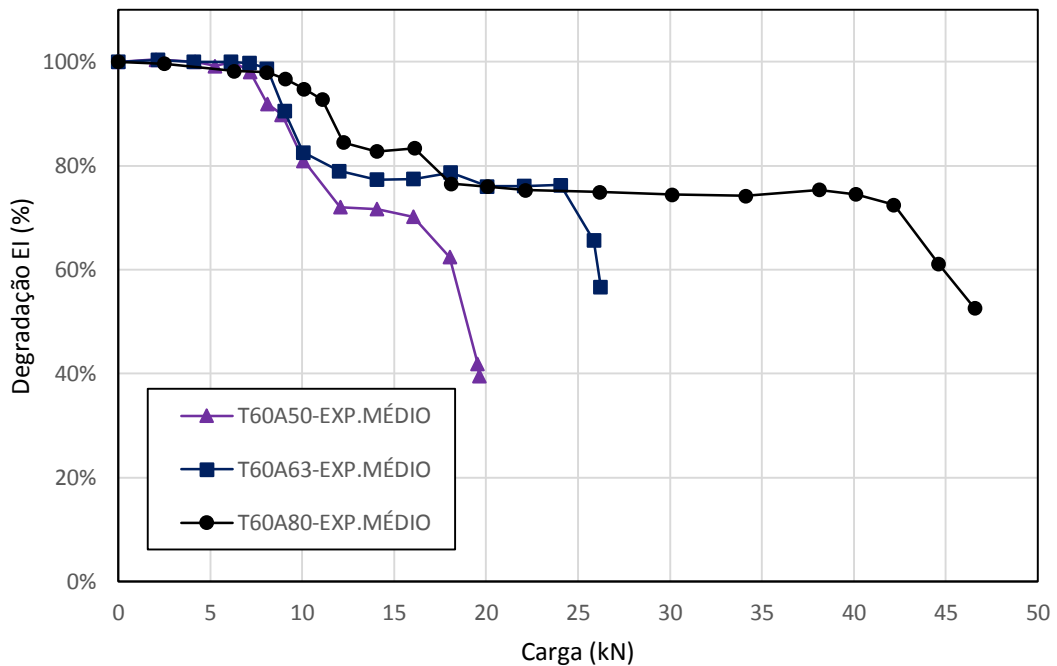


Figura 4.24 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T60.

4.3.3 Modelos T70 (concreto a/c=0,70)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série T70, cujo concreto possui uma relação $a/c = 0,70$. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do

ensaio de flexão (Figura 4.25), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.26), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.27) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.28).

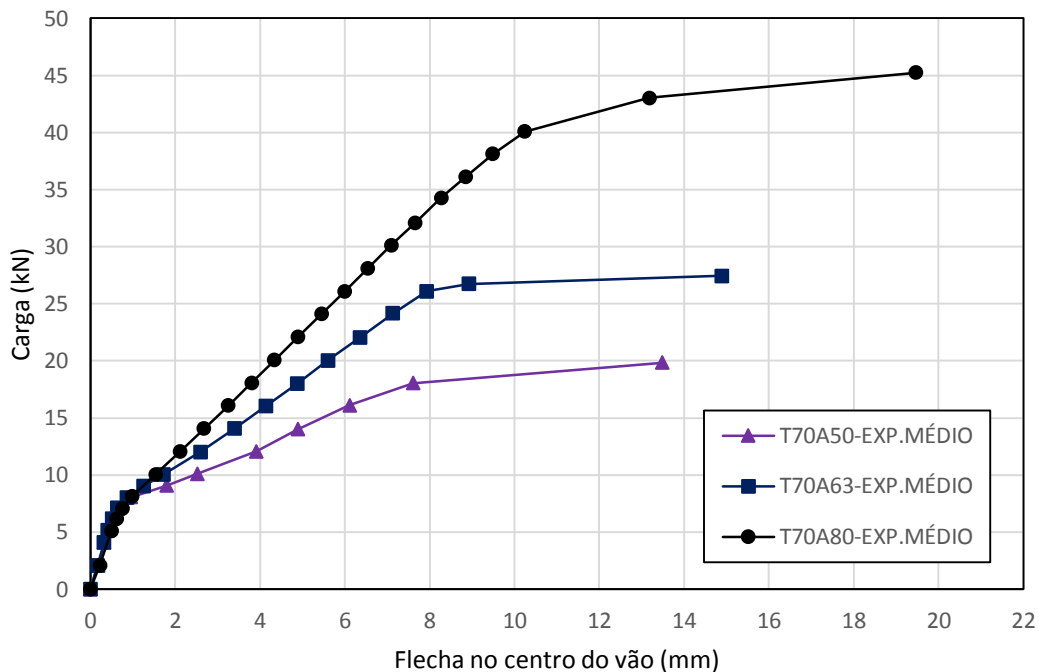


Figura 4.25 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T70.

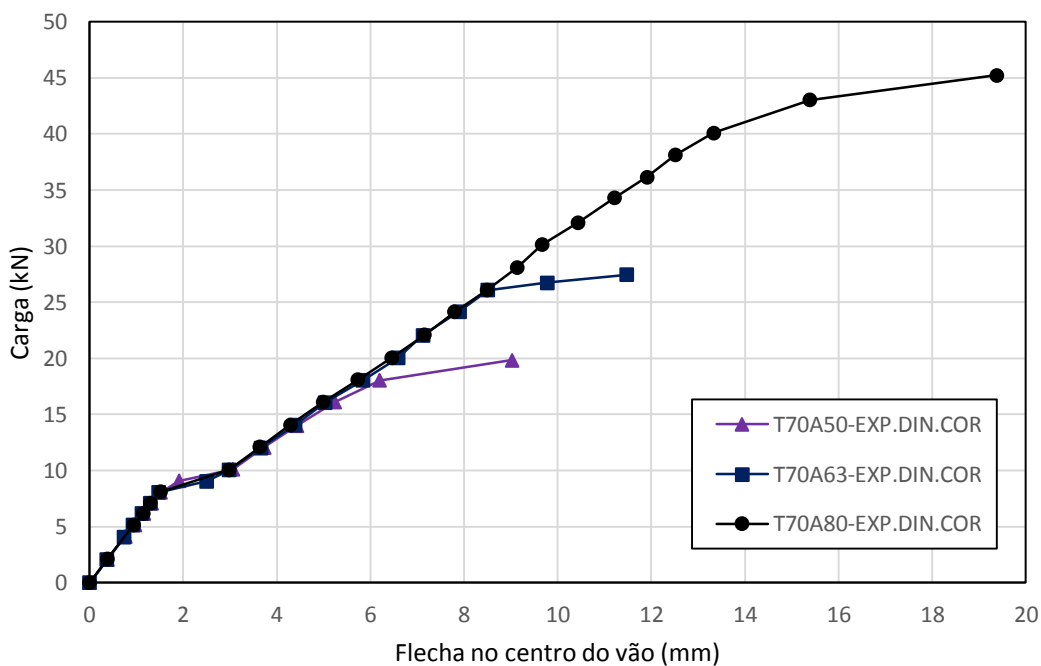


Figura 4.26 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T70.

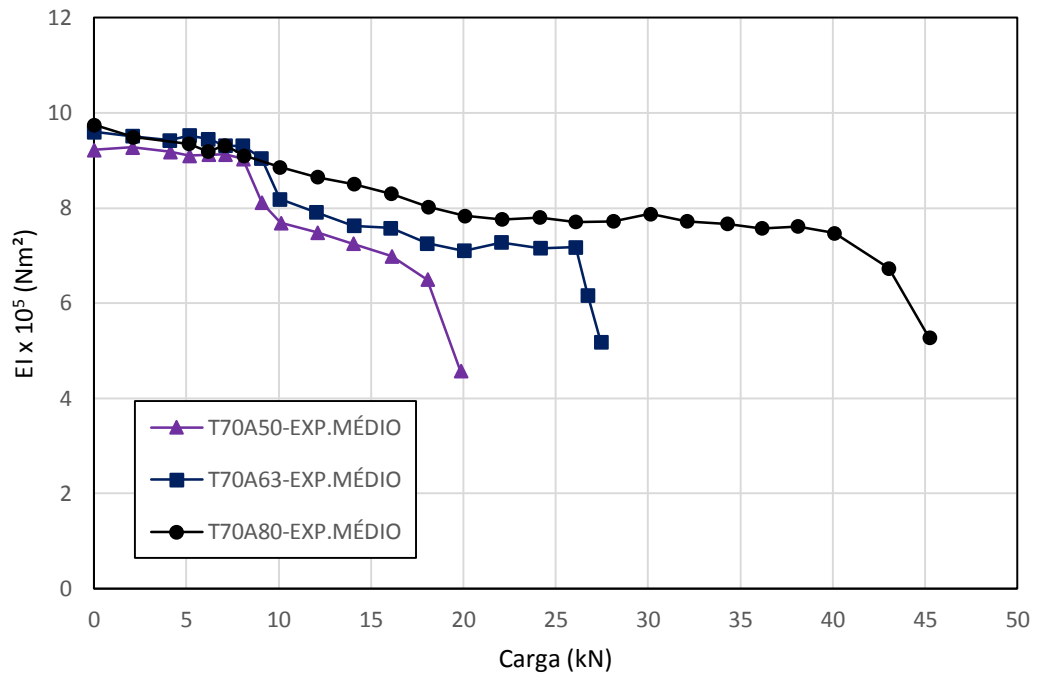


Figura 4.27 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T70.

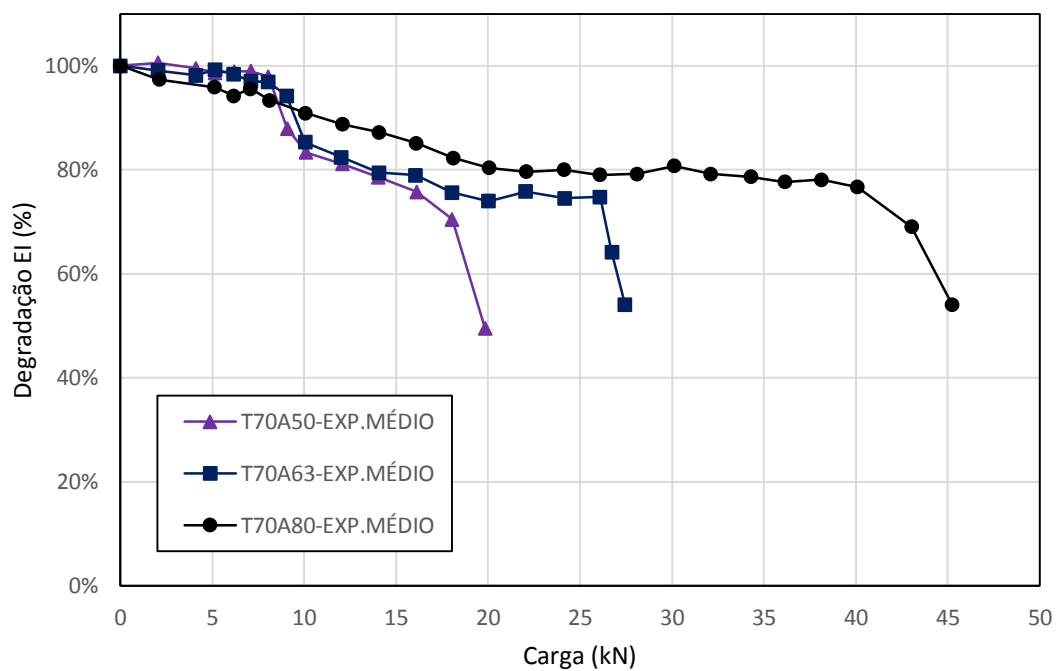


Figura 4.28 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T70.

4.3.4 Modelos T80 (concreto a/c=0,80)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série T80, cujo concreto possui uma relação $a/c = 0,80$. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do

ensaio de flexão (Figura 4.29), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.30), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.31) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.32).

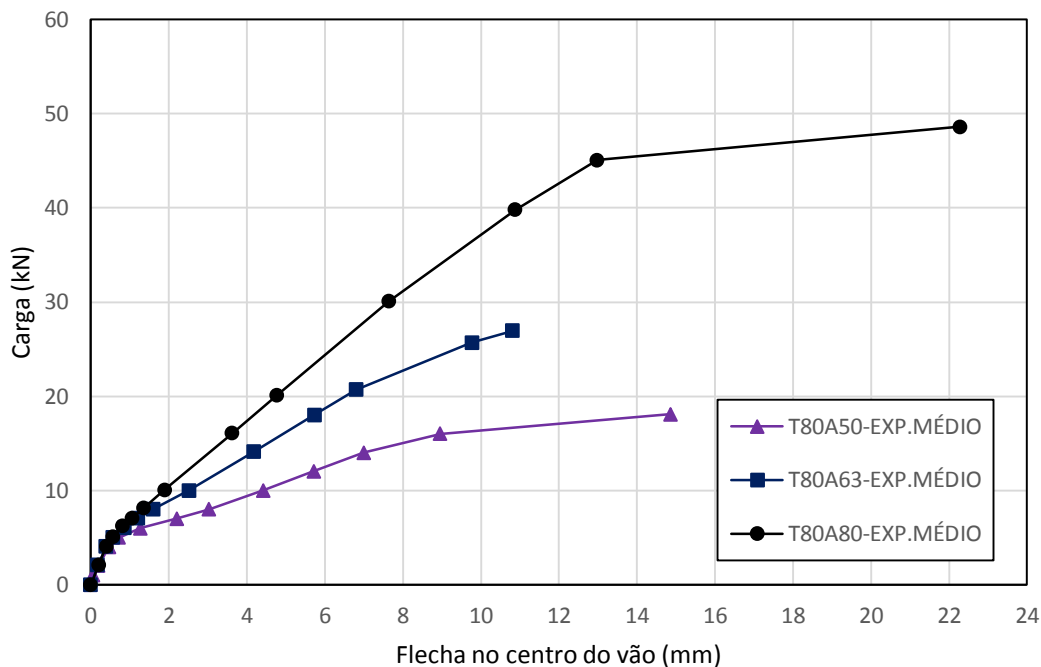


Figura 4.29 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série T80.

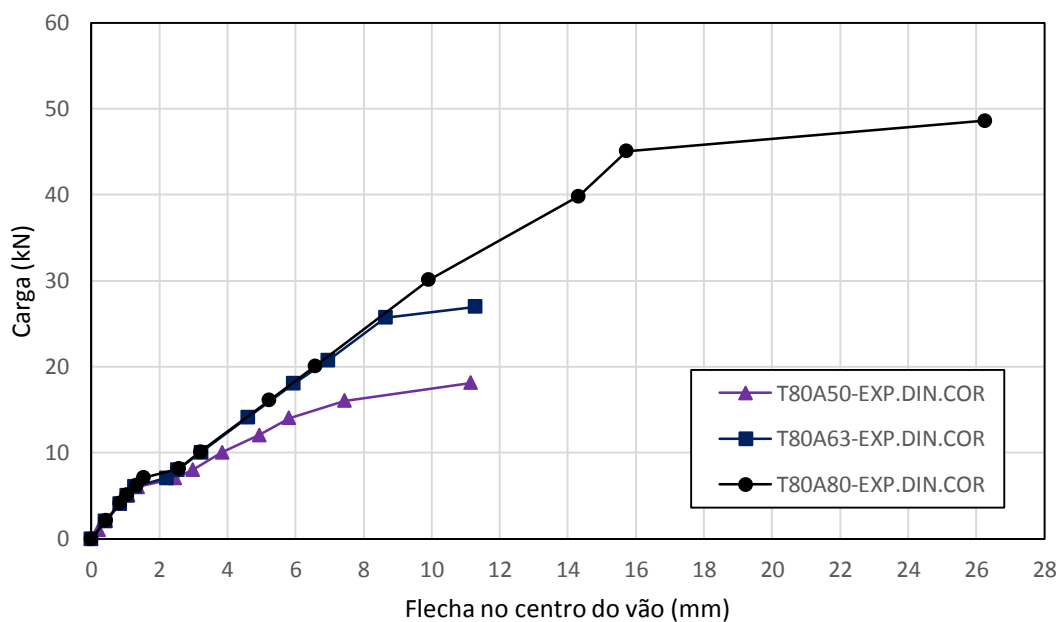


Figura 4.30 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para modelos da série T80.

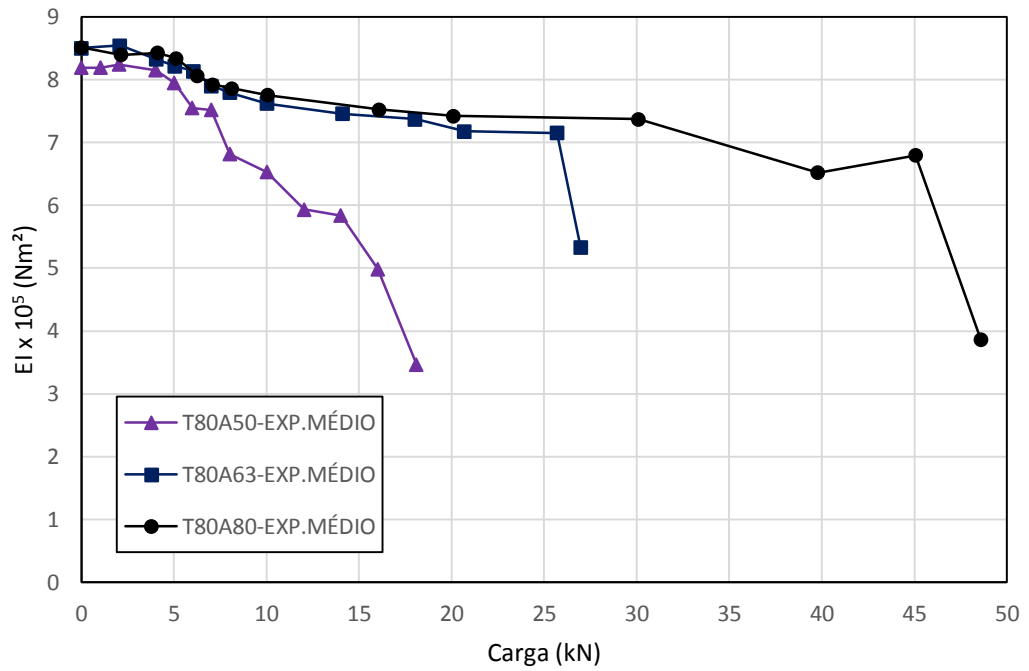


Figura 4.31 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série T80.

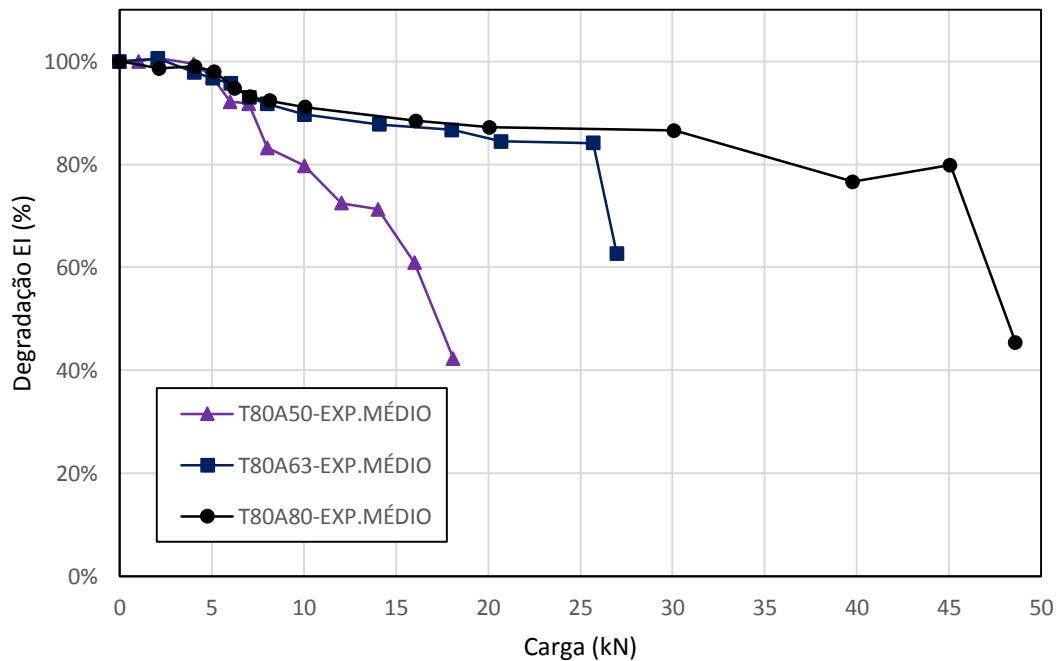


Figura 4.32 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série T80.

4.3.5 Discussão dos resultados

Os Diagramas Carga-Flecha (Figuras 4.17, 4.21, 4.25 e 4.29) apresentam um comportamento similar até a região próxima a carga de fissuração, o que indica uma

grande homogeneidade dos concretos utilizados na pesquisa. A partir deste ponto, o comportamento do elemento fica marcado pela variação da taxa de armadura. Em função disso, os modelos da série A80, que possuem uma maior taxa de armadura, apresentam carga de colapso superiores àqueles com menor taxa de armadura, o que indica que a ruína foi governada pelo aço.

Nos Diagramas Carga-Flecha obtidos com base nas características dinâmicas (Figuras 4.18, 4.22, 4.26 e 4.30) nota-se um comportamento similar aos resultados do ensaio de flexão para região do Estádio I. Após o início da fissuração, os modelos caminharam com rigidezes muito próximas, até a região na qual alcançam as cargas últimas. Este comportamento pode ser explicado pelo pequeno avanço da fissuração enquanto as armaduras não atingem o escoamento e um progresso acentuado após este ponto.

Com relação a variação da rigidez (Figuras 4.19, 4.23, 4.27 e 4.31), os modelos apresentam uma maior dispersão a partir do início da fissuração, provavelmente ocasionada pela propagação aleatória das fissuras nos elementos. Entretanto, observa-se uma tendência bem marcada do comportamento, ficando evidente a influência da redução da taxa de armadura na degradação da rigidez da viga.

Em se tratando da redução da rigidez percentual (Figuras 4.20, 4.24, 4.28 e 4.32), pode-se observar que a variação da taxa de armadura não implicou na mudança da rigidez residual do elemento, ficando esta compreendida entre 70% e 80% para a faixa de serviço e entre 40% e 60% para as cargas de colapso. Este comportamento pode ser interpretado como uma baixa influência da redução da taxa de armadura sobre a degradação da rigidez da viga em situação de colapso.

4.4 Estudo do comportamento de vigas sujeitas à variação das características mecânicas do concreto

Por meio deste estudo buscou-se avaliar a influência da variação das características mecânicas do concreto sobre o comportamento de uma viga de concreto armado, mantendo-se constante a taxa de armadura, com o auxílio das características dinâmicas. Esta situação busca simular a degradação do módulo de elasticidade do concreto provocada, por exemplo, pelo efeito de um ataque de sulfatos.

4.4.1 Modelos A50 (taxa de armadura de 0,41%)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série A50, cuja taxa de armadura é de 0,41%. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.33), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.34), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.35) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.36).

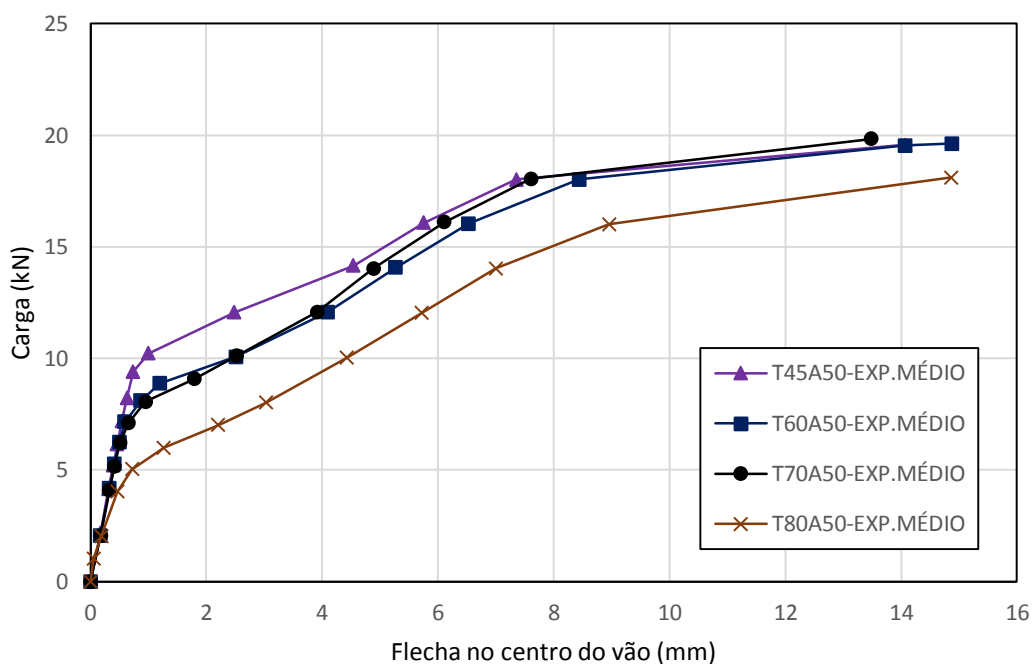


Figura 4.33 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A50.

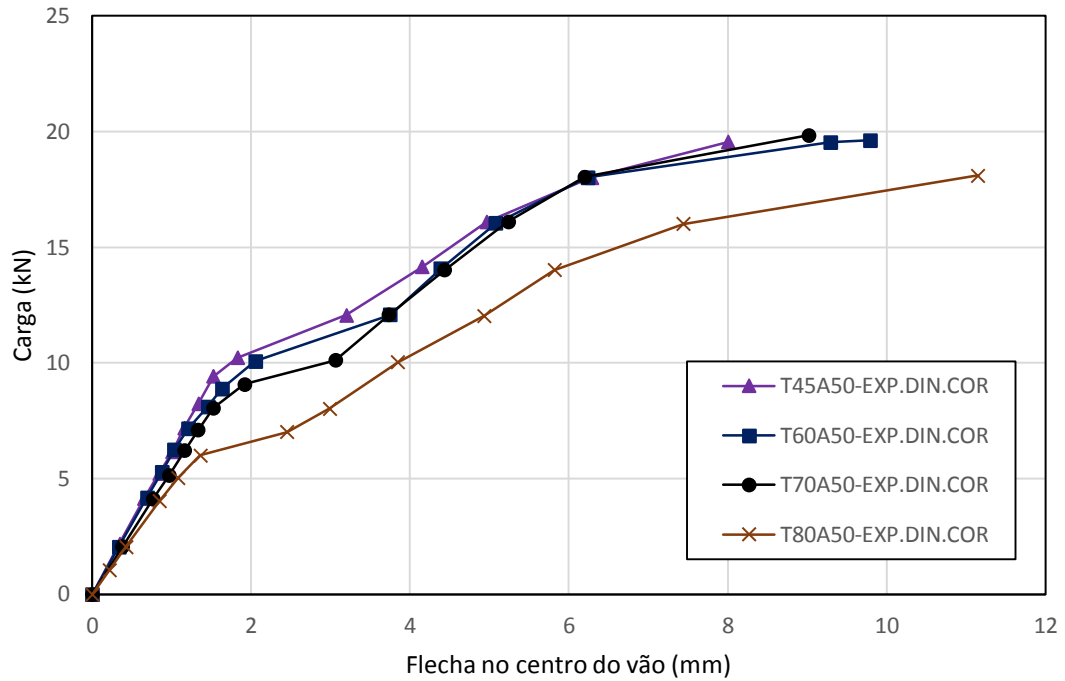


Figura 4.34 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A50.

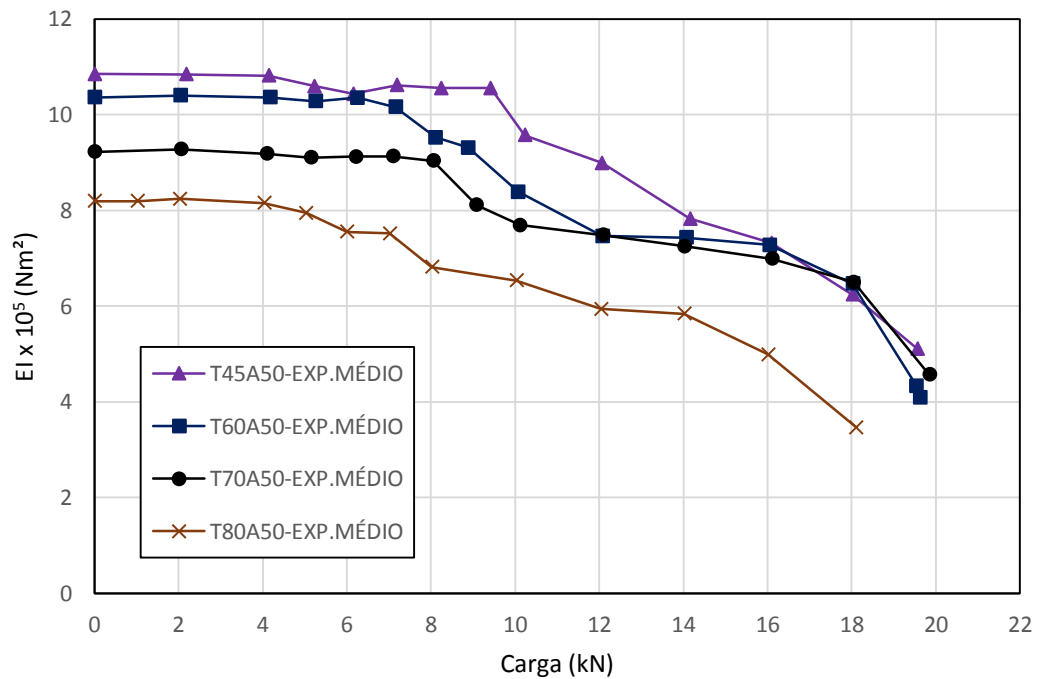


Figura 4.35 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A50.

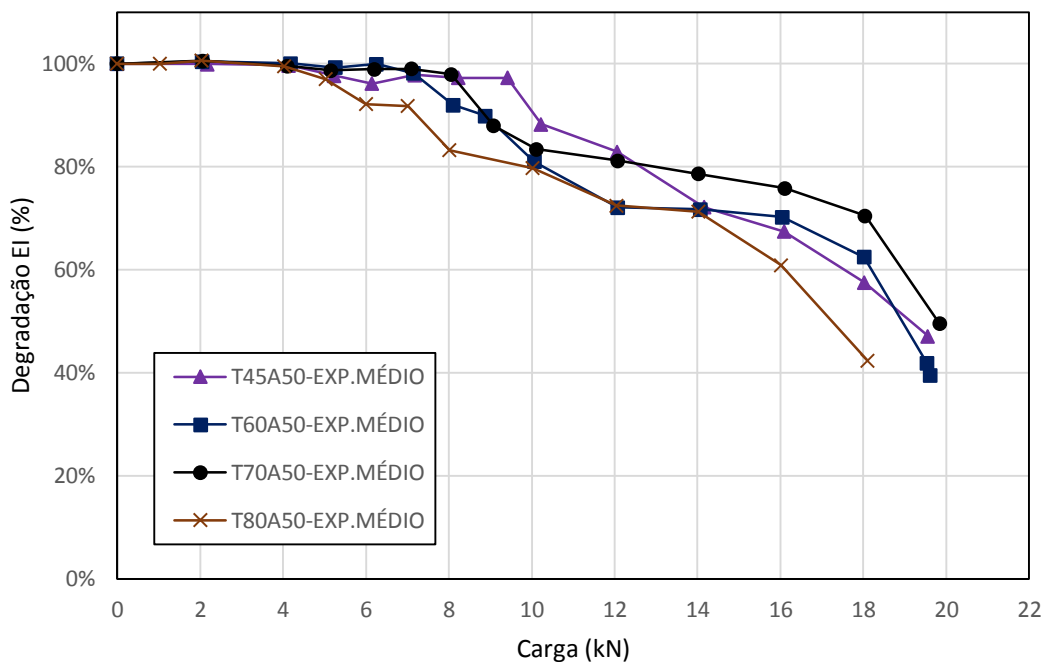


Figura 4.36 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A50.

4.4.2 Modelos A63 (taxa de armadura de 0,56%)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série A63, cuja taxa de armadura é de 0,56%. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão (Figura 4.37), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.38), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.39) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.40).

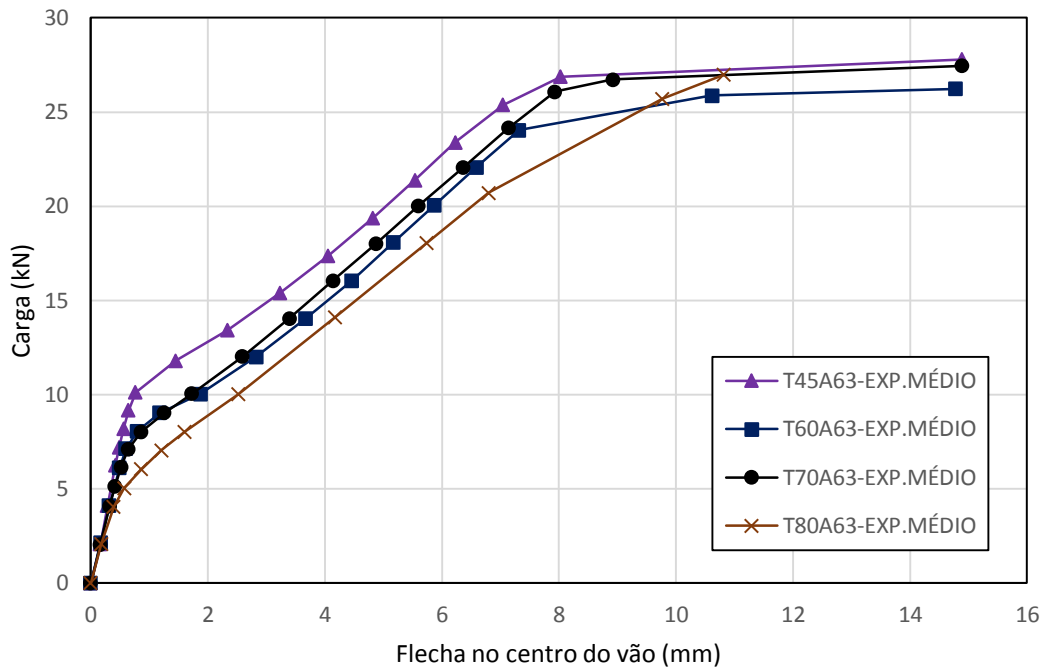


Figura 4.37 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A63.

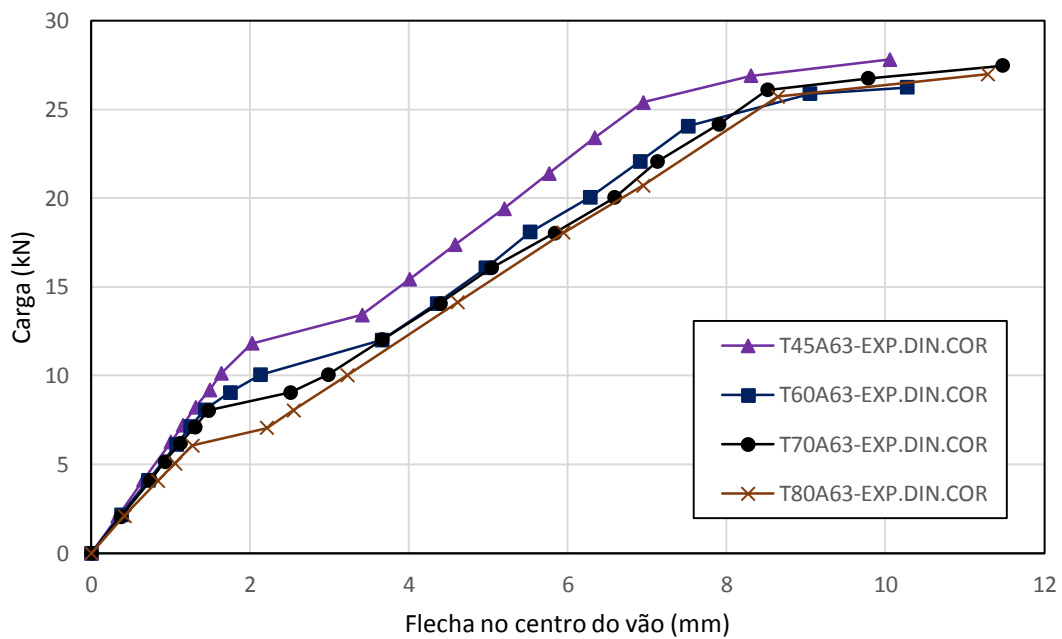


Figura 4.38 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A63.

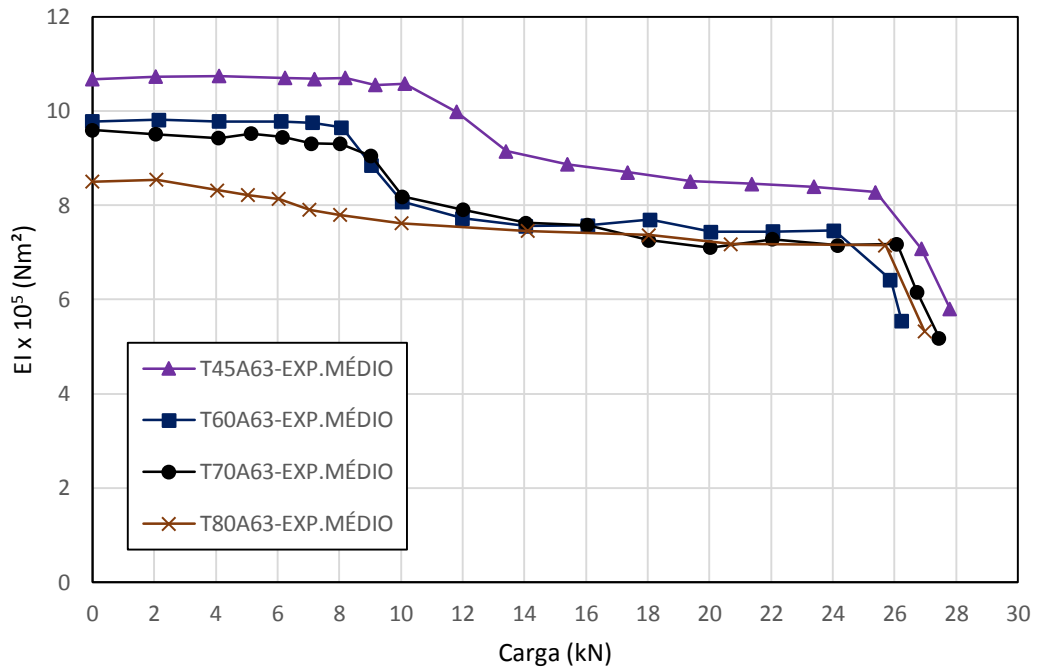


Figura 4.39 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A63.

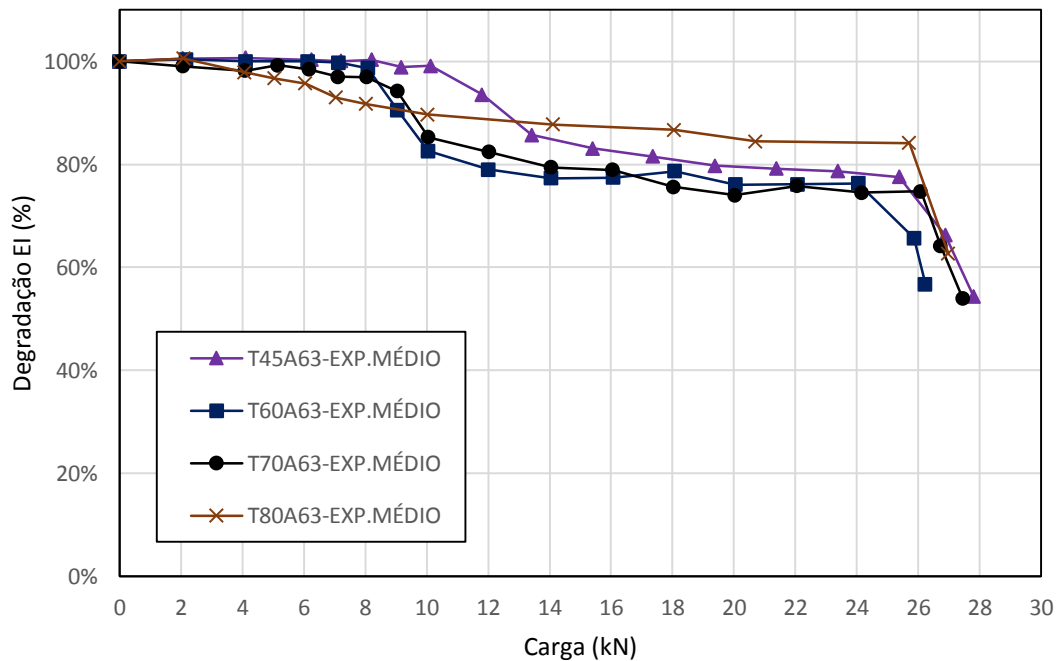


Figura 4.40 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A63.

4.4.3 Modelos A80 (taxa de armadura de 0,79%)

A seguir são apresentados os resultados para os modelos de viga da série A80, cuja taxa de armadura é de 0,79%. São apresentados o Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão

(Figura 4.41), o Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas (Figura 4.42), o Diagrama de Degradação da Rigidez (Figura 4.43) e o Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual (Figura 4.44).

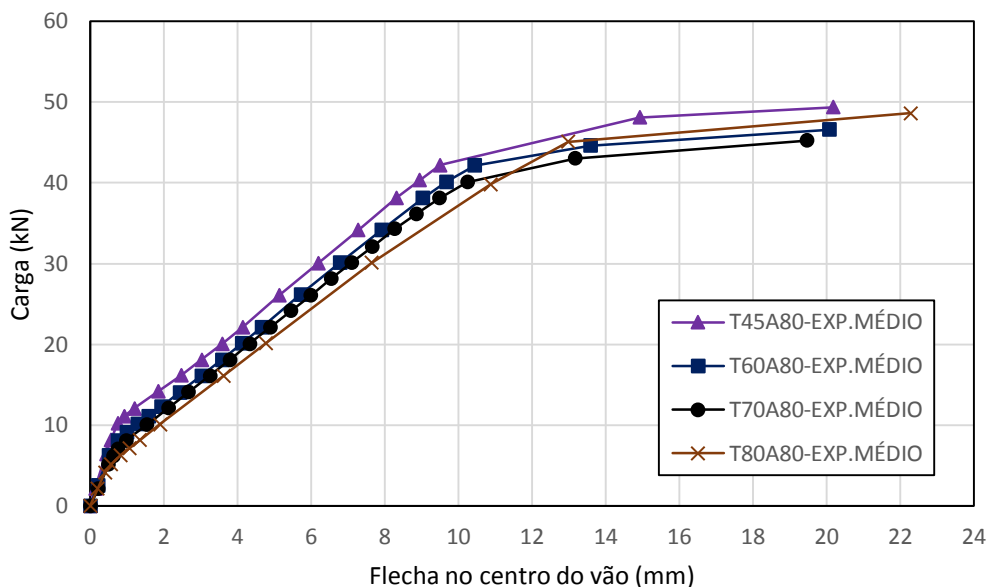


Figura 4.41 – Diagrama Carga-Flecha dos modelos da série A80.

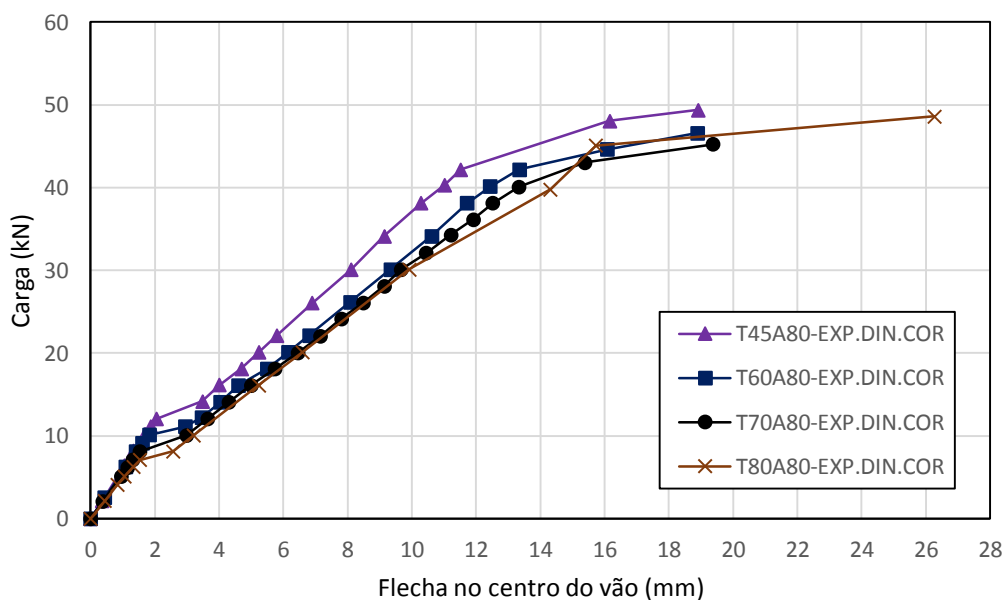


Figura 4.42 – Diagrama Carga-Flecha obtido com base nas características dinâmicas para os modelos da série A80.

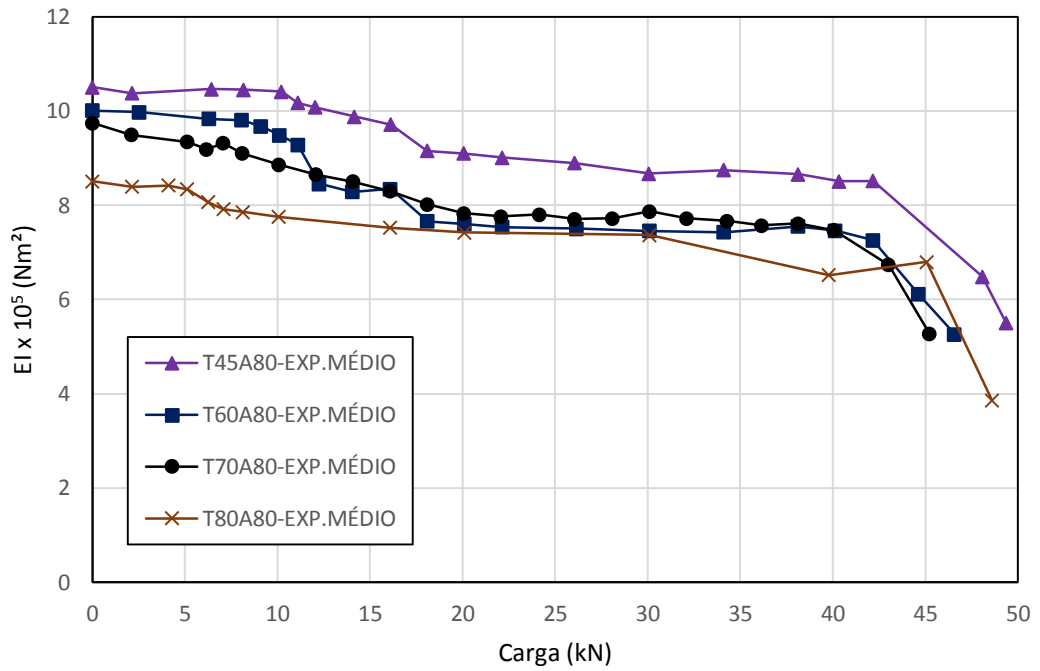


Figura 4.43 – Diagrama de Degradação da Rigidez dos modelos da série A80.

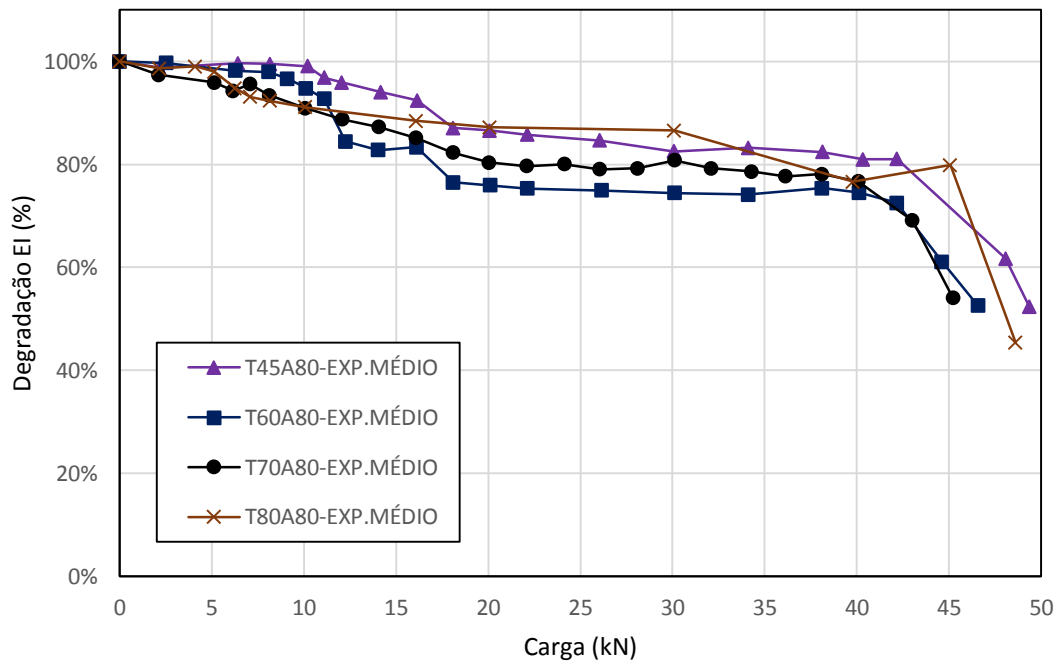


Figura 4.44 – Diagrama de Degradação da Rigidez Percentual dos modelos da série A80.

4.4.4 Discussão dos resultados

Com base nos Diagramas Carga-Flecha (Figuras 4.33, 4.37 e 4.41), nota-se que a resistência à compressão do concreto não alterou a carga de colapso das vigas, exceto para o modelo T80A50 (Figura 4.33). A única alteração mais significativa ocorreu para os modelos com concreto da série T45, que fissuraram para uma carga mais alta, em decorrência de uma maior resistência à tração do concreto.

Nos Diagramas Carga-Flecha obtidos com base nas características dinâmicas (Figuras 4.34, 4.38 e 4.42), percebe-se que os modelos são menos rígidos quando comparados aos resultados do Diagrama Carga-Flecha do ensaio de flexão na região correspondente ao Estádio I (Figuras 4.35, 4.39 e 4.43). Nota-se que os modelos foram capazes de detectar as variações das propriedades mecânicas do concreto, descrevendo o comportamento das vigas de forma congruente com o ensaio de flexão. Entretanto, as flechas calculadas com base nas características dinâmicas são maiores do que as observadas nos ensaios de flexão para um mesmo estágio de carga.

Com relação aos Diagramas de Degradação da Rigidez (Figuras 4.35, 4.39 e 4.43), nota-se que com auxílio das propriedades dinâmicas foi possível detectar a influência da variação das propriedades mecânicas do concreto de forma congruente ao ensaio flexão. Observa-se também uma tendência bem marcada nas curvas de degradação do material, ficando bem definido que a variação das características mecânicas do concreto não altera o comportamento da curva de degradação da rigidez.

Com relação à redução percentual da rigidez (Figuras 4.36, 4.40 e 4.44), pode-se observar que a degradação das propriedades mecânicas do concreto não implicou na mudança da rigidez residual do elemento, ficando esta compreendida entre 70% e 80% para a faixa de serviço e entre 40% e 60% para as cargas de colapso.

5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Neste trabalho foi investigada a degradação da rigidez de vigas de concreto armado submetidas a um processo de dano progressivo, sendo esta rigidez obtida a partir das frequências fundamentais.

Foram realizados ensaios de flexão e de determinação das características dinâmicas em um conjunto de 36 vigas de concreto armado, ambas na condição de contorno biapoada. Foi variada a resistência à compressão do concreto e a taxa de armadura. As vigas foram submetidas a ciclos progressivos de carga-descarga até atingir o colapso, sendo que para estágio de carga foram determinadas as frequências fundamentais e os deslocamentos no centro do vão.

Inicialmente foram avaliadas as alterações da frequência natural de vigas de concreto armado com diferentes resistências à compressão e taxas de armadura, quando submetidas a um processo de dano progressivo gerado por efeito mecânico. Em seguida, foi

desenvolvida uma metodologia para estimar a rigidez à flexão e os deslocamentos de vigas de concreto armado a partir das características dinâmicas. Também foram comparados os resultados experimentais de deslocamento com resultados numéricos e analíticos. Por fim, foi avaliada a influência da variação da resistência à compressão e da taxa de armadura sobre a rigidez de vigas de concreto armado, simulando a deterioração do concreto e das armaduras.

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que a execução dos ensaios, a forma de coleta e tratamento dos dados foram adequados e permitiram validar o método empregado para o desenvolvimento do presente trabalho.

De forma geral, os Diagramas Carga-Flecha dos modelos evidenciam uma menor dispersão que os Diagramas de Degradação da Rigidez. Entretanto, em ambos casos, pode-se observar uma tendência clara de comportamento, o que permite descrever estes fenômenos por meio da média de seus resultados.

Em se tratando da estimativa das flechas com base nas características dinâmicas, observa-se que estas são superiores as obtidas nos modelos experimentais para um mesmo nível de carga, enquanto as flechas estimadas com auxílio do DEFORME se mostraram mais próximas dos resultados experimentais. Por outro lado, as flechas estimadas com base nas características dinâmicas apresentam um comportamento mais coerente que o apresentado no modelo analítico. Também é importante destacar que o procedimento para estimativa de flechas com base nas características dinâmicas descreve de forma adequada os fenômenos que ocorrem em uma viga de concreto armado submetida à flexão simples, como por exemplo o efeito de *Tension Stiffening*. Com isso, pode-se afirmar que o uso das características dinâmicas para estimar os deslocamentos conduz a resultados satisfatórios.

Com relação à avaliação da degradação da rigidez, pode-se observar uma tendência bem marcada do fenômeno, ficando evidenciados os trechos que correspondem ao início da fissuração do concreto e escoamento do aço. Pode-se destacar também que para a faixa de serviço os elementos conservam cerca de 70% a 80% de sua rigidez inicial e quando atingem o colapso ainda mantêm cerca de 50% e 60% desta rigidez. Apesar da deterioração imposta aos elementos de concreto armado no presente trabalho ter sido causada exclusivamente por efeito mecânico, é importante destacar que a metodologia apresentada para estimar a rigidez à flexão pode ser utilizada independentemente da causa da deterioração.

A rigidez que o elemento ainda conserva é um aspecto de grande relevância pois em projetos de recuperação estrutural a rigidez residual do elemento é muitas vezes desprezada devido à dificuldade de mensurar esse parâmetro. Assim, pode-se concluir que o uso das características dinâmicas para estimar a rigidez residual pode contribuir de maneira significativa para a previsão do comportamento estrutural, permitindo a elaboração de projetos de recuperação seguros e econômicos.

Quanto à avaliação da influência da variação da taxa de armadura de tração sobre o comportamento de uma viga de concreto armado, mantendo-se as mesmas características do concreto, com o auxílio das características dinâmicas, conclui-se que com o aumento da taxa de armadura, a degradação da rigidez se deu para um nível de carga mais elevado. Entretanto, a variação da taxa de armadura não alterou o comportamento do Diagrama de Degradação da Rigidez, sendo que na faixa de serviço os elementos conservaram entre 70% e 80% de sua rigidez inicial e na região de colapso entre 40% a 60% desta rigidez.

Em se tratando da avaliação da influência da variação das características mecânicas do concreto sobre o comportamento de uma viga de concreto armado, mantendo-se constante a taxa de armadura, com o auxílio das características dinâmicas, pode-se concluir que a variação das propriedades mecânicas do concreto só produziu alteração na rigidez inicial dos elementos, sem causar alterações no comportamento do Diagrama de Degradação da Rigidez. Quando se avalia a faixa de serviço do elemento nota-se que a redução da rigidez inicial foi da ordem de 25%, enquanto que na região que corresponde ao colapso esta redução foi entorno de 50%.

De uma forma mais ampla, conclui-se que a estimativa da rigidez residual e de flechas de vigas de concreto armado por meio de sua frequência fundamental, mostra-se como uma metodologia adequada para avaliação da integridade destes elementos.

Cabe destacar que a frequência fundamental é uma característica do material, portanto, uma avaliação baseada na sua variação fornece uma ideia global do elemento e não apenas de uma seção em particular. Assim, a aplicação dessa metodologia não se restringe somente à investigação da integridade estrutural ou de deslocamentos, podendo ser expandida para diversas áreas da Engenharia Civil, como por exemplo o controle de qualidade de peças pré-moldadas de concreto armado e a avaliação da maturidade de elementos de concreto armado.

Em função deste contexto, considera-se que os objetivos do trabalho foram atingidos, na perspectiva de contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia que permite a avaliar a degradação da rigidez e estimar flechas de vigas de concreto armado por meio de suas características dinâmicas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho diversas questões foram suscitadas e investigadas, porém ainda há outras que merecem ser abordadas em trabalhos futuros, tais como:

- ✓ recuperar as vigas utilizadas no presente trabalho com o auxílio de diferentes técnicas, obter a rigidez do elemento recuperado, comparar com a rigidez obtida no estado íntegro inicial e submetê-lo novamente ao processo mecânico de dano progressivo;
- ✓ por meio de uma campanha experimental, avaliar o comportamento da degradação da rigidez de vigas de concreto armado com diferentes seções transversais e condições de contorno;
- ✓ avaliar a metodologia desenvolvida neste trabalho para determinar a rigidez residual em uma estrutura de concreto armado existente;
- ✓ desenvolver um modelo numérico de elementos finitos que seja capaz de representar a degradação da rigidez em vigas de concreto armado e comparar os seus resultados com aqueles obtidos no presente trabalho;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. F. de. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva.** 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ALMEIDA, S. F. de. **Análise experimental estática e dinâmica da rigidez de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado.** 2010. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

AMANCIO, D. T. **Avaliação da integridade estrutural de elementos de concreto armado a partir das propriedades modais obtidas por técnicas de excitações aleatórias e transientes.** 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil (Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.** Farmington Hills: ACI, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 215:** Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Philadelphia: ASTM, 2014.

_____. **C 597:** Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Philadelphia: ASTM, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI). **Ensaios não destrutivos e inspeção.** 2014. Disponível em: <www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&s=&friendly;=>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos - Ensaio de Tração: Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 20**: Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BRANSON, D. E.. Design procedures for computing deflections. **ACI Journal**. v. 65, n. 9. p. 730-742. set. 1968.

BREYSSEA, D.. Recent developments in analyses techniques for non-destructive testing and assessment of concrete properties. **Epj Web of Conferences**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 3001-3015, abr. 2011.

CARNEIRO, F. L.. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.

CLÍMACO, J. C. T. S.. **Estruturas de concreto armado: Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação.** 2. ed. Brasília: UNB, 2013. 410 p.

FONSECA, T. C. C. S.. **Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações vigapilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC).** 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GARAYGORDÓBIL, J. C. A.. **Dynamic assessment of structural building components.** 2003. 383 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia da Construção, Escola Técnica Superior D' Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica, Barcelona, 2003.

GEBREGZIABHIER, T. T.. **Durability problems of 20th century reinforced concrete heritage structures and their restorations.** 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Structural Analysis Of Monuments And Historical Constructions, Technical University Of Catalonia, Barcelona, 2008.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P.. Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. **Electronic Journal of Structural Engineering**. Melbourne, p. 97-105. jan. 2015.

HOLCIM. **Relatório de ensaios de cimento.** Pedro Leopoldo: Holcim, 2014.

LEISSA, A. W.; QATU, M. S.. **Vibrations of continuous Systems**. New York: Mc Graw Hill, 2011. 524 p.

LEONHARDT, F.. **Construções de Concreto: Verificação da Capacidade de Utilização**. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. V.4, 210p.

LIN, C. S.; SCORDELIS, A. C.. Nonlinear analysis of reinforced concrete shells of general form. **Journal of the Structural Division**. Proceedings of ASCE. V.101. p 523-538. 1975.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J.. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. West Conshohocken: ASTM, 2004.

MC-BAUCHEMIE. **Fichas Técnicas: Muraplast FK 830**. Vargem Grande Paulista: Mc-Bauchemie, 2014.

MEDEIROS, R. et al. A new methodology for Structural Health Monitoring applications. **1º International Conference on Structural Integrity**. .., p. 54-61. set. 2015.

MEDINA, A. S. L.. **Ensaio em pontes**. 2013. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Área de Especialização em Estruturas, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concrete: Microstructure, Properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 684 p.

NETO, E. G.. **Modelos discretizados de dimensão reduzida para análise dinâmica não-linear de vigas e pórticos planos**. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NÓBREGA, P. G. B. da. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. 2004. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PAES, J. L. R.. **Contribuição ao projeto de elementos pré-fabricados de argamassa armada com ênfase na durabilidade**. 1994. 299 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Área de Concentração em Produção Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1994.

PINHEIRO, L. M.. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: USP, 2007. 380 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Concrete Information: Types and Causes of Concrete Deterioration**. Skokie: PCA, 2002.

SALAWU, O. S.. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. **Engineering Structures**. London, p. 718-723. set. 1997.

SALGADO, R.; AYALA, G.; RANGEL, J. G.. Structural assessment of concrete beams strengthened with CFRP laminate strips by their dynamic response. **XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation**. Porto, p. 1-12. out. 2016.

STRAMANDINOLI, R. S. B; LA ROVERE, H. L.. An efficient tension-stiffening model for nonlinear analysis of reinforced concrete members. **Engineering Structures**. London, p. 2069-2080. jul. 2008

SHULL, P. J.. **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications**. New York: Marcel Dekker, 2002.

APÊNDICE **A**

RELATÓRIOS DE ENSAIO

Neste Apêndice são apresentados o conjunto de relatórios de ensaios dos modelos de viga desenvolvidos no presente trabalho, contendo os resultados experimentais, analíticos e numéricos, bem como os Diagramas Carga-Flecha e Diagramas de Degradação da Rigidez.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

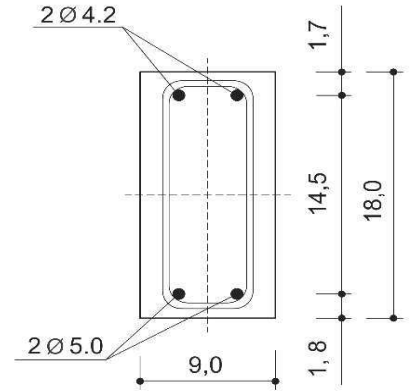
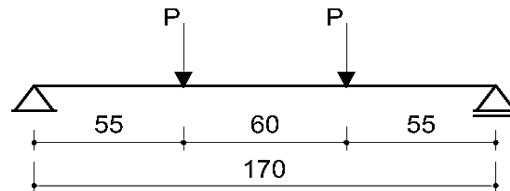
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A50

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 90,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,4
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 64,8
- . Fctm (MPa) = 4,4
- . Ec (MPa) = 30490,0



Corte A-A

Resultados

T45A50-R1					T45A50-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)
0,00	0,00	92,20	11,09	100,00%	0,00	0,00	91,62	10,95	100,00%
2,10	0,16	92,24	11,10	100,08%	2,37	0,17	91,09	10,82	98,85%
4,18	0,30	92,09	11,06	99,77%	4,11	0,30	91,63	10,95	100,03%
5,25	0,38	92,16	11,08	99,92%	5,09	0,38	90,17	10,61	96,86%
6,18	0,44	90,20	10,61	95,70%	6,15	0,46	89,42	10,43	95,25%
7,20	0,52	91,79	10,99	99,10%	7,17	0,54	91,07	10,82	98,79%
8,16	0,60	90,79	10,75	96,96%	8,18	0,63	90,11	10,59	96,73%
9,38	0,70	91,70	10,97	98,91%	9,73	0,77	89,43	10,43	95,27%
10,19	0,80	85,90	9,63	86,80%	10,21	0,89	84,28	9,26	84,61%
12,05	2,76	81,76	8,72	78,62%	12,12	2,13	79,78	8,30	75,82%
14,08	4,27	79,85	8,32	75,01%	14,04	4,51	78,63	8,06	73,65%
16,06	5,63	77,31	7,80	70,30%	16,13	5,98	74,62	7,26	66,34%
18,02	7,05	74,93	7,32	66,04%	18,02	7,61	62,88	5,16	47,10%
19,60	13,98	65,18	5,54	49,98%	19,50	14,13	62,75	5,14	46,91%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T45A50

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T45A50-R3					T45A50-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	89,78	10,51	100,00%	0,00	0,00	91,20	10,85	100,00%
2,05	0,18	90,13	10,60	100,79%	2,17	0,17	91,16	10,84	99,90%
4,13	0,33	89,42	10,43	99,19%	4,14	0,31	91,05	10,81	99,66%
5,34	0,42	88,07	10,12	96,22%	5,23	0,39	90,13	10,60	97,67%
6,11	0,48	88,66	10,25	97,52%	6,15	0,46	89,43	10,43	96,14%
7,19	0,57	87,74	10,04	95,50%	7,19	0,54	90,20	10,61	97,81%
8,35	0,66	88,91	10,31	98,07%	8,23	0,63	89,94	10,55	97,24%
9,14	0,74	88,69	10,26	97,57%	9,42	0,74	89,94	10,55	97,25%
10,28	1,31	86,82	9,83	93,52%	10,23	1,00	85,67	9,57	88,23%
12,01	2,56	87,54	10,00	95,07%	12,06	2,49	83,02	8,99	82,87%
14,36	4,83	73,92	7,13	67,78%	14,16	4,54	77,47	7,83	72,15%
16,07	5,67	72,73	6,90	65,63%	16,09	5,76	74,89	7,32	67,42%
18,03	7,41	69,72	6,34	60,30%	18,02	7,35	69,18	6,24	57,53%
19,57	14,09	59,88	4,68	44,48%	19,56	14,07	62,61	5,11	47,12%

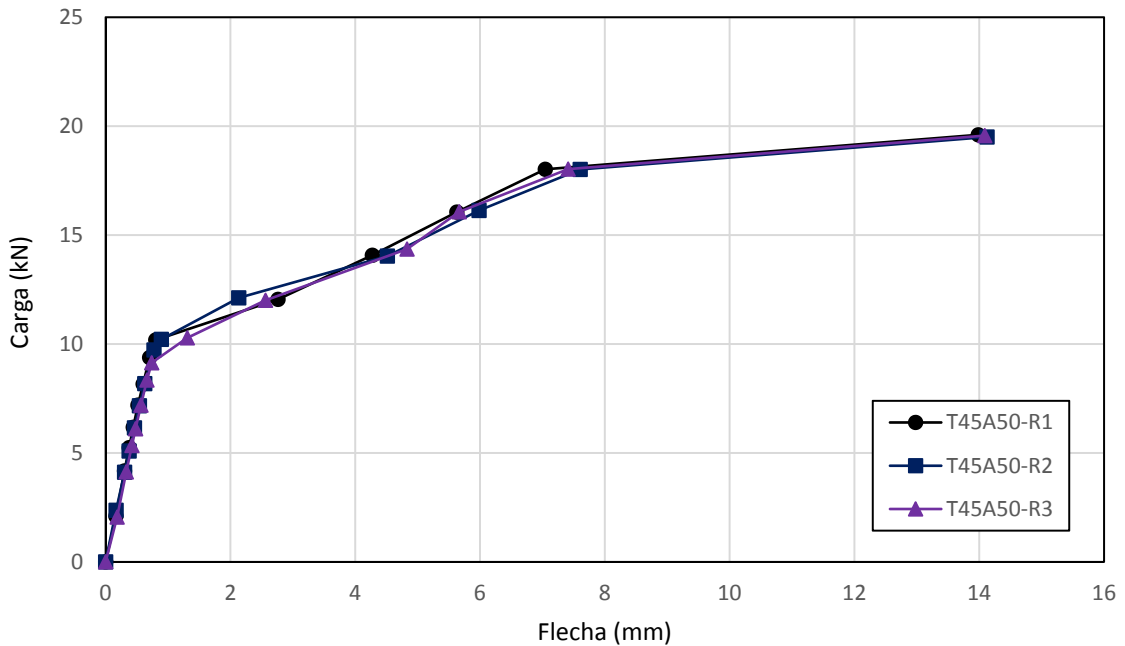


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T45A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A50

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

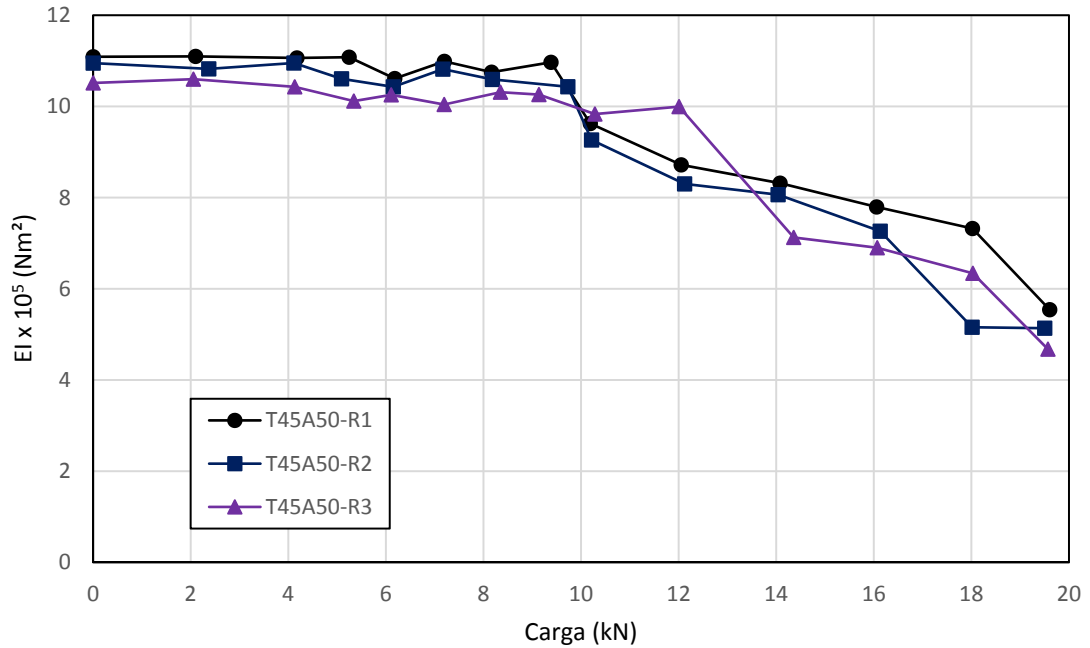


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T45A50

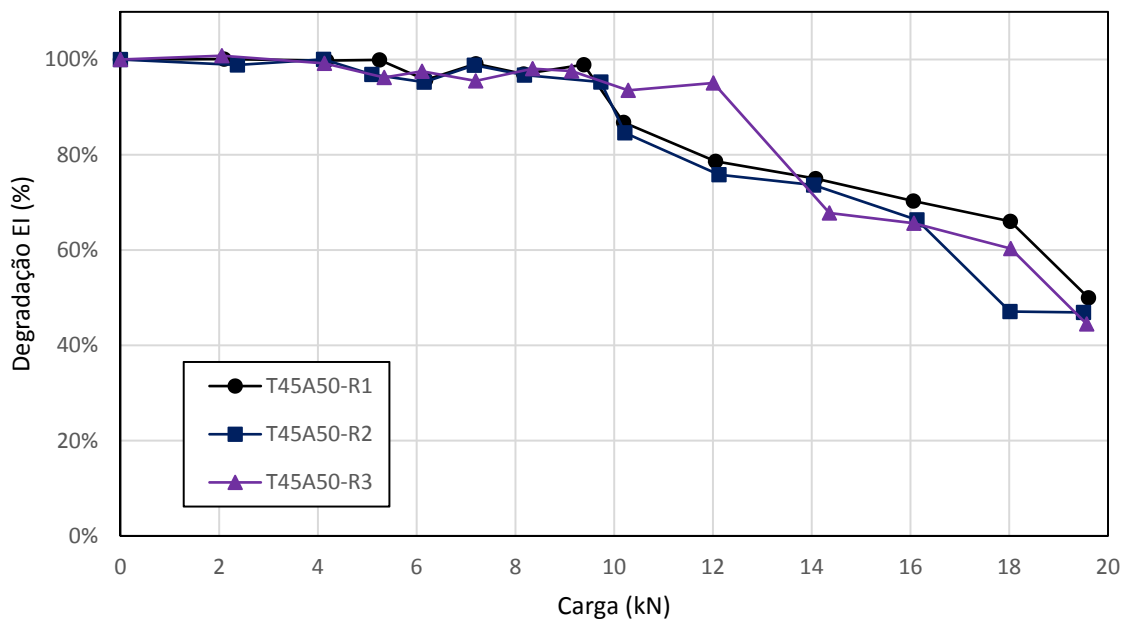


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T45A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A50

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T45A50-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
12,32	1,51
14,16	2,47
16,09	3,81
18,02	5,49
19,56	7,02

T45A50-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,17	0,34
4,14	0,65
5,23	0,84
6,15	1,01
7,19	1,16
8,23	1,33
9,42	1,53
10,23	2,59
12,06	3,20
14,16	4,15
16,09	4,96
18,02	6,28
19,56	8,00

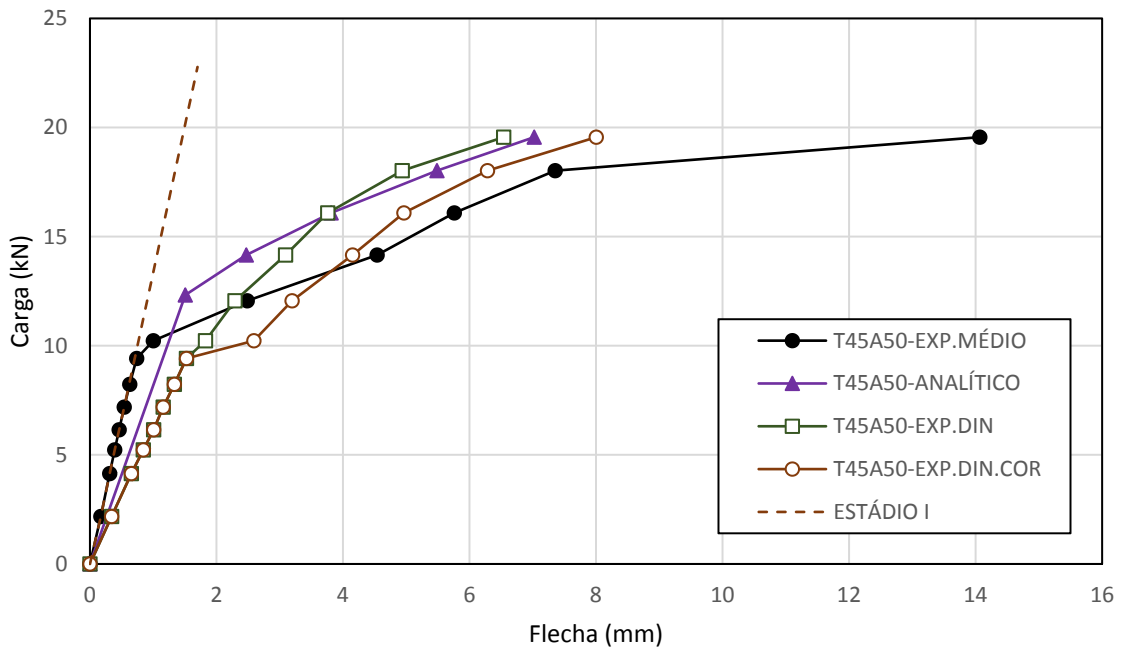


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A50

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

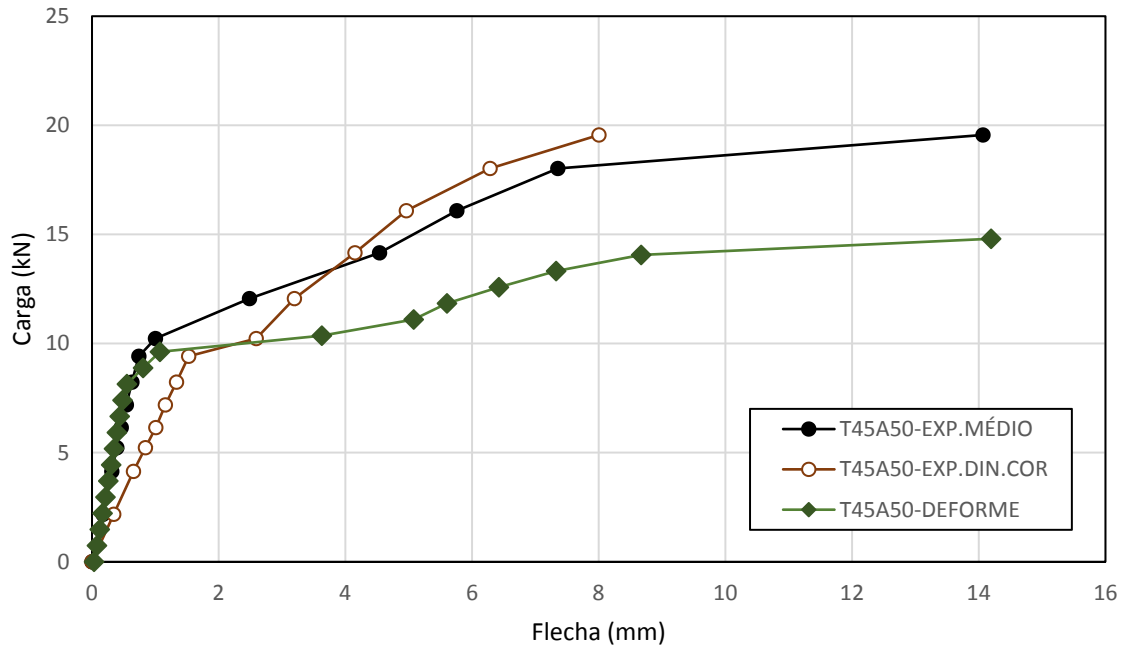


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

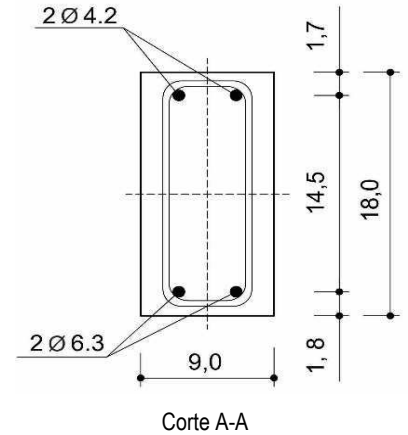
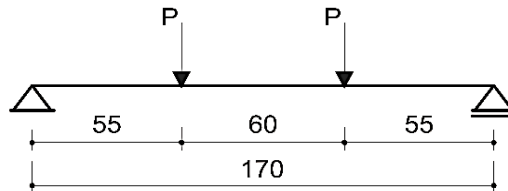
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T45A63

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,6
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 64,8
- . Fctm (MPa) = 4,4
- . Ec (MPa) = 30490,0



Resultados

T45A63-R1					T45A63-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)
0,00	0,00	90,15	10,59	100,00%	0,00	0,00	90,26	10,62	100,00%
2,04	0,16	90,93	10,78	101,74%	2,08	0,16	90,11	10,58	99,67%
4,12	0,28	90,88	10,77	101,63%	4,09	0,28	90,49	10,67	100,50%
6,17	0,41	90,74	10,73	101,32%	6,43	0,44	90,42	10,66	100,36%
7,19	0,48	90,74	10,73	101,32%	7,19	0,49	90,47	10,67	100,48%
8,17	0,55	90,51	10,68	100,81%	8,19	0,56	90,64	10,71	100,84%
9,20	0,65	89,50	10,44	98,58%	9,17	0,65	90,47	10,67	100,48%
10,14	0,76	89,45	10,43	98,47%	10,09	0,79	90,01	10,56	99,44%
12,11	1,51	85,30	9,48	89,53%	12,09	1,69	88,75	10,27	96,68%
14,10	2,84	82,89	8,96	84,54%	14,04	2,72	82,08	8,78	82,70%
16,06	3,69	82,12	8,79	82,98%	16,09	3,53	81,87	8,74	82,27%
18,03	4,46	81,69	8,70	82,11%	18,00	4,20	80,51	8,45	79,56%
20,02	5,24	80,61	8,47	79,96%	20,08	5,05	80,65	8,48	79,83%
22,04	5,93	80,28	8,40	79,31%	22,08	5,76	80,24	8,39	79,03%
24,02	6,62	80,46	8,44	79,66%	24,10	6,43	79,49	8,24	77,55%
26,00	7,65	78,08	7,95	75,01%	26,07	7,10	80,63	8,48	79,81%
26,52	8,92	72,93	6,93	65,46%	28,38	7,98	74,01	7,14	67,23%
26,99	14,61	66,57	5,78	54,53%	29,70	15,04	66,72	5,80	54,64%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T45A63

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T45A63-R3					T45A63-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	91,09	10,82	100,00%	0,00	0,00	90,50	10,68	100,00%
2,08	0,16	91,18	10,84	100,19%	2,07	0,16	90,74	10,73	100,53%
4,13	0,28	91,02	10,80	99,83%	4,11	0,28	90,79	10,75	100,65%
6,16	0,42	90,70	10,72	99,14%	6,25	0,42	90,62	10,70	100,27%
7,24	0,49	90,39	10,65	98,46%	7,21	0,49	90,53	10,68	100,07%
8,28	0,57	90,71	10,73	99,17%	8,21	0,56	90,62	10,70	100,27%
9,16	0,64	90,00	10,56	97,61%	9,18	0,64	89,99	10,56	98,88%
10,16	0,75	90,82	10,75	99,39%	10,13	0,77	90,09	10,58	99,10%
11,23	1,17	88,53	10,22	94,45%	11,81	1,45	87,52	9,99	93,53%
12,11	1,46	86,32	9,71	89,80%	13,42	2,34	83,76	9,15	85,67%
14,09	2,49	83,49	9,09	84,01%	15,42	3,24	82,49	8,87	83,09%
16,06	3,50	82,94	8,97	82,90%	17,36	4,05	81,71	8,70	81,52%
18,08	4,19	81,15	8,58	79,36%	19,40	4,83	80,80	8,51	79,72%
20,06	4,95	81,09	8,57	79,25%	21,39	5,54	80,54	8,46	79,20%
22,07	5,65	80,82	8,51	78,72%	23,40	6,23	80,26	8,40	78,64%
24,10	6,39	80,34	8,41	77,78%	25,39	7,05	79,68	8,28	77,52%
25,76	7,19	74,06	7,15	66,09%	26,89	8,03	73,67	7,07	66,26%
26,73	15,04	66,86	5,83	53,87%	27,80	14,90	66,72	5,80	54,35%

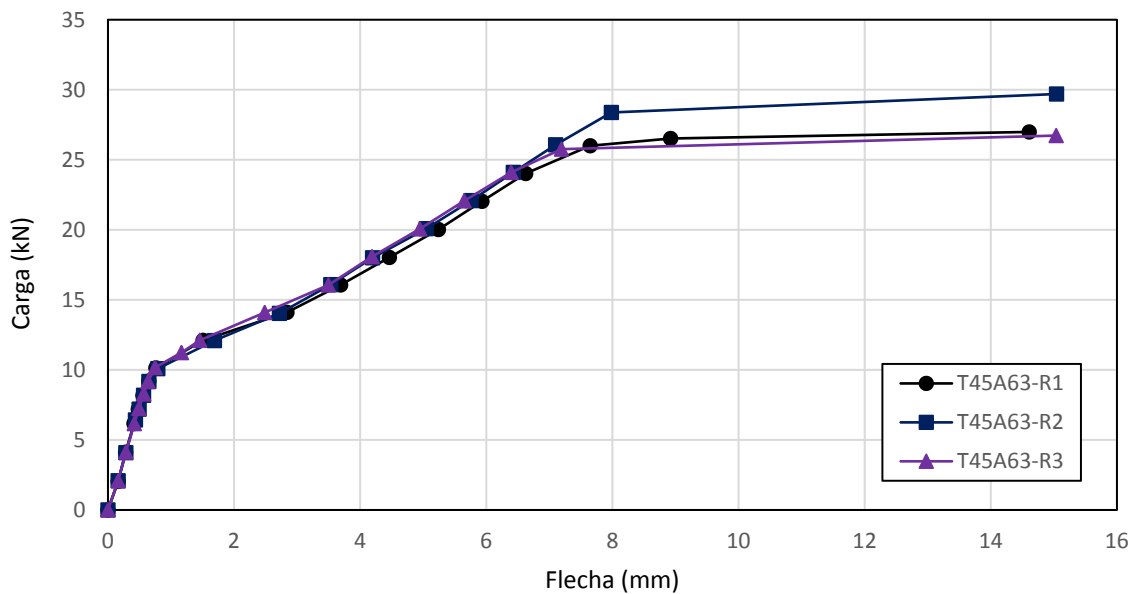


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T45A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A63

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

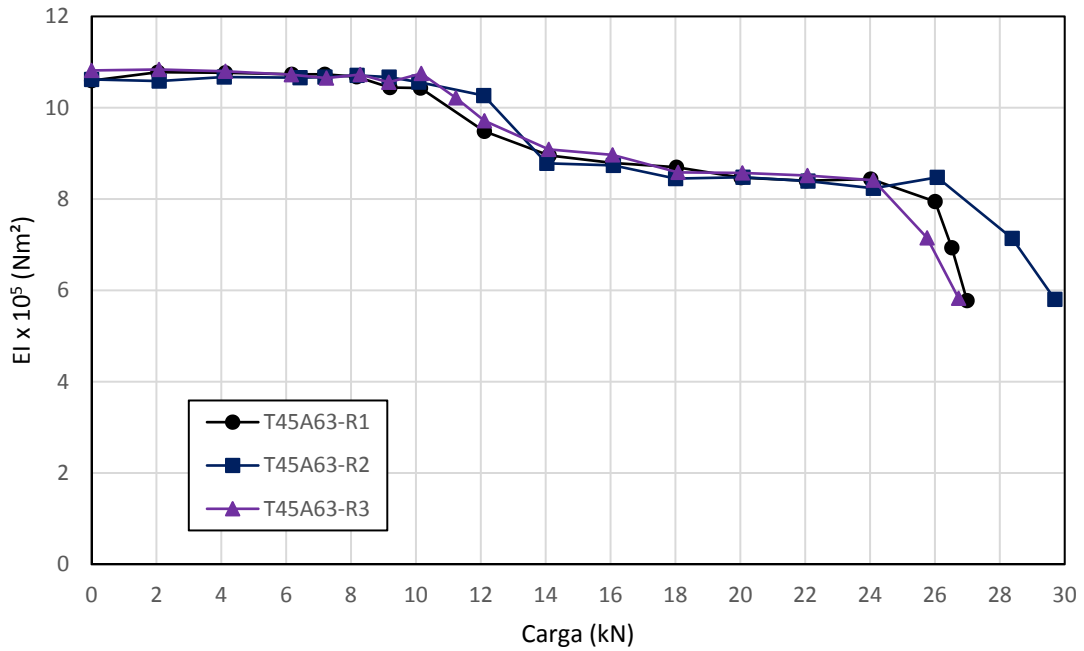


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T45A63

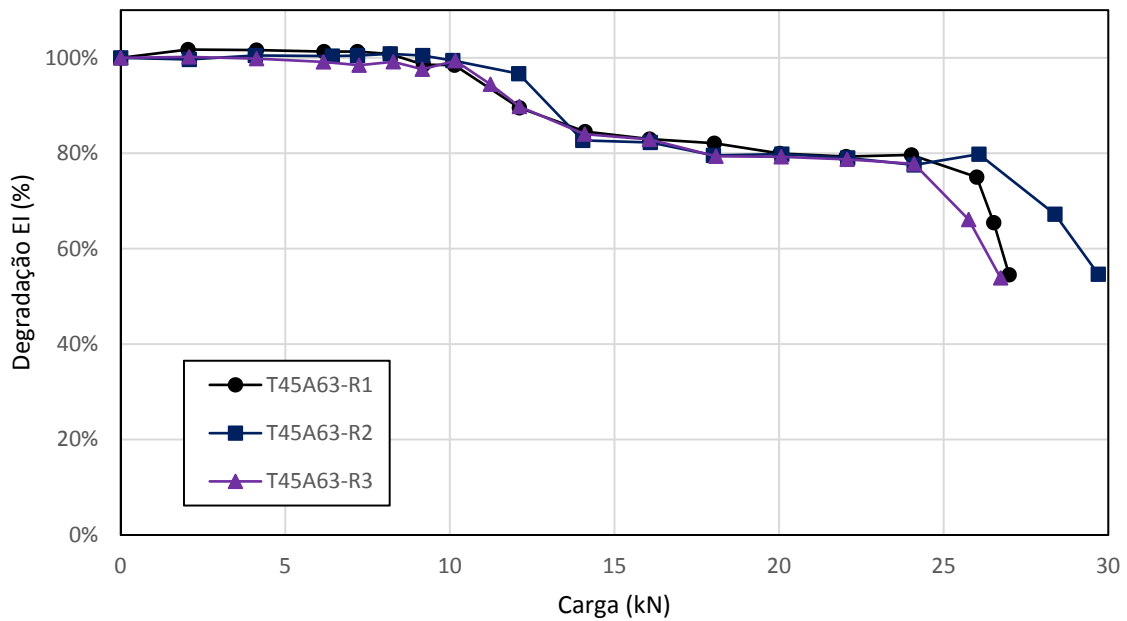


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T45A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A63

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T45A63-ANALÍTICO		T45A63-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
12,50	1,51	2,07	0,33
13,42	1,92	4,11	0,65
15,42	3,02	6,25	1,00
17,36	4,33	7,21	1,15
19,40	5,90	8,21	1,31
21,39	7,58	9,18	1,49
23,40	9,36	10,13	1,64
25,39	11,17	11,81	2,81
26,89	12,54	13,42	3,41
27,80	13,38	15,42	4,00
		17,36	4,58
		19,40	5,20
		21,39	5,76
		23,40	6,33
		25,39	6,95
		26,89	8,30
		27,80	10,06

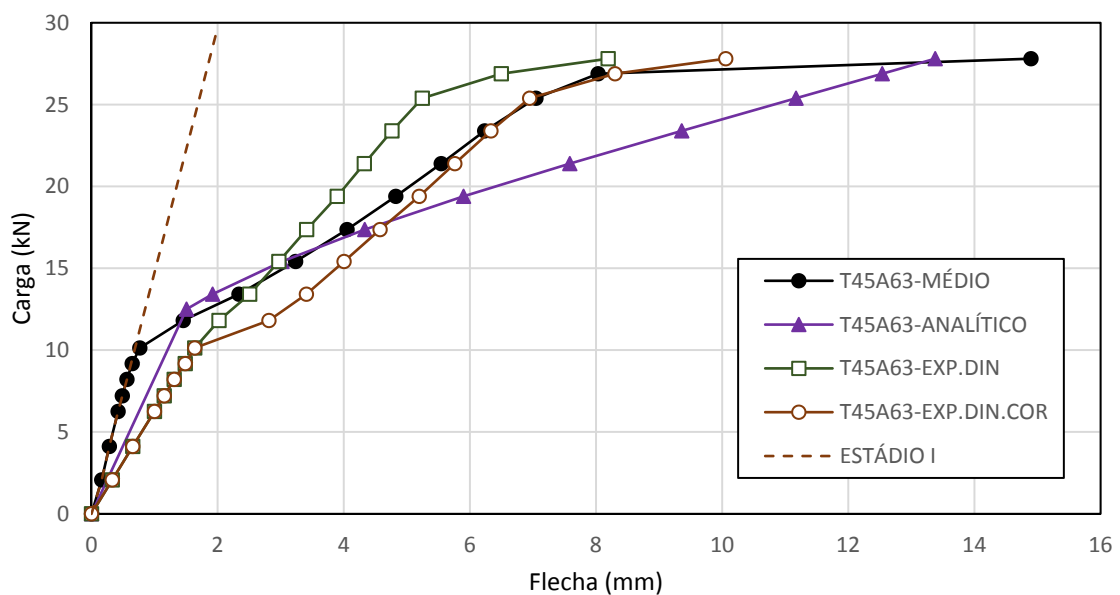


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A63

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

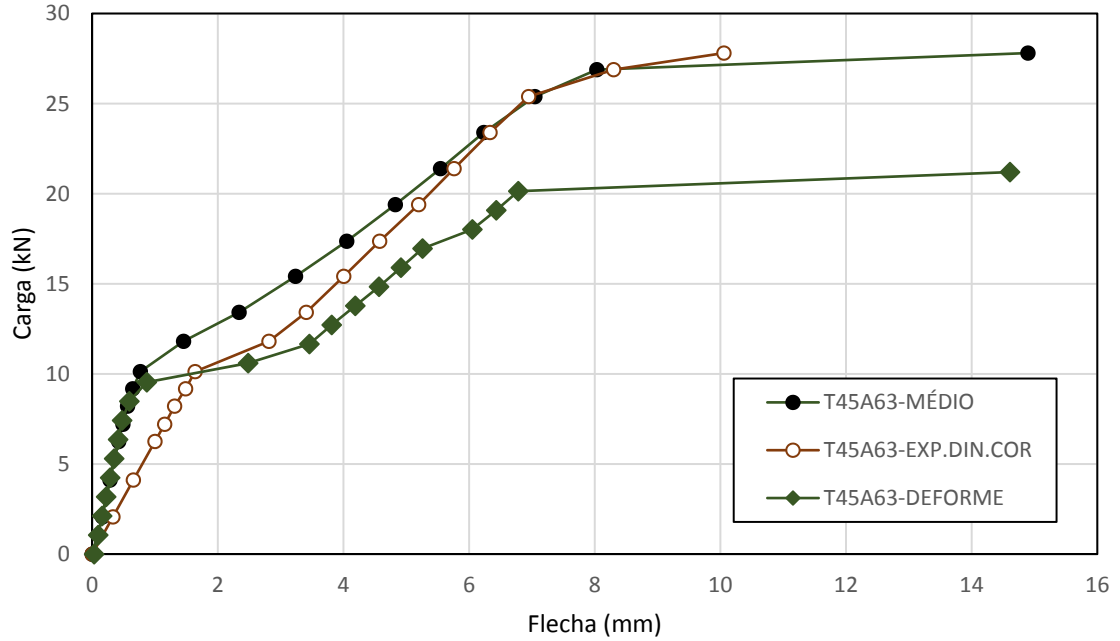


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

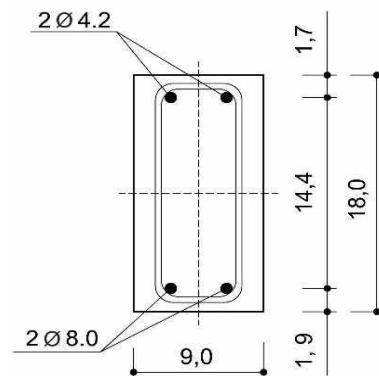
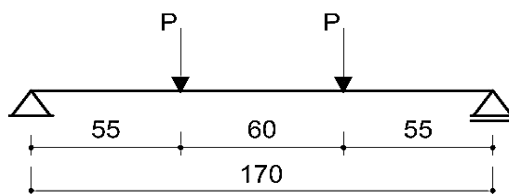
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A80

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 1,0
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 64,8
- . Fctm (MPa) = 4,4
- . Ec (MPa) = 30490,0



Corte A-A

Resultados

T45A80-R1					T45A80-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	91,27	10,86	100,00%	0,00	0,00	89,18	10,37	100,00%
2,10	0,13	89,95	10,55	97,12%	2,26	0,18	89,62	10,47	100,99%
6,83	0,45	90,16	10,60	97,59%	6,29	0,43	90,17	10,60	102,23%
8,17	0,55	89,14	10,36	95,39%	8,22	0,57	90,21	10,61	102,33%
10,16	0,73	89,10	10,35	95,31%	10,18	0,75	90,34	10,64	102,62%
11,07	0,89	88,13	10,13	93,24%	11,27	0,97	88,85	10,29	99,27%
12,00	1,09	88,14	10,13	93,27%	12,11	1,24	88,41	10,19	98,28%
14,08	1,75	87,87	10,07	92,68%	14,22	1,86	86,93	9,86	95,03%
16,13	2,38	86,03	9,65	88,84%	16,05	2,48	88,43	10,20	98,34%
18,06	2,94	85,66	9,57	88,09%	18,11	3,10	80,69	8,49	81,87%
20,06	3,46	85,37	9,50	87,49%	20,09	3,74	80,89	8,53	82,27%
22,13	3,98	84,25	9,26	85,21%	22,19	4,32	80,82	8,52	82,14%
26,04	4,93	83,67	9,13	84,04%	26,04	5,31	80,19	8,39	80,87%
30,03	5,98	83,68	9,13	84,07%	30,06	6,44	78,89	8,12	78,27%
34,16	7,05	83,93	9,19	84,58%	34,14	7,56	79,97	8,34	80,41%
38,12	8,11	83,78	9,15	84,27%	38,16	8,57	79,02	8,14	78,52%
40,58	8,81	82,60	8,90	81,90%	40,12	9,13	78,38	8,01	77,25%
42,15	9,34	82,66	8,91	82,03%	42,07	9,68	77,58	7,85	75,69%
46,90	14,86	69,12	6,23	57,35%	47,12	14,79	71,71	6,71	64,67%
48,76	20,56	64,20	5,37	49,48%	47,25	19,81	65,64	5,62	54,18%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A80

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T45A80-R3					T45A80-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	88,90	10,31	100,00%	0,00	0,00	89,78	10,51	100,00%
2,10	0,13	88,11	10,12	98,22%	2,15	0,14	89,22	10,38	98,76%
6,18	0,43	88,46	10,20	99,01%	6,44	0,44	89,59	10,47	99,58%
8,11	0,57	89,29	10,40	100,88%	8,17	0,56	89,55	10,46	99,48%
10,30	0,78	88,65	10,25	99,43%	10,21	0,75	89,36	10,41	99,07%
10,96	0,95	88,04	10,11	98,08%	11,10	0,93	88,34	10,18	96,82%
12,06	1,26	87,21	9,92	96,24%	12,06	1,20	87,92	10,08	95,90%
14,22	1,93	86,37	9,73	94,38%	14,17	1,84	87,06	9,88	94,02%
16,24	2,54	84,47	9,30	90,28%	16,14	2,47	86,31	9,71	92,42%
18,13	3,04	84,99	9,42	91,40%	18,10	3,03	83,78	9,15	87,08%
20,11	3,60	84,38	9,28	90,08%	20,09	3,60	83,54	9,10	86,59%
22,10	4,15	84,38	9,28	90,08%	22,14	4,15	83,15	9,02	85,77%
26,12	5,16	83,92	9,18	89,12%	26,07	5,13	82,59	8,90	84,63%
30,14	6,19	82,14	8,80	85,37%	30,08	6,20	81,57	8,68	82,55%
34,11	7,24	81,82	8,73	84,71%	34,14	7,28	81,91	8,75	83,23%
38,13	8,29	81,69	8,70	84,43%	38,14	8,32	81,50	8,66	82,40%
40,31	8,92	81,41	8,64	83,87%	40,34	8,95	80,80	8,51	80,99%
42,34	9,49	82,22	8,82	85,54%	42,18	9,50	80,82	8,52	81,04%
50,23	15,14	70,75	6,53	63,34%	48,08	14,93	70,53	6,49	61,71%
52,12	20,19	65,08	5,52	53,59%	49,38	20,19	64,97	5,50	52,37%



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A80

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

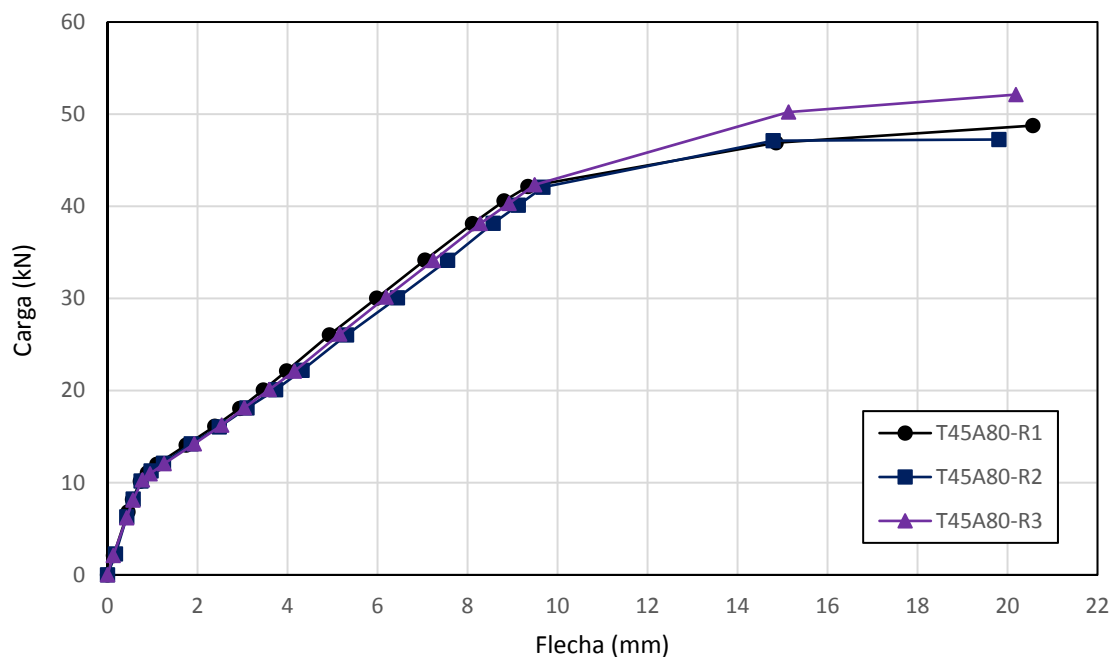


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T45A80

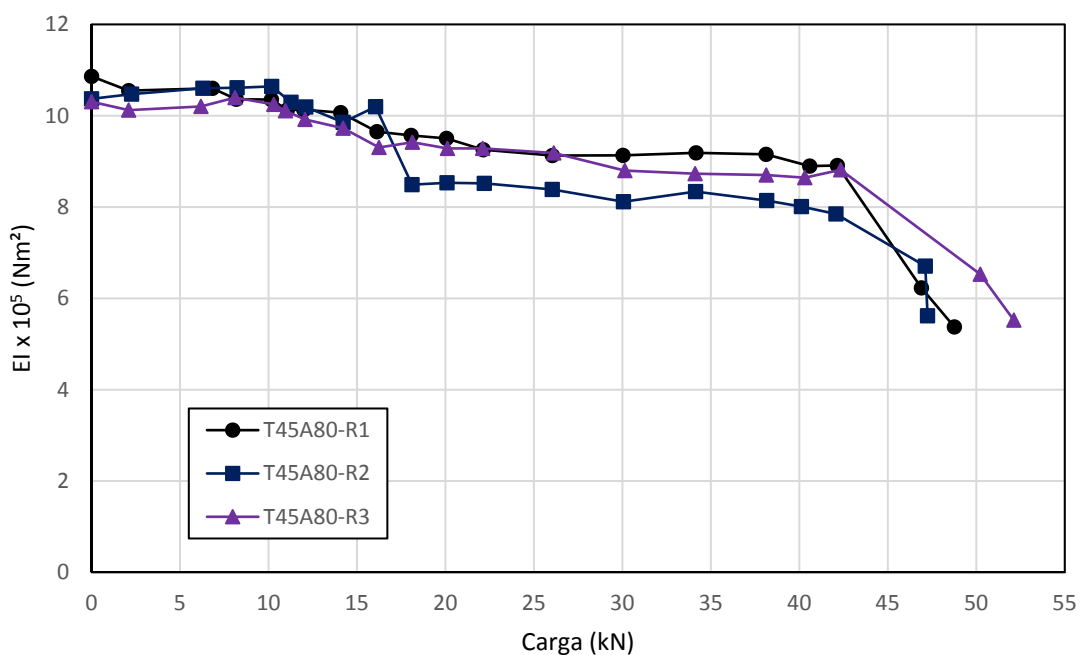


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T45A80



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T45A80

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

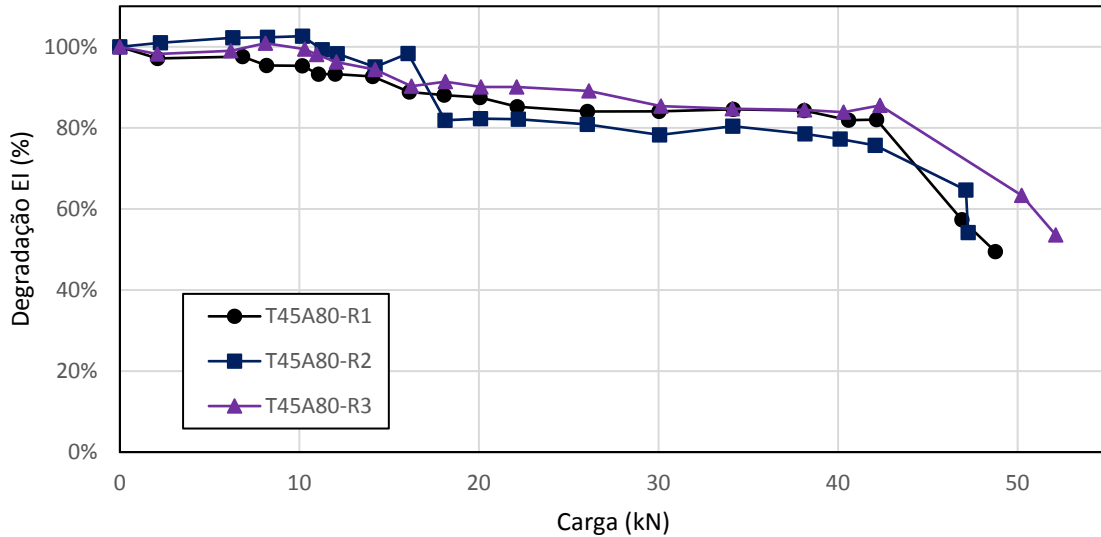


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T45A80

T45A80-ANALÍTICO		T45A80-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
12,76	1,51	2,15	0,35
14,17	2,10	6,44	1,05
16,14	3,07	8,17	1,34
18,10	4,17	10,21	1,68
20,09	5,36	11,10	1,86
22,14	6,64	12,06	2,92
26,07	9,11	14,17	3,48
30,08	11,56	16,14	4,01
34,14	13,95	18,10	4,69
38,14	16,20	20,09	5,22
40,34	17,41	22,14	5,80
42,18	18,41	26,07	6,89
48,08	21,52	30,08	8,10
49,38	22,19	34,14	9,14
		38,14	10,28
		40,34	11,02
		42,18	11,52
		48,08	16,15
		49,38	18,90



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T45A80

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

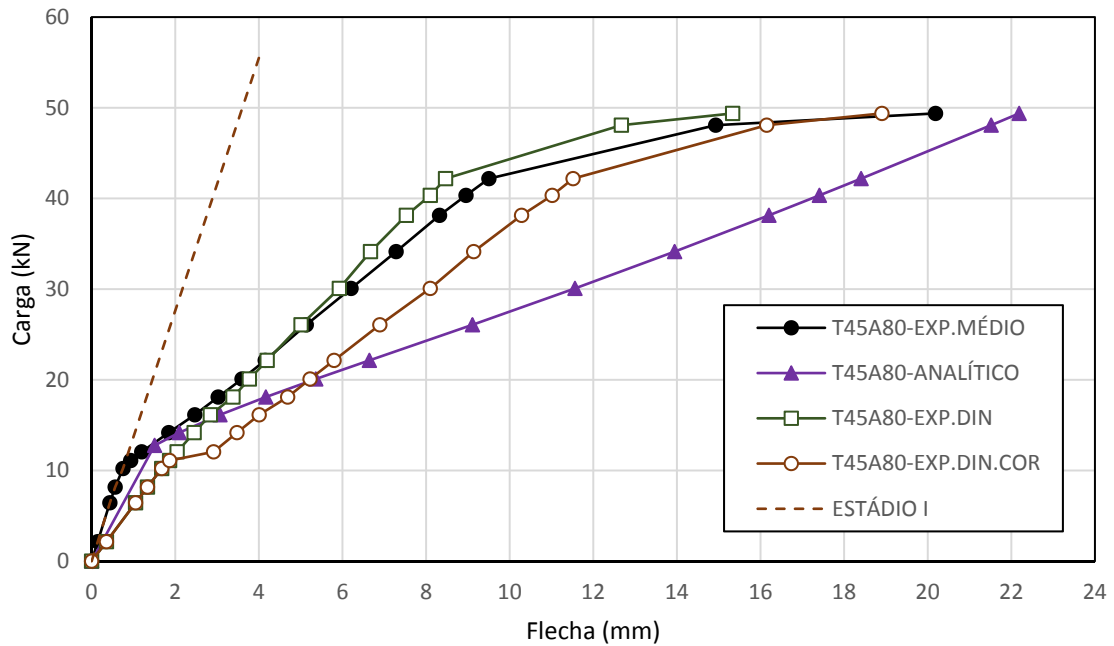


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental

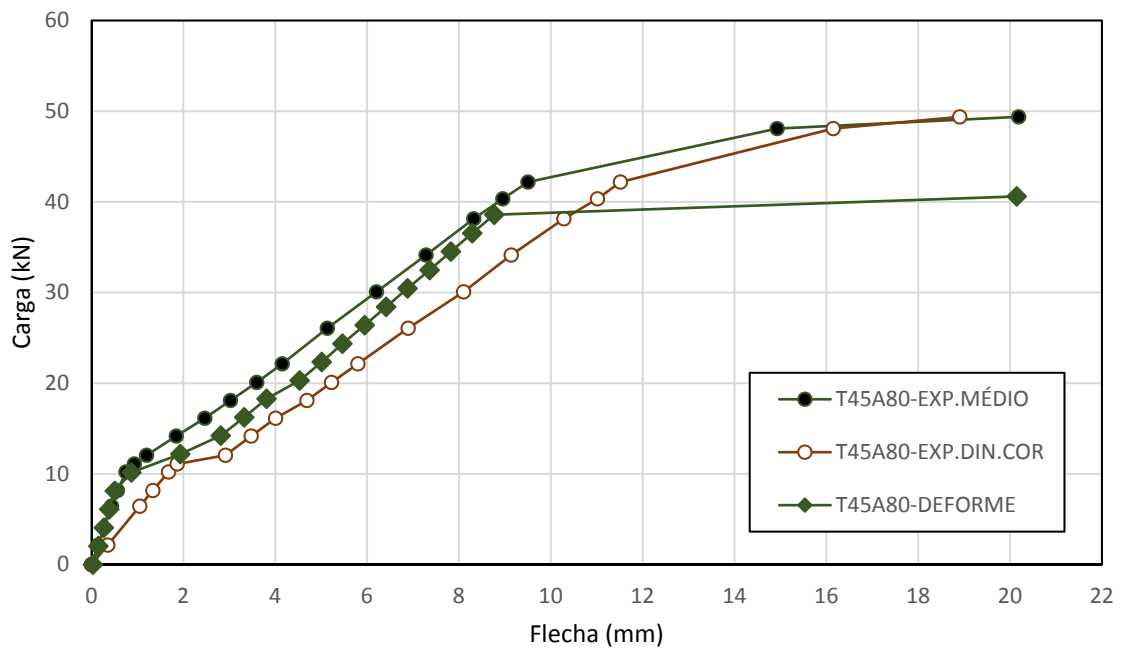


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

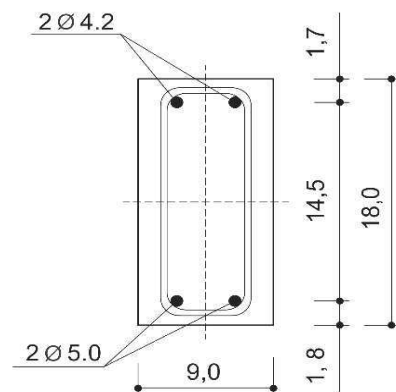
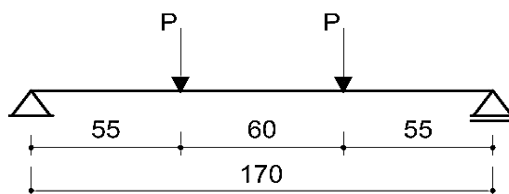
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A50

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 90,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,4
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 50,2
- . Fctm (MPa) = 3,6
- . Ec (MPa) = 26880,0



Corte A-A

Resultados

T60A50-R1					T60A50-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	86,74	9,71	100,00%	0,00	0,00	90,27	10,52	100,00%
2,05	0,12	87,39	9,86	101,49%	2,05	0,16	90,04	10,46	99,48%
4,33	0,29	86,90	9,74	100,35%	4,10	0,32	90,70	10,62	100,95%
5,48	0,38	86,12	9,57	98,55%	5,16	0,40	90,41	10,55	100,31%
6,44	0,47	87,00	9,77	100,58%	6,16	0,49	90,45	10,56	100,39%
7,12	0,54	86,62	9,68	99,71%	7,16	0,59	89,05	10,23	97,31%
8,13	0,87	85,37	9,41	96,86%	8,03	0,72	82,84	8,86	84,21%
8,84	1,24	84,12	9,13	94,05%	8,71	1,11	82,04	8,69	82,60%
10,06	2,79	78,98	8,05	82,90%	10,06	2,22	78,72	8,00	76,04%
12,08	3,91	78,24	7,90	81,35%	12,06	4,05	74,29	7,12	67,73%
14,11	5,22	77,23	7,70	79,27%	14,04	5,21	74,48	7,16	68,08%
16,07	6,44	78,33	7,92	81,53%	15,97	6,59	73,82	7,03	66,86%
18,03	8,09	75,27	7,31	75,28%	18,01	8,65	69,19	6,18	58,75%
19,50	14,08	57,55	4,27	44,01%	19,31	14,08	56,63	4,14	39,35%
19,61	15,28	56,48	4,12	42,39%	19,43	14,62	54,30	3,80	36,18%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T60A50

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T60A50-R3					T60A50-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	91,78	10,87	100,00%	0,00	0,00	89,60	10,36	100,00%
2,04	0,22	91,92	10,90	100,32%	2,04	0,17	89,78	10,40	100,41%
4,10	0,38	91,22	10,74	98,79%	4,18	0,33	89,61	10,36	100,02%
5,15	0,46	91,21	10,74	98,76%	5,26	0,42	89,24	10,28	99,21%
6,15	0,55	91,24	10,74	98,84%	6,25	0,50	89,56	10,35	99,92%
7,19	0,65	90,54	10,58	97,32%	7,16	0,59	88,74	10,16	98,09%
8,15	1,03	89,53	10,34	95,16%	8,10	0,87	85,91	9,53	91,94%
9,10	1,25	88,62	10,14	93,25%	8,88	1,20	84,93	9,31	89,85%
10,08	2,53	84,19	9,15	84,15%	10,07	2,51	80,63	8,39	80,98%
12,07	4,33	75,64	7,38	67,93%	12,07	4,10	76,06	7,47	72,06%
14,05	5,39	75,88	7,43	68,36%	14,07	5,27	75,87	7,43	71,70%
16,08	6,55	73,10	6,90	63,44%	16,04	6,53	75,08	7,27	70,22%
18,02	8,58	67,89	5,95	54,73%	18,02	8,44	70,78	6,47	62,41%
19,81	14,05	59,73	4,60	42,36%	19,54	14,07	57,97	4,34	41,86%
19,82	14,73	58,19	4,37	40,20%	19,62	14,88	56,32	4,09	39,51%

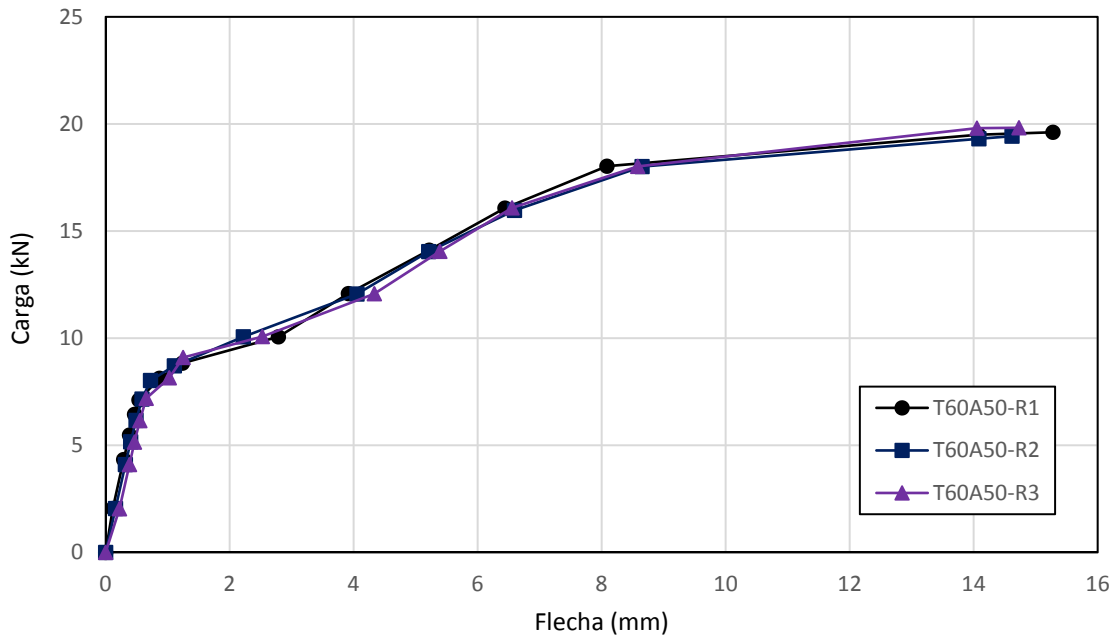


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A50

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

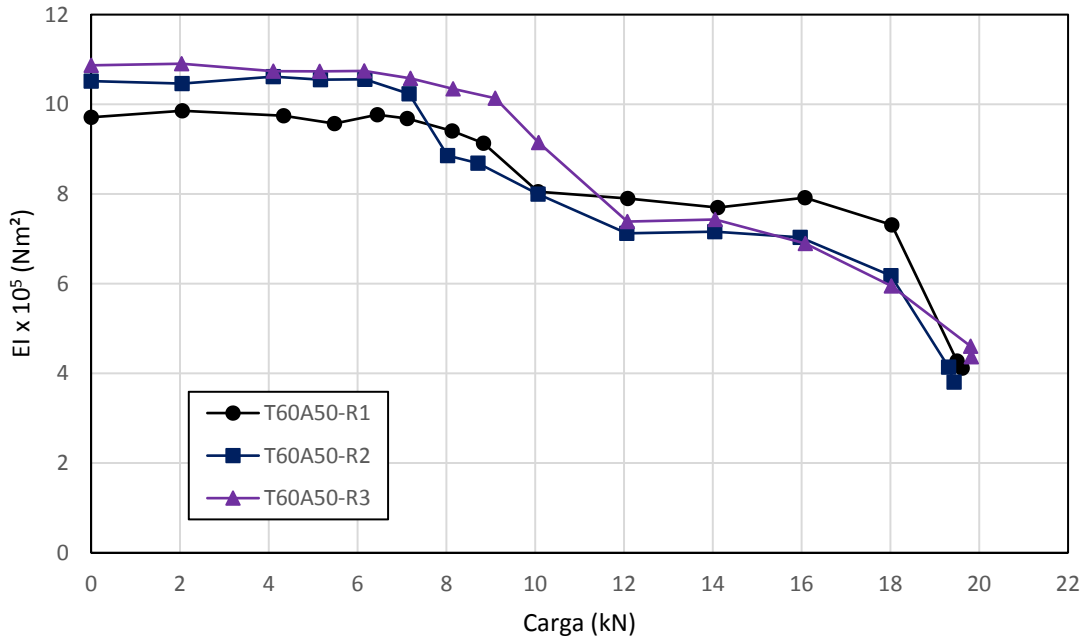


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T60A50

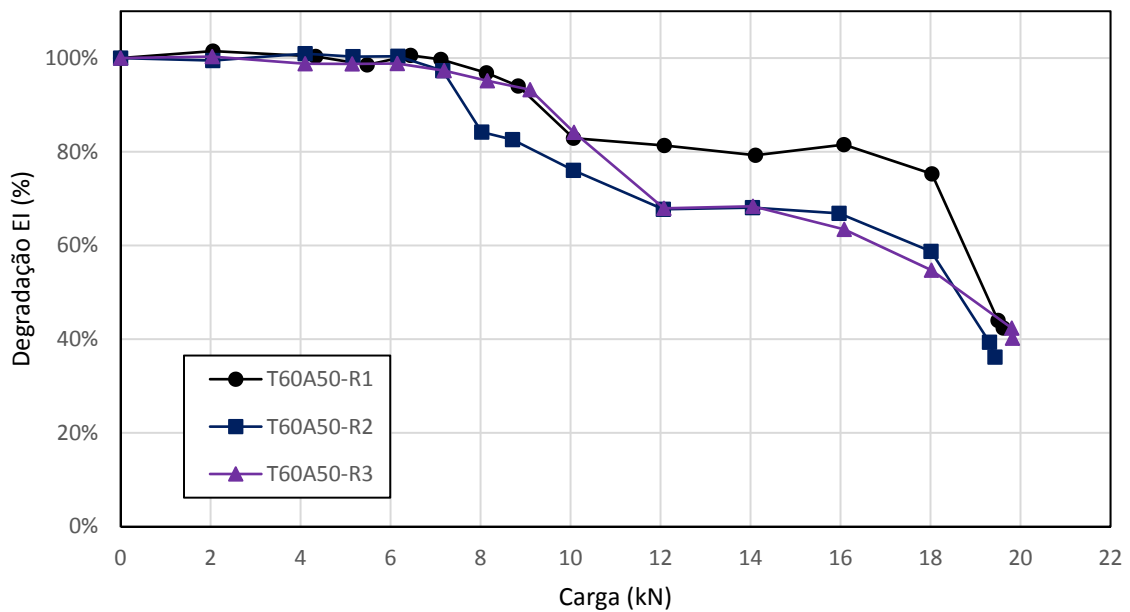


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T60A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A50

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T60A50-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
10,18	1,40
12,07	2,54
14,07	4,19
16,04	6,22
18,02	8,56
19,54	10,49
19,62	10,60

T60A50-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,04	0,34
4,18	0,69
5,26	0,88
6,25	1,03
7,16	1,20
8,10	2,12
8,88	2,36
10,07	2,87
12,07	3,75
14,07	4,39
16,04	5,08
18,02	6,24
19,54	9,30
19,62	9,80

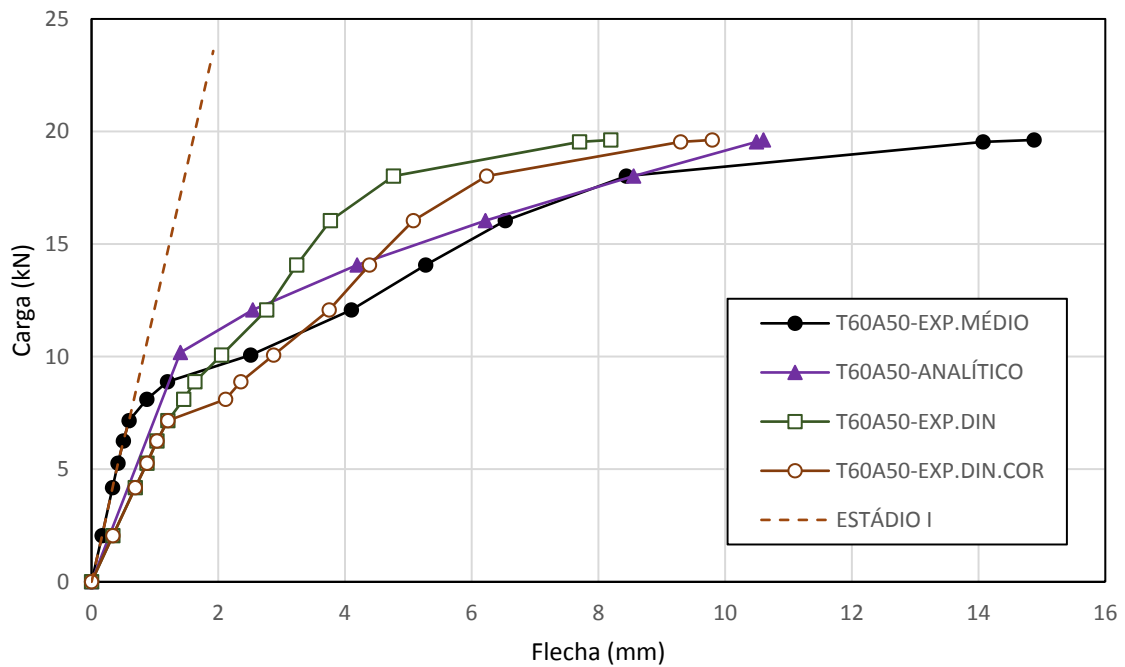


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A50

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

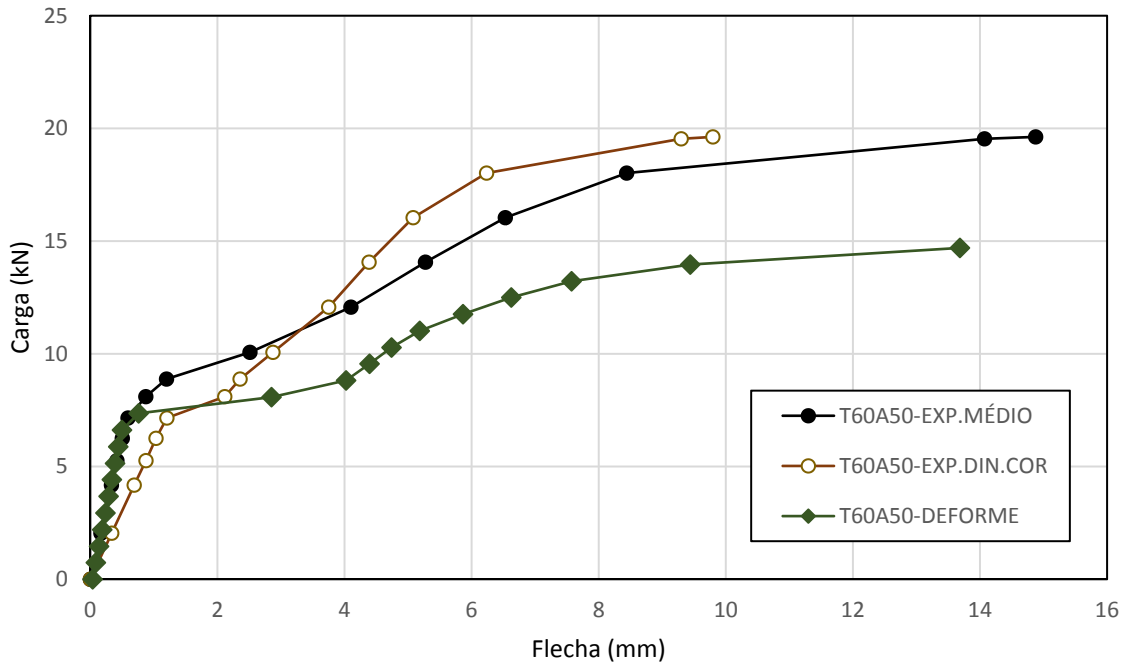


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

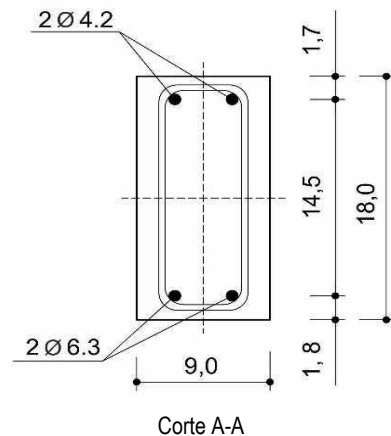
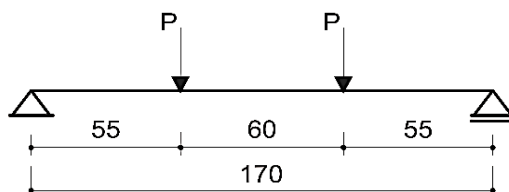
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A63

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,6
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 50,2
- . Fctm (MPa) = 3,6
- . Ec (MPa) = 26880,0



Resultados

T60A63-R1					T60A63-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	87,65	9,84	100,00%	0,00	0,00	86,62	9,61	100,00%
2,24	0,16	87,93	9,90	100,63%	2,08	0,20	86,78	9,65	100,37%
4,12	0,30	87,33	9,77	99,27%	4,09	0,35	87,07	9,71	101,05%
6,11	0,49	87,59	9,83	99,86%	6,16	0,53	87,56	9,82	102,19%
7,12	0,59	87,25	9,75	99,08%	7,21	0,65	87,92	9,90	103,02%
8,01	0,81	87,05	9,71	98,63%	8,14	0,79	87,19	9,74	101,31%
9,07	1,12	77,53	7,70	78,25%	9,03	1,16	86,90	9,67	100,64%
10,11	1,88	76,64	7,52	76,45%	9,99	1,73	78,11	7,82	81,33%
11,97	2,87	76,06	7,41	75,30%	12,04	2,77	80,53	8,31	86,44%
14,09	3,89	76,16	7,43	75,50%	14,04	3,55	78,34	7,86	81,80%
16,14	4,68	76,42	7,48	76,02%	16,04	4,36	78,79	7,95	82,74%
18,10	5,37	77,41	7,68	77,99%	18,04	5,10	78,78	7,95	82,72%
20,09	6,08	76,41	7,48	76,00%	20,02	5,84	77,80	7,75	80,67%
22,09	6,81	77,33	7,66	77,84%	22,08	6,60	77,16	7,63	79,34%
24,11	7,53	76,89	7,57	76,95%	24,02	7,32	78,44	7,88	82,01%
26,02	11,86	69,47	6,18	62,81%	26,17	10,03	72,58	6,75	70,21%
26,64	14,53	66,24	5,62	57,12%	26,40	15,08	65,10	5,43	56,48%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T60A63

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T60A63-R3					T60A63-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	87,85	9,89	100,00%	0,00	0,00	87,37	9,78	100,00%
2,15	0,15	87,87	9,89	100,03%	2,16	0,17	87,53	9,81	100,34%
4,12	0,29	87,69	9,85	99,63%	4,11	0,31	87,36	9,78	99,98%
6,13	0,45	86,95	9,68	97,95%	6,13	0,49	87,37	9,78	99,98%
7,09	0,57	86,62	9,61	97,21%	7,14	0,60	87,26	9,75	99,74%
8,09	0,79	86,17	9,51	96,19%	8,08	0,80	86,80	9,65	98,69%
9,04	1,27	84,93	9,24	93,46%	9,05	1,18	83,12	8,85	90,50%
10,04	2,02	83,46	8,92	90,24%	10,05	1,88	79,40	8,08	82,58%
12,03	2,85	76,34	7,47	75,50%	12,01	2,83	77,64	7,72	78,96%
14,05	3,58	76,00	7,40	74,83%	14,06	3,67	76,83	7,56	77,32%
16,02	4,36	75,47	7,30	73,79%	16,07	4,46	76,89	7,57	77,45%
18,10	5,04	76,32	7,46	75,48%	18,08	5,17	77,50	7,70	78,68%
20,05	5,69	74,40	7,09	71,71%	20,06	5,87	76,20	7,44	76,06%
22,04	6,36	74,19	7,05	71,32%	22,07	6,59	76,23	7,44	76,11%
24,02	7,11	73,62	6,94	70,22%	24,05	7,32	76,32	7,46	76,29%
25,43	9,97	70,34	6,34	64,10%	25,87	10,62	70,80	6,42	65,65%
25,66	14,74	66,09	5,60	56,60%	26,23	14,78	65,81	5,55	56,73%

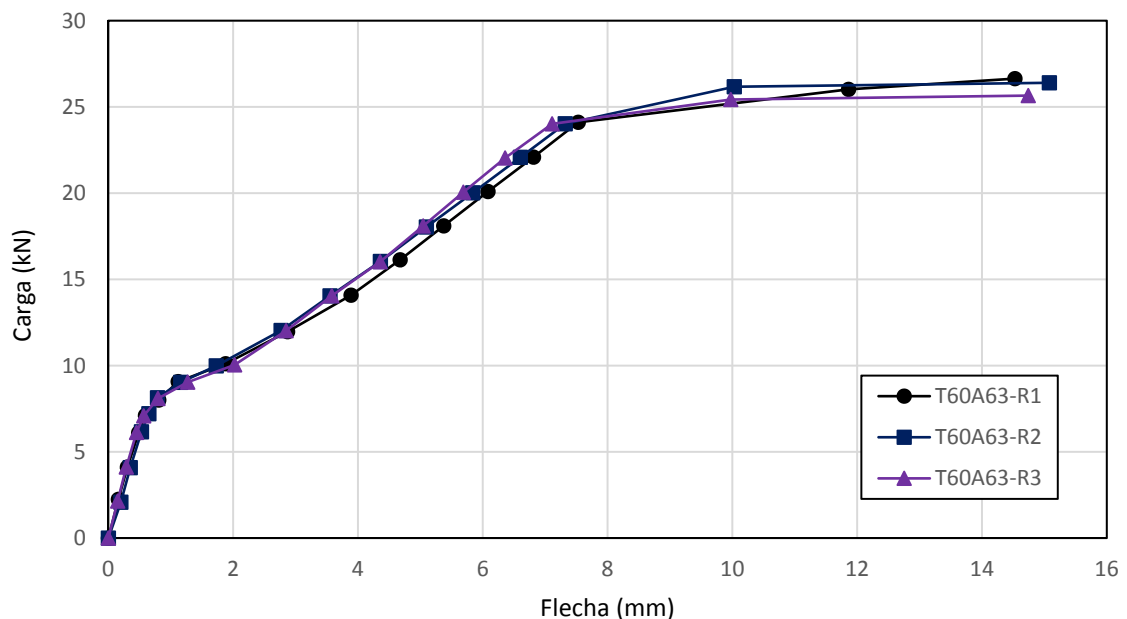


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A63

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

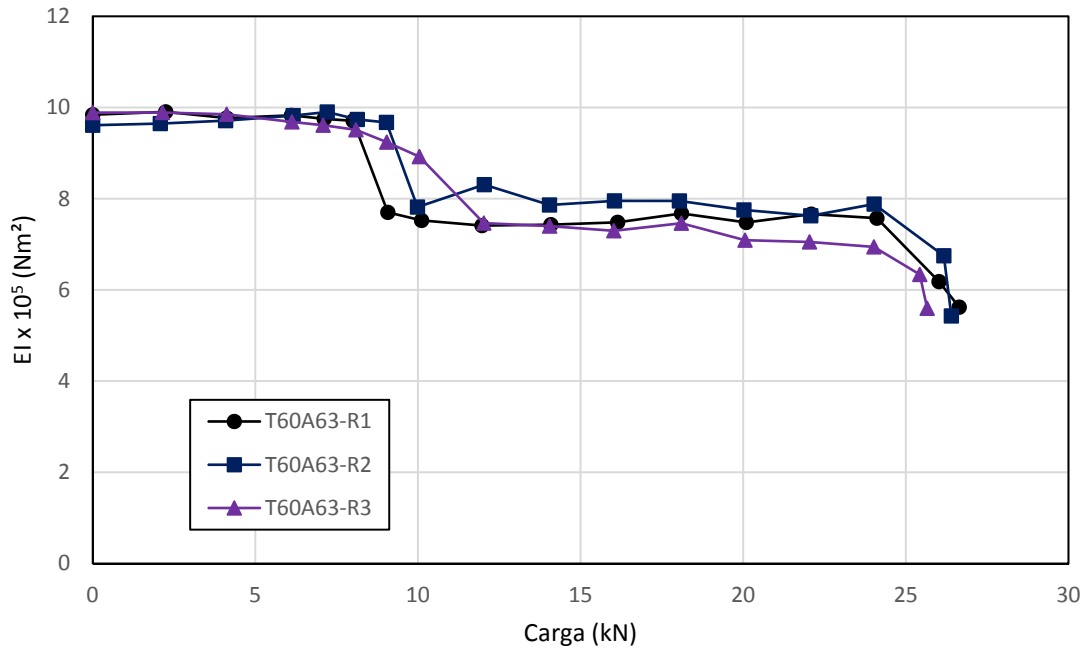


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T60A63

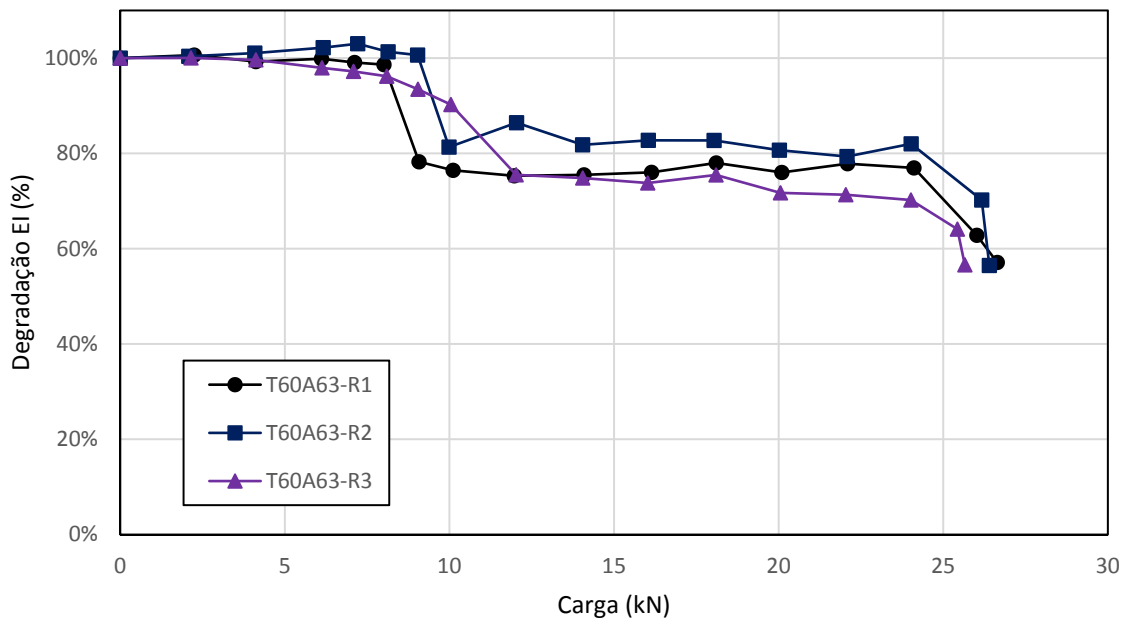


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T60A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A63

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T60A63-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
10,35	1,40
12,01	2,29
14,06	3,70
16,07	5,32
18,08	7,10
20,06	8,93
22,07	10,81
24,05	12,64
25,87	14,30
26,23	14,62

T60A63-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,16	0,38
4,11	0,72
6,13	1,07
7,14	1,25
8,08	2,10
9,05	2,50
10,05	2,96
12,01	3,66
14,06	4,35
16,07	4,97
18,08	5,52
20,06	6,28
22,07	6,91
24,05	7,52
25,87	9,05
26,23	10,27

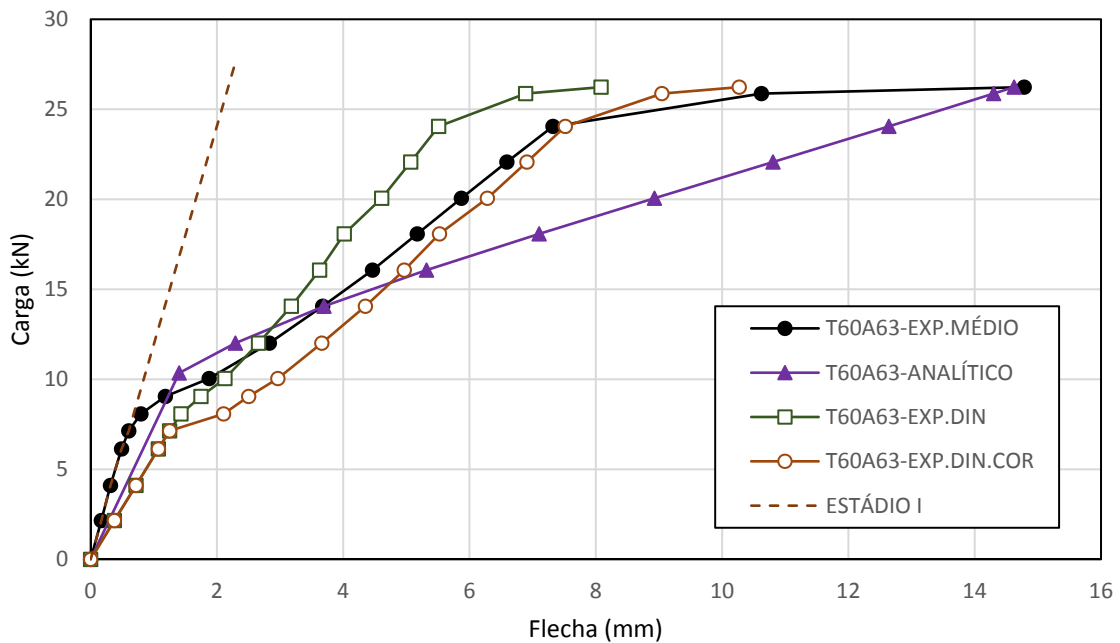


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A63

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

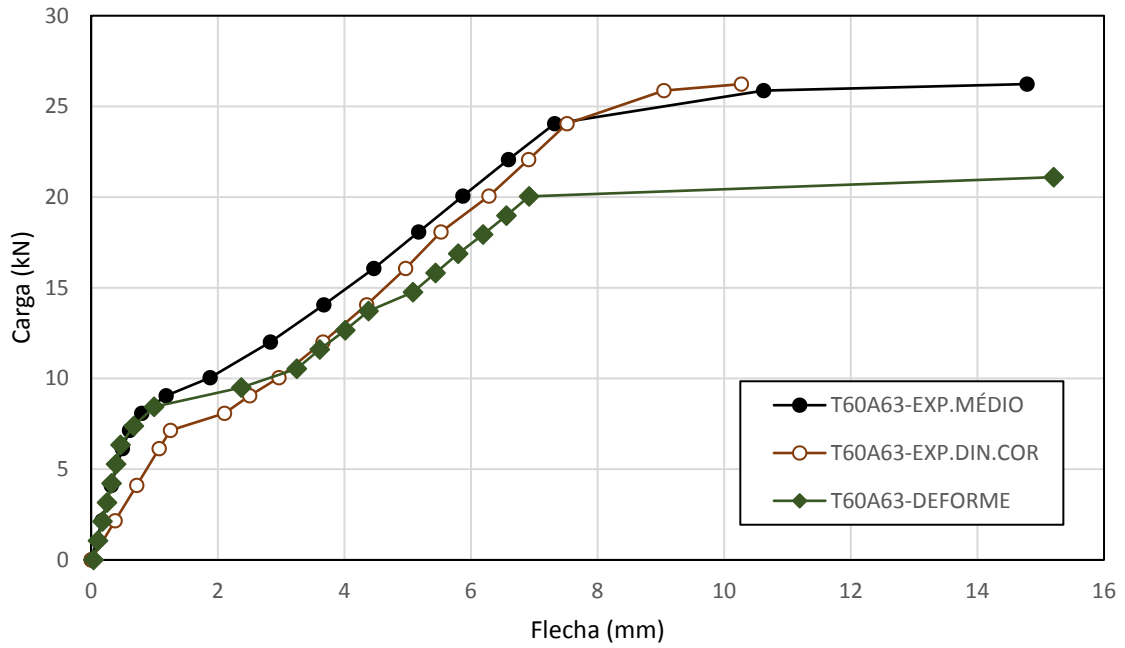


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

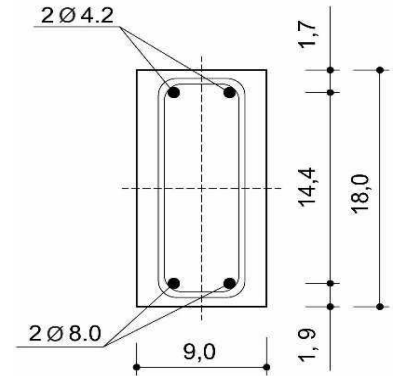
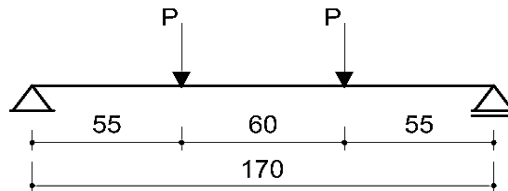
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T60A80

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 1,0
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 50,2
- . Fctm (MPa) = 3,6
- . Ec (MPa) = 26880,0



Corte A-A

Resultados

T60A80-R1					T60A80-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	87,22	9,80	100,00%	0,00	0,00	87,70	9,91	100,00%
2,78	0,23	86,25	9,58	97,79%	2,15	0,19	87,20	9,79	98,85%
6,50	0,52	84,66	9,23	94,21%	6,20	0,52	87,35	9,83	99,20%
8,11	0,72	84,96	9,30	94,87%	8,00	0,79	86,71	9,68	97,74%
9,17	0,94	83,56	8,99	91,77%	9,08	1,08	86,15	9,56	96,50%
10,12	1,23	82,84	8,84	90,20%	10,08	1,38	85,16	9,34	94,28%
11,10	1,52	81,26	8,51	86,80%	11,09	1,70	84,31	9,16	92,42%
12,68	1,95	81,74	8,61	87,83%	12,02	2,00	83,36	8,95	90,33%
14,09	2,36	81,06	8,46	86,37%	14,02	2,57	83,01	8,88	89,60%
16,13	2,92	79,54	8,15	83,15%	16,06	3,13	83,67	9,02	91,02%
18,14	3,44	79,93	8,23	83,97%	18,08	3,68	74,96	7,24	73,06%
20,14	3,98	78,39	7,92	80,77%	20,08	4,22	76,93	7,62	76,94%
22,14	4,55	78,42	7,92	80,82%	22,14	4,75	75,23	7,29	73,57%
26,13	5,56	77,63	7,76	79,22%	26,09	5,79	74,96	7,24	73,06%
30,14	6,61	77,91	7,82	79,79%	30,06	6,89	75,30	7,30	73,72%
34,12	7,78	77,70	7,78	79,35%	34,12	8,03	74,60	7,17	72,35%
38,15	8,94	78,49	7,94	80,98%	38,09	9,16	76,56	7,55	76,21%
40,12	9,54	77,36	7,71	78,66%	40,11	9,88	76,87	7,61	76,83%
42,20	10,22	77,19	7,68	78,32%	42,07	10,78	74,15	7,08	71,48%
42,69	10,57	70,48	6,40	65,29%	44,80	15,14	68,50	6,04	61,00%
43,96	20,06	66,27	5,66	57,72%	47,75	20,15	62,02	4,95	50,01%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A80

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T60A80-R3					T60A80-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 105 (Nm ²)	Deg El (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 105 (Nm ²)	Deg El (%)
0,00	0,00	89,59	10,34	100,00%	0,00	0,00	88,17	10,01	100,00%
2,62	0,20	90,60	10,57	102,26%	2,52	0,21	88,02	9,98	99,65%
6,16	0,49	90,12	10,46	101,18%	6,29	0,51	87,38	9,83	98,20%
8,14	0,73	90,12	10,46	101,18%	8,08	0,75	87,26	9,81	97,94%
9,07	0,94	90,32	10,51	101,64%	9,10	0,99	86,68	9,68	96,64%
10,13	1,27	89,52	10,32	99,83%	10,11	1,29	85,84	9,49	94,77%
11,12	1,55	89,16	10,24	99,05%	11,10	1,59	84,91	9,29	92,74%
12,07	1,84	78,00	7,84	75,80%	12,26	1,93	81,03	8,46	84,46%
14,04	2,40	76,58	7,55	73,05%	14,05	2,44	80,22	8,29	82,77%
16,12	3,02	78,30	7,90	76,37%	16,10	3,02	80,50	8,35	83,35%
18,10	3,62	76,50	7,54	72,91%	18,11	3,58	77,13	7,66	76,52%
20,11	4,17	75,22	7,29	70,48%	20,11	4,12	76,84	7,61	75,96%
22,14	4,72	75,91	7,42	71,78%	22,14	4,68	76,52	7,54	75,31%
26,32	5,84	76,35	7,51	72,62%	26,18	5,73	76,32	7,50	74,91%
30,13	6,85	75,05	7,26	70,17%	30,11	6,78	76,09	7,46	74,47%
34,14	7,94	75,50	7,34	71,02%	34,13	7,92	75,93	7,43	74,16%
38,14	9,01	74,62	7,17	69,37%	38,12	9,04	76,56	7,55	75,39%
40,15	9,61	74,13	7,08	68,46%	40,13	9,68	76,12	7,46	74,53%
42,24	10,34	73,87	7,03	67,98%	42,17	10,45	75,07	7,26	72,49%
46,37	15,05	67,78	5,92	57,23%	44,62	13,58	68,92	6,12	61,09%
48,06	20,04	63,51	5,20	50,26%	46,59	20,08	63,93	5,27	52,58%



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A80

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

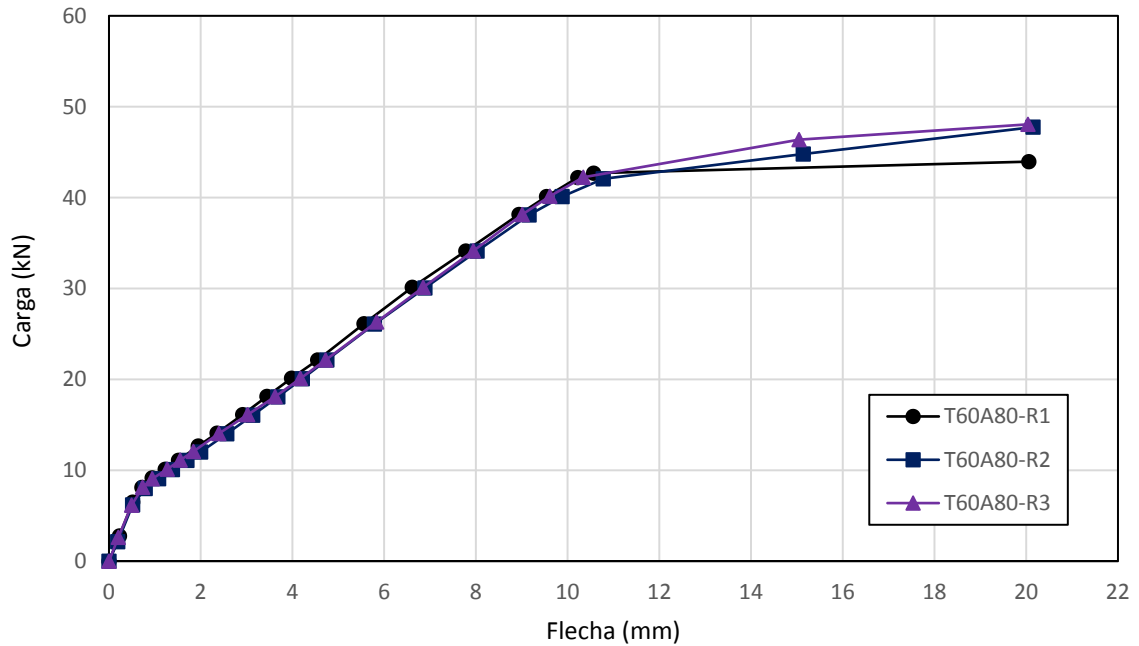


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T60A80

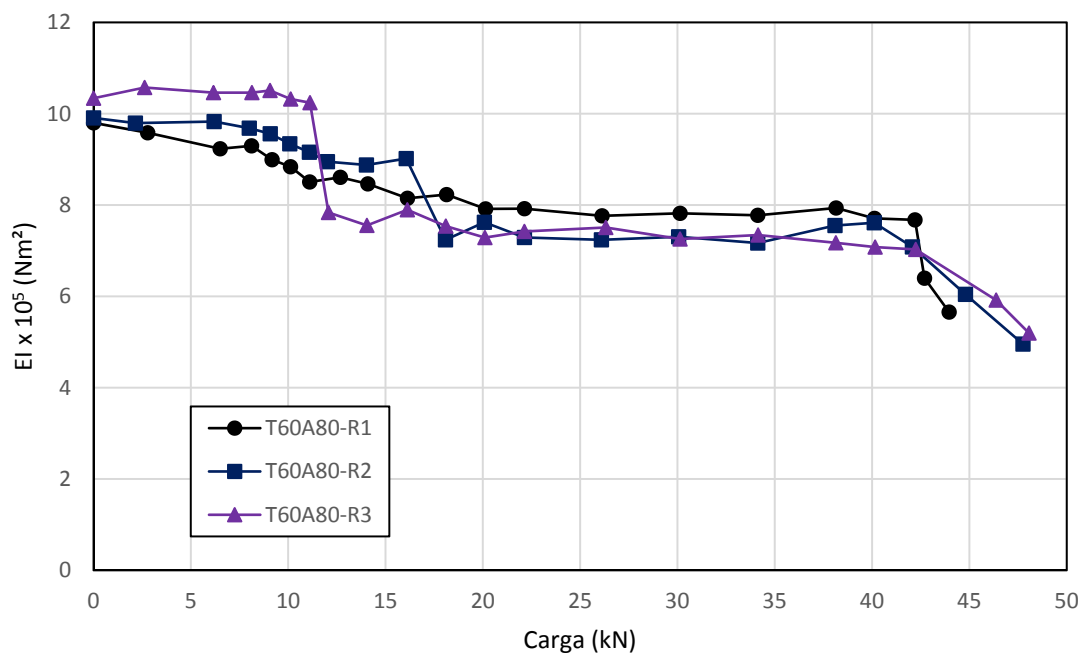


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T60A80



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T60A80

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

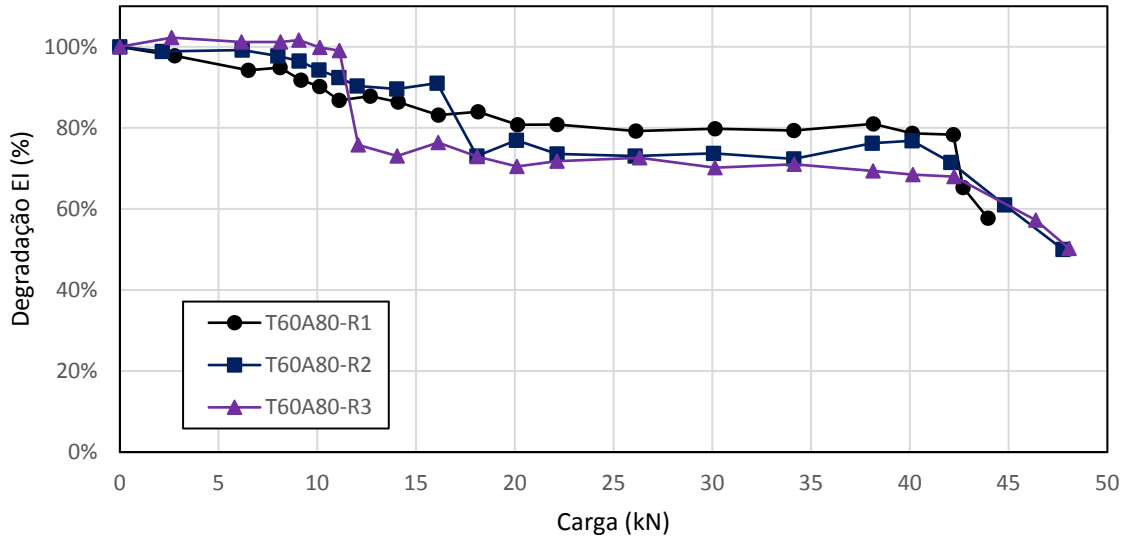


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T60A80

T60A80-ANALÍTICO		T60A80-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
10,60	1,40	2,52	0,43
11,10	1,62	6,29	1,09
12,26	2,18	8,08	1,41
14,05	3,18	9,10	2,34
16,10	4,44	10,11	2,64
18,11	5,72	11,10	2,94
20,11	7,01	12,26	3,47
22,14	8,30	14,05	4,03
26,18	10,78	16,10	4,60
30,11	13,08	18,11	5,50
34,13	15,32	20,11	6,14
38,12	17,48	22,14	6,81
40,13	18,54	26,18	8,08
42,17	19,61	30,11	9,34
44,62	20,88	34,13	10,61
46,59	21,90	38,12	11,71
		40,13	12,43
		42,17	13,34
		44,62	16,07
		46,59	18,89



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T60A80

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

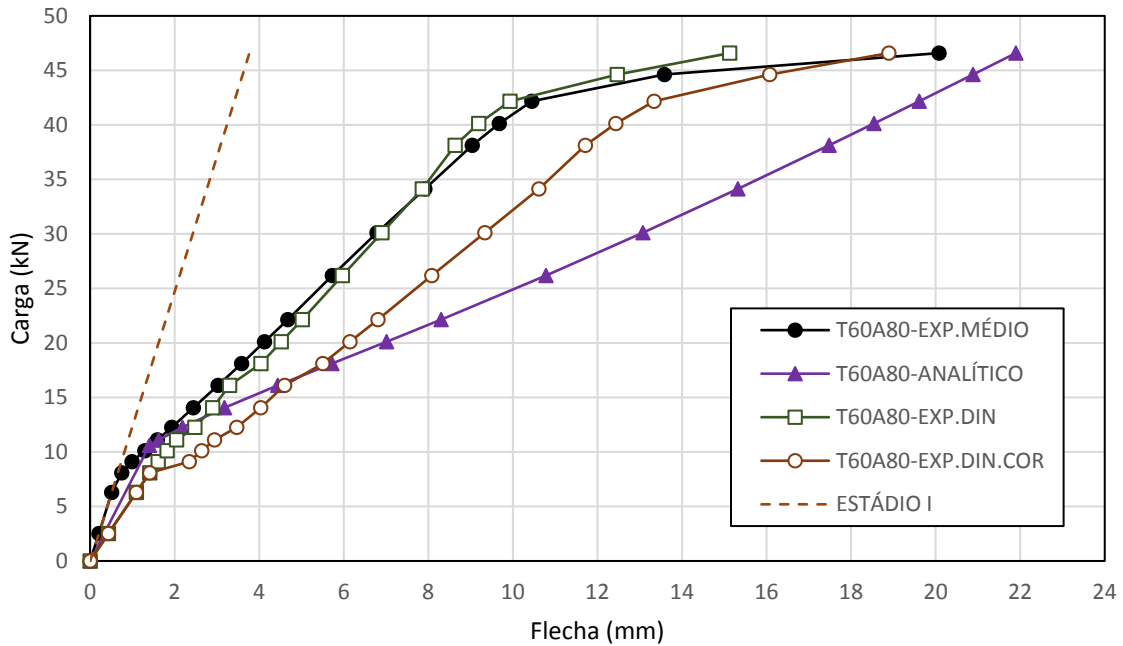


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental

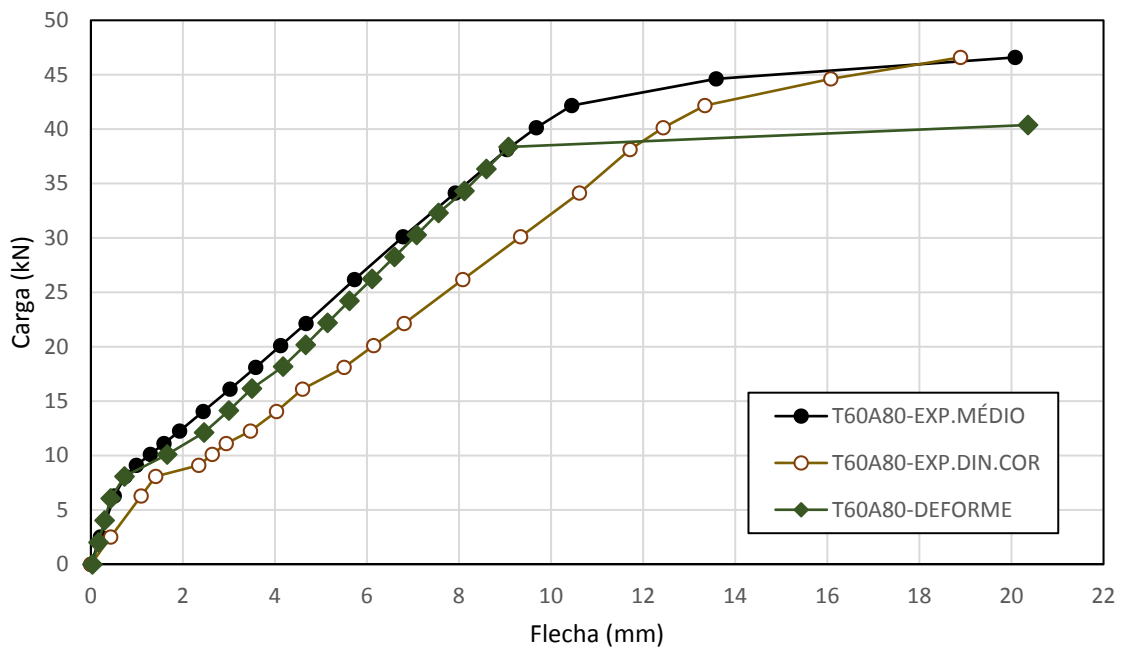


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

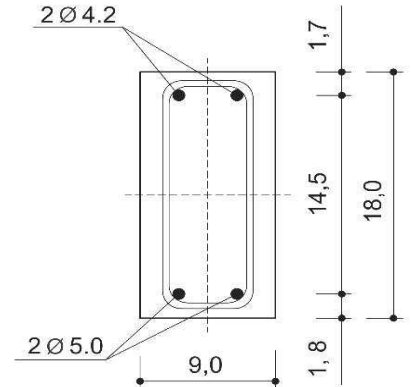
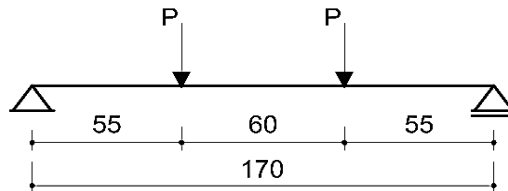
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A50

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 90,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,4
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 36,7
- . Fctm (MPa) = 2,8
- . Ec (MPa) = 24760,0



Corte A-A

Resultados

T70A50-R1					T70A50-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	83,90	9,03	100,00%	0,00	0,00	84,78	9,22	100,00%
2,07	0,17	83,39	8,92	98,79%	2,08	0,20	85,61	9,40	101,97%
4,11	0,32	83,04	8,84	97,96%	4,07	0,32	84,62	9,18	99,61%
5,10	0,41	81,65	8,55	94,70%	5,13	0,40	85,40	9,35	101,46%
6,12	0,50	82,80	8,79	97,39%	6,30	0,50	84,92	9,25	100,33%
6,99	0,62	82,78	8,79	97,33%	7,22	0,65	84,96	9,26	100,42%
8,04	0,99	82,65	8,76	97,04%	8,01	0,87	84,43	9,14	99,17%
8,94	1,64	76,29	7,46	82,67%	9,21	1,66	81,05	8,42	91,40%
10,15	2,58	74,60	7,14	79,05%	10,10	2,46	79,45	8,10	87,82%
12,10	3,93	74,07	7,04	77,93%	12,08	3,74	77,41	7,68	83,37%
14,05	4,91	73,09	6,85	75,88%	13,96	4,61	75,13	7,24	78,53%
16,07	6,08	71,37	6,53	72,36%	16,19	5,97	73,92	7,01	76,02%
18,03	7,34	69,67	6,23	68,95%	18,07	7,39	73,48	6,92	75,11%
20,06	12,82	58,30	4,36	48,29%	19,95	13,72	60,76	4,73	51,37%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T70A50

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T70A50-R3					T70A50-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	85,73	9,43	100,00%	0,00	0,00	84,81	9,22	100,00%
2,02	0,18	86,11	9,51	100,89%	2,06	0,18	85,04	9,27	100,55%
4,13	0,33	86,19	9,53	101,07%	4,10	0,33	84,62	9,18	99,55%
5,21	0,43	85,67	9,41	99,86%	5,15	0,41	84,24	9,10	98,67%
6,20	0,52	85,30	9,33	98,98%	6,21	0,51	84,34	9,12	98,90%
7,08	0,69	85,38	9,35	99,18%	7,10	0,66	84,37	9,13	98,98%
8,12	1,00	84,70	9,20	97,61%	8,05	0,95	83,93	9,03	97,94%
9,10	2,07	81,23	8,46	89,76%	9,08	1,79	79,52	8,11	87,92%
10,08	2,54	78,24	7,85	83,28%	10,11	2,53	77,43	7,69	83,36%
12,07	4,08	77,68	7,74	82,10%	12,08	3,92	76,39	7,48	81,13%
14,06	5,14	77,32	7,67	81,33%	14,02	4,89	75,18	7,25	78,58%
16,05	6,29	76,19	7,44	78,96%	16,11	6,11	73,82	6,99	75,78%
18,03	8,11	70,41	6,36	67,45%	18,05	7,61	71,19	6,50	70,46%
19,52	13,92	59,99	4,62	48,97%	19,84	13,49	59,69	4,57	49,53%

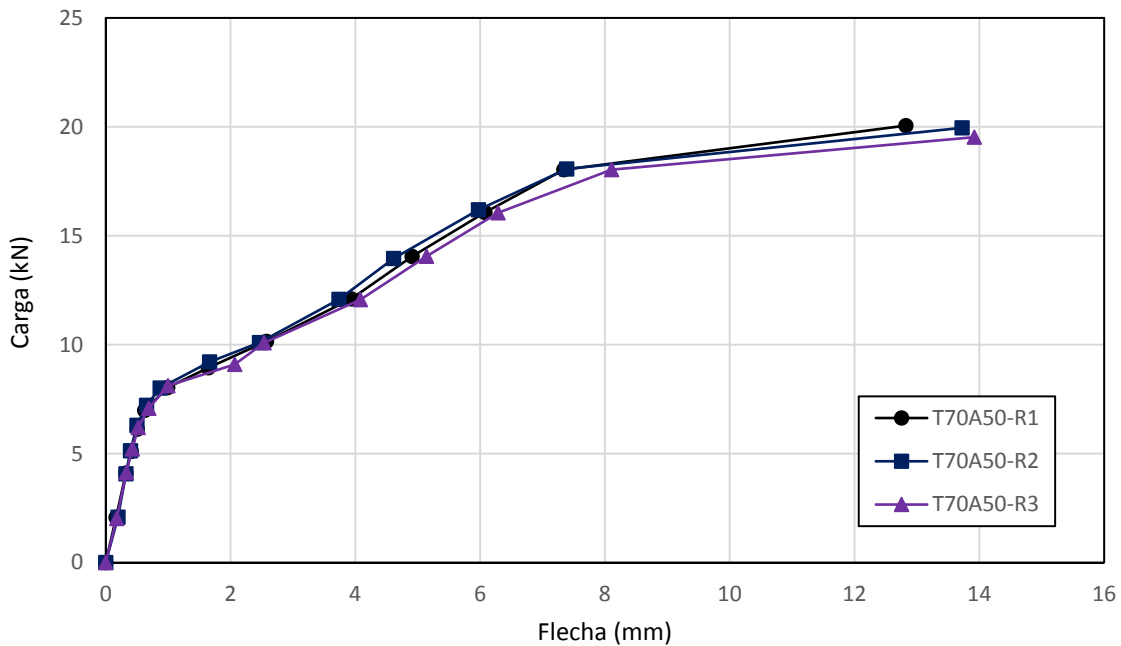


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T70A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A50

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

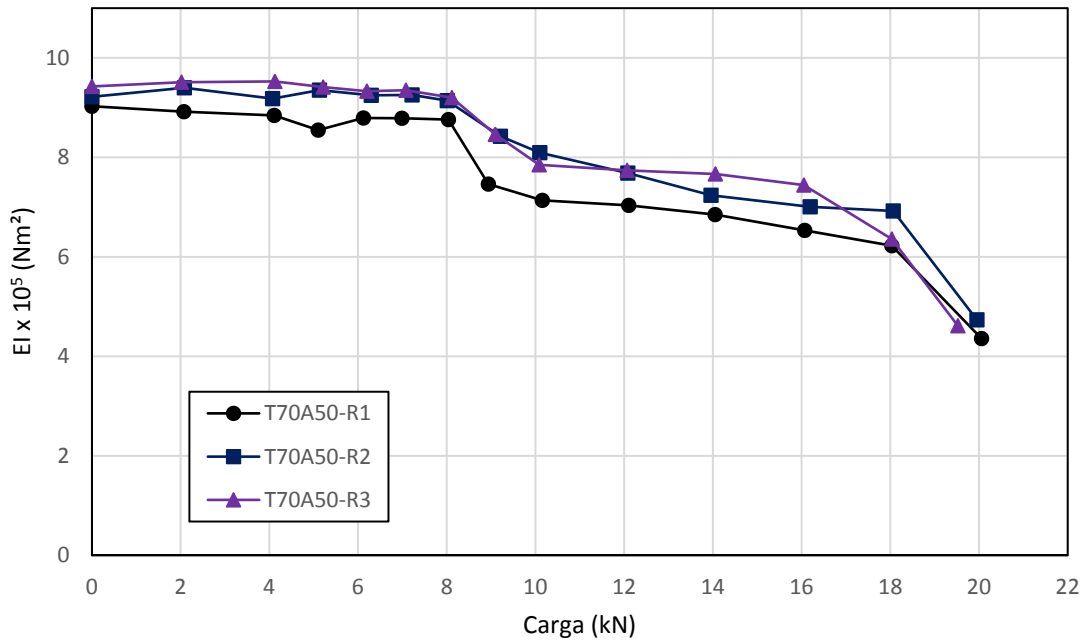


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T70A50

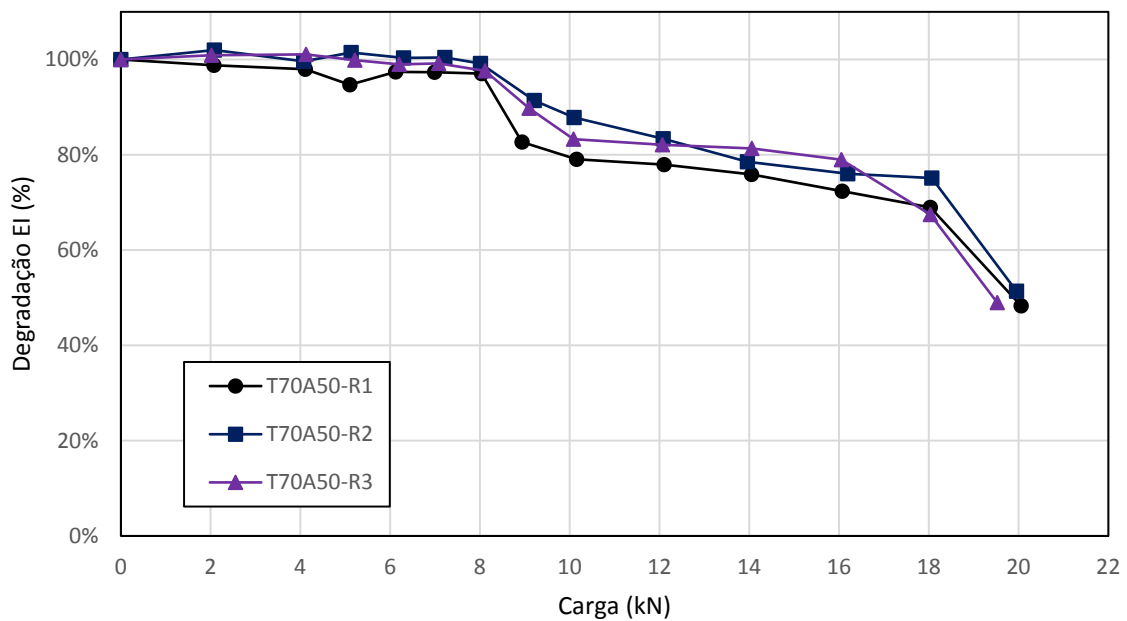


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T70A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A50

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T70A50-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
7,91	1,18
10,11	2,72
12,08	4,68
14,02	7,02
16,11	9,79
18,05	12,47
19,84	14,96

T70A50-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,06	0,38
4,10	0,76
5,15	0,97
6,21	1,16
7,10	1,90
8,05	2,17
9,08	2,64
10,11	3,06
12,08	3,73
14,02	4,44
16,11	5,23
18,05	6,20
19,84	9,02

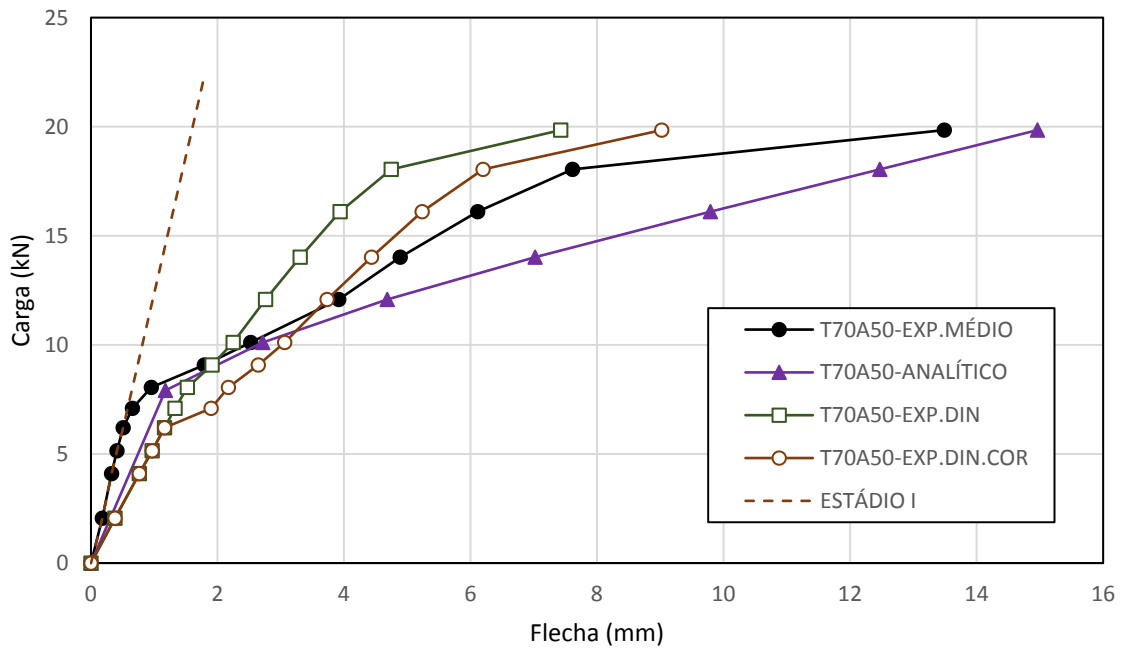


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A50

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

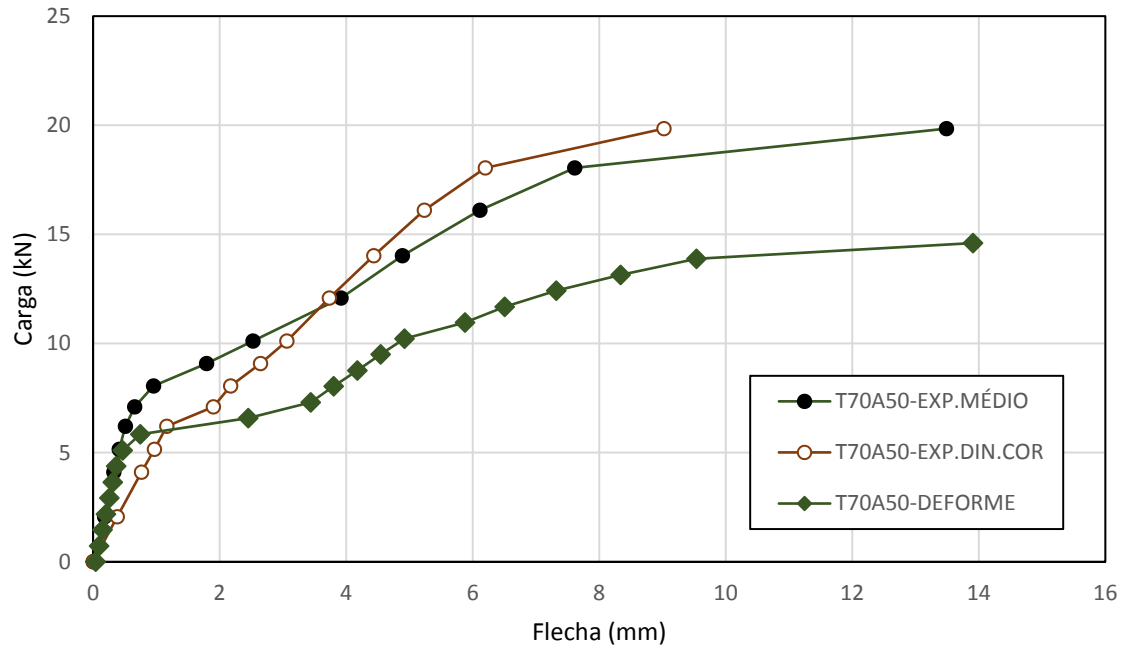


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

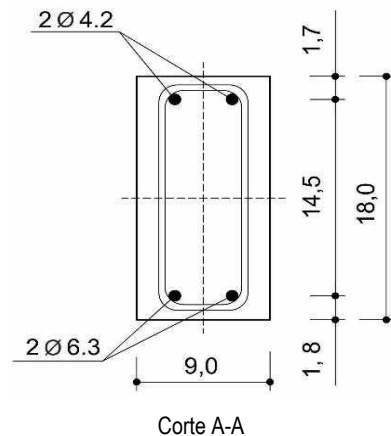
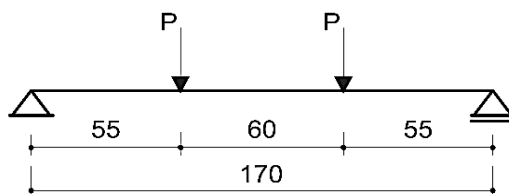
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A63

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,6
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 36,7
- . Fctm (MPa) = 2,8
- . Ec (MPa) = 24760,0



Resultados

T70A63-R1					T70A63-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)
0,00	0,00	85,98	9,50	100,00%	0,00	0,00	86,76	9,68	100,00%
2,05	0,17	86,32	9,58	100,79%	2,07	0,17	85,99	9,51	98,24%
4,11	0,33	86,04	9,52	100,15%	4,11	0,31	85,60	9,42	97,36%
5,12	0,42	86,00	9,51	100,06%	5,23	0,40	86,52	9,62	99,46%
6,15	0,52	85,38	9,37	98,63%	6,25	0,49	86,47	9,61	99,33%
7,14	0,64	85,46	9,39	98,80%	7,15	0,60	85,43	9,38	96,97%
8,06	0,87	85,64	9,43	99,21%	8,03	0,75	85,41	9,38	96,92%
9,03	1,26	83,82	9,03	95,05%	9,09	1,09	85,25	9,34	96,54%
10,02	1,81	82,21	8,69	91,43%	10,11	1,47	76,46	7,52	77,68%
12,08	2,67	80,85	8,40	88,43%	12,00	2,42	73,45	6,94	71,68%
14,10	3,49	79,63	8,15	85,77%	14,01	3,22	73,85	7,01	72,47%
16,07	4,21	79,58	8,14	85,66%	16,08	3,97	74,25	7,09	73,24%
18,05	4,90	77,81	7,78	81,91%	18,04	4,77	74,04	7,05	72,84%
20,04	5,61	77,26	7,67	80,75%	20,04	5,48	72,57	6,77	69,97%
22,05	6,33	77,85	7,79	81,99%	22,05	6,29	74,30	7,10	73,34%
24,05	7,05	77,47	7,72	81,19%	24,43	7,19	74,33	7,10	73,41%
26,08	7,96	76,48	7,52	79,12%	26,10	7,80	74,89	7,21	74,51%
26,13	8,17	71,18	6,51	68,55%	27,52	8,55	67,39	5,84	60,34%
26,87	14,23	64,73	5,39	56,69%	27,68	15,14	63,87	5,24	54,20%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T70A63

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T70A63-R3					T70A63-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	86,52	9,62	100,00%	0,00	0,00	86,42	9,60	100,00%
2,06	0,15	85,74	9,45	98,20%	2,06	0,17	86,01	9,51	99,07%
4,06	0,33	85,26	9,34	97,11%	4,09	0,32	85,63	9,43	98,20%
5,10	0,43	85,72	9,45	98,17%	5,15	0,42	86,08	9,53	99,23%
6,13	0,54	85,35	9,36	97,31%	6,18	0,52	85,73	9,45	98,42%
7,02	0,67	84,43	9,16	95,22%	7,10	0,64	85,11	9,31	96,99%
8,03	0,97	84,22	9,12	94,77%	8,04	0,86	85,09	9,31	96,95%
9,01	1,43	82,56	8,76	91,06%	9,04	1,26	83,88	9,04	94,21%
10,03	1,90	80,73	8,38	87,08%	10,05	1,73	79,80	8,19	85,28%
12,01	2,69	81,01	8,44	87,67%	12,03	2,59	78,44	7,91	82,38%
14,06	3,48	77,58	7,74	80,41%	14,06	3,40	77,02	7,63	79,44%
16,03	4,24	76,53	7,53	78,23%	16,06	4,14	76,78	7,58	78,94%
18,00	4,97	73,58	6,96	72,32%	18,03	4,88	75,14	7,26	75,61%
20,02	5,72	73,16	6,88	71,51%	20,03	5,60	74,33	7,10	73,98%
22,07	6,48	73,60	6,96	72,37%	22,05	6,36	75,25	7,28	75,82%
24,01	7,18	72,00	6,66	69,26%	24,16	7,14	74,60	7,15	74,52%
26,08	8,03	72,78	6,81	70,77%	26,08	7,93	74,72	7,18	74,75%
26,55	10,05	69,07	6,13	63,72%	26,73	8,92	69,21	6,16	64,15%
27,81	15,29	61,91	4,93	51,20%	27,46	14,89	63,50	5,18	54,00%

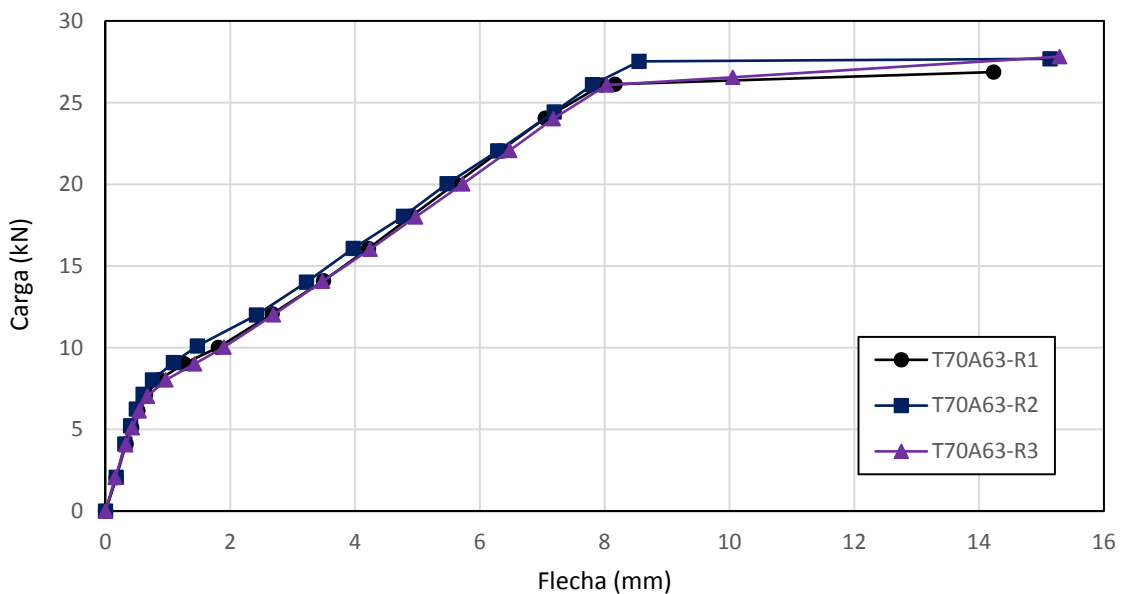


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T70A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A63

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

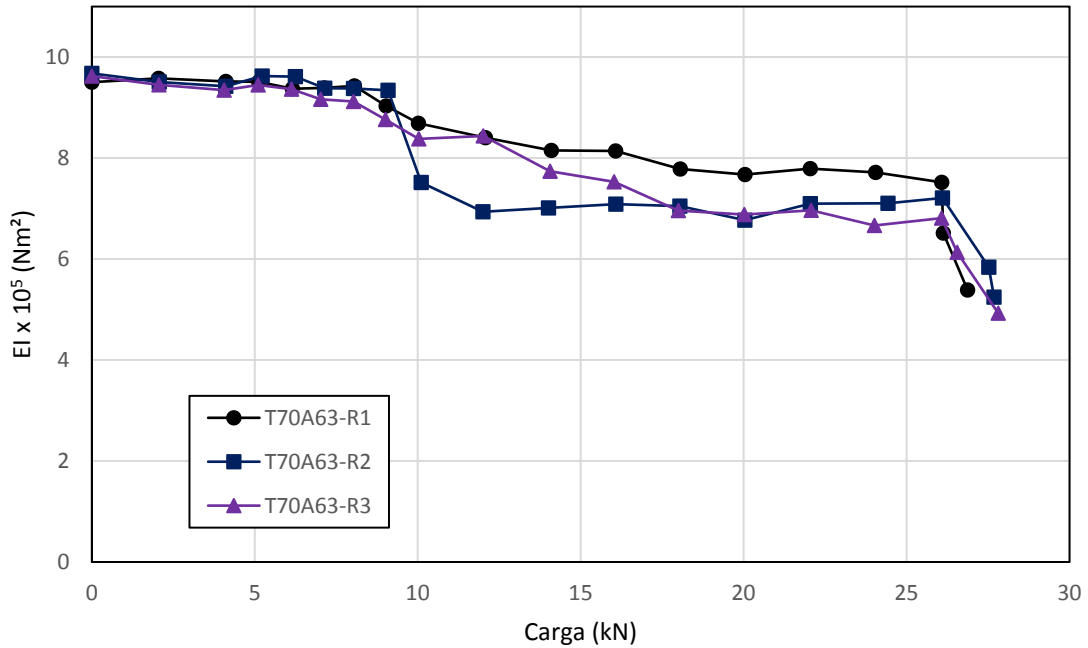


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T70A63

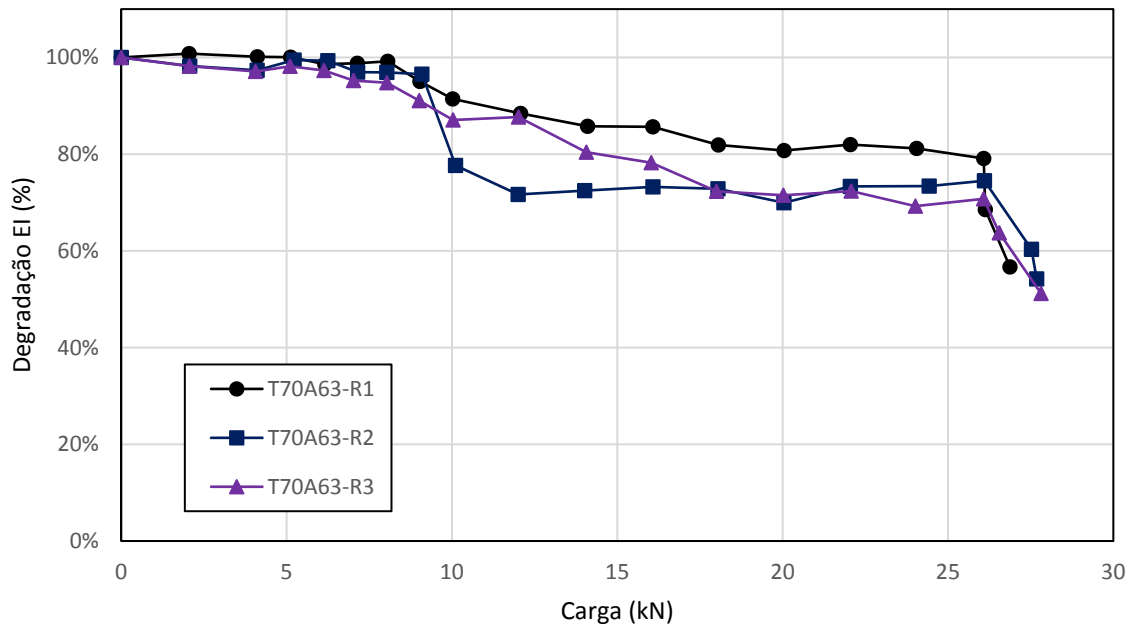


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T70A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A63

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T70A63-ANALÍTICO		T70A63-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
8,06	1,18	2,06	0,37
9,04	1,72	4,09	0,74
10,05	2,39	5,15	0,92
12,03	3,95	6,18	1,12
14,06	5,78	7,10	1,93
16,06	7,66	8,04	2,18
18,03	9,52	9,04	2,51
20,03	11,37	10,05	2,99
22,05	13,18	12,03	3,66
24,16	15,01	14,06	4,39
26,08	16,63	16,06	5,04
26,73	17,17	18,03	5,84
27,46	17,76	20,03	6,59
		22,05	7,12
		24,16	7,90
		26,08	8,51
		26,73	9,78
		27,46	11,47

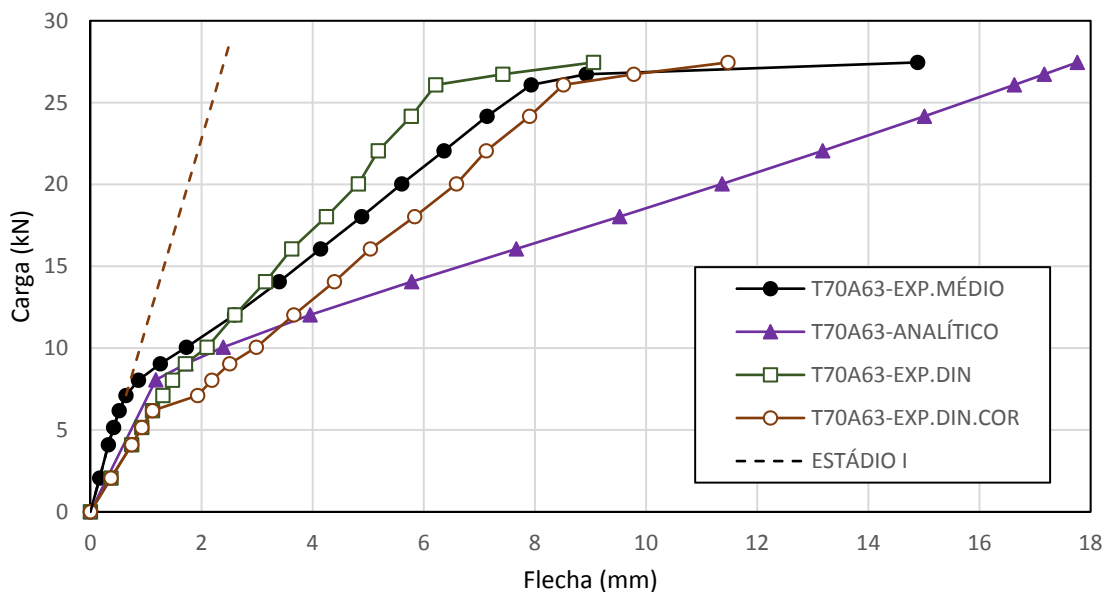


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A63

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

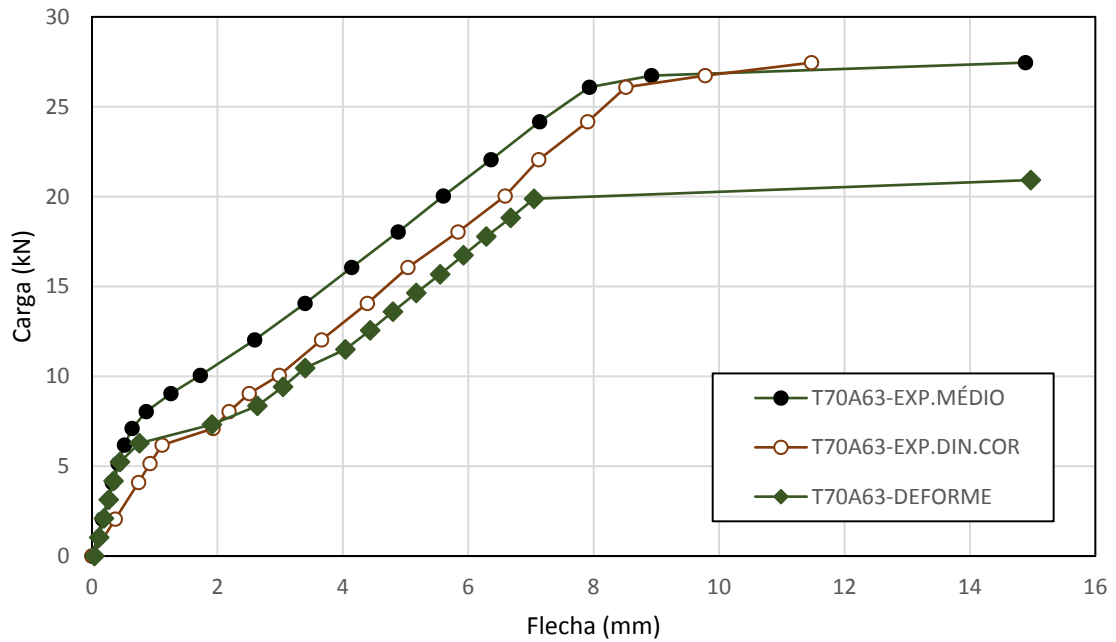


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

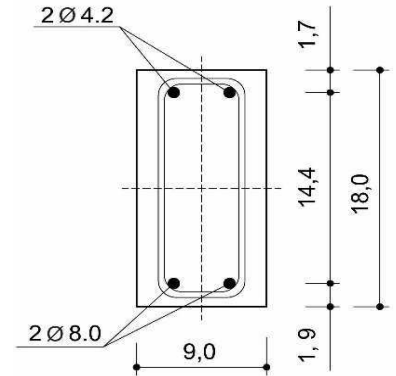
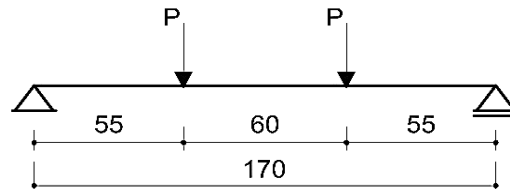
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A80

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 1,0
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 36,7
- . Fctm (MPa) = 2,8
- . Ec (MPa) = 24760,0



Corte A-A

Resultados

T70A80-R1					T70A80-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	El x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg El (%)
0,00	0,00	85,12	9,30	100,00%	0,00	0,00	88,18	9,98	100,00%
2,08	0,18	84,63	9,20	98,84%	2,11	0,29	85,95	9,49	95,00%
5,09	0,50	84,78	9,23	99,19%	5,16	0,55	84,40	9,15	91,61%
6,16	0,65	83,85	9,03	97,02%	6,17	0,67	83,42	8,93	89,49%
7,07	0,78	84,41	9,15	98,34%	7,08	0,80	84,16	9,09	91,09%
8,11	1,02	82,61	8,76	94,19%	8,12	1,01	84,07	9,08	90,90%
10,04	1,55	82,04	8,64	92,90%	10,08	1,59	82,33	8,70	87,18%
12,12	2,20	80,68	8,36	89,84%	12,10	2,18	81,45	8,52	85,32%
14,03	2,77	80,90	8,40	90,32%	14,09	2,76	80,46	8,31	83,25%
16,09	3,37	79,64	8,14	87,53%	16,10	3,31	78,77	7,97	79,79%
18,10	3,93	78,72	7,96	85,52%	18,10	3,84	76,68	7,55	75,61%
20,07	4,44	77,81	7,77	83,56%	20,10	4,40	76,00	7,42	74,28%
22,08	4,95	78,49	7,91	85,02%	22,12	4,99	75,26	7,27	72,84%
24,24	5,52	78,14	7,84	84,26%	24,09	5,52	76,54	7,52	75,33%
26,09	6,02	77,34	7,68	82,56%	26,03	6,04	76,36	7,49	74,99%
28,06	6,54	77,08	7,63	81,99%	28,12	6,60	79,27	8,07	80,81%
30,15	7,10	78,39	7,89	84,81%	30,14	7,14	79,57	8,13	81,43%
32,06	7,65	76,87	7,59	81,54%	32,12	7,69	78,68	7,95	79,61%
34,68	8,36	76,65	7,54	81,08%	34,13	8,25	77,92	7,80	78,07%
36,24	8,86	75,29	7,28	78,23%	36,10	8,85	78,81	7,97	79,87%
38,14	9,45	76,20	7,46	80,13%	38,13	9,50	78,38	7,89	79,00%
40,02	10,32	74,98	7,22	77,58%	40,22	10,18	77,90	7,79	78,04%
41,00	14,95	69,65	6,23	66,94%	45,06	11,85	76,05	7,43	74,37%
41,79	20,18	64,72	5,38	57,80%	49,47	19,91	62,49	5,01	50,21%

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil	<h1>Relatório de Ensaio</h1> Vigas de concreto armado Modelos T70A80	Página	02/05	
		Revisão	A	
		Controle	Resp.	Data
		Preparado	Gustavo	08/10/16
		Verificado	Gustavo	15/10/16
		Aprovado	JLRangel	05/11/16

T70A80-R3					T70A80-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	88,09	9,96	100,00%	0,00	0,00	87,13	9,75	100,00%
2,13	0,19	87,38	9,80	98,38%	2,11	0,22	85,98	9,49	97,38%
5,15	0,45	86,78	9,67	97,05%	5,13	0,50	85,32	9,35	95,88%
6,17	0,56	86,49	9,61	96,40%	6,17	0,62	84,59	9,19	94,24%
7,07	0,68	87,00	9,72	97,53%	7,08	0,75	85,19	9,32	95,59%
8,11	0,91	85,90	9,47	95,08%	8,11	0,98	84,20	9,10	93,37%
10,07	1,47	84,83	9,24	92,73%	10,06	1,54	83,07	8,86	90,89%
12,06	1,98	84,14	9,09	91,22%	12,09	2,12	82,09	8,65	88,76%
14,10	2,50	82,76	8,80	88,26%	14,07	2,68	81,37	8,50	87,22%
16,10	3,07	82,78	8,80	88,29%	16,09	3,25	80,39	8,30	85,13%
18,06	3,64	81,74	8,58	86,10%	18,09	3,80	79,05	8,02	82,30%
20,00	4,17	80,51	8,32	83,52%	20,06	4,34	78,11	7,83	80,35%
22,06	4,73	79,54	8,12	81,52%	22,08	4,89	77,76	7,76	79,65%
24,10	5,32	79,16	8,05	80,75%	24,14	5,45	77,95	7,80	80,02%
26,10	5,91	78,69	7,95	79,80%	26,07	5,99	77,47	7,71	79,04%
28,16	6,50	76,31	7,48	75,04%	28,12	6,54	77,55	7,72	79,22%
30,08	7,04	76,95	7,60	76,31%	30,12	7,10	78,31	7,87	80,77%
32,12	7,65	77,11	7,63	76,61%	32,10	7,66	77,55	7,72	79,21%
34,07	8,21	77,22	7,66	76,83%	34,29	8,28	77,26	7,66	78,63%
36,09	8,87	76,31	7,48	75,04%	36,14	8,86	76,80	7,57	77,69%
38,07	9,53	76,45	7,50	75,31%	38,12	9,49	77,01	7,61	78,11%
40,02	10,23	76,00	7,42	74,42%	40,09	10,24	76,29	7,47	76,66%
43,02	12,74	71,56	6,58	65,99%	43,03	13,18	72,42	6,73	69,08%
44,44	18,32	64,95	5,42	54,36%	45,24	19,47	64,05	5,27	54,04%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A80

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

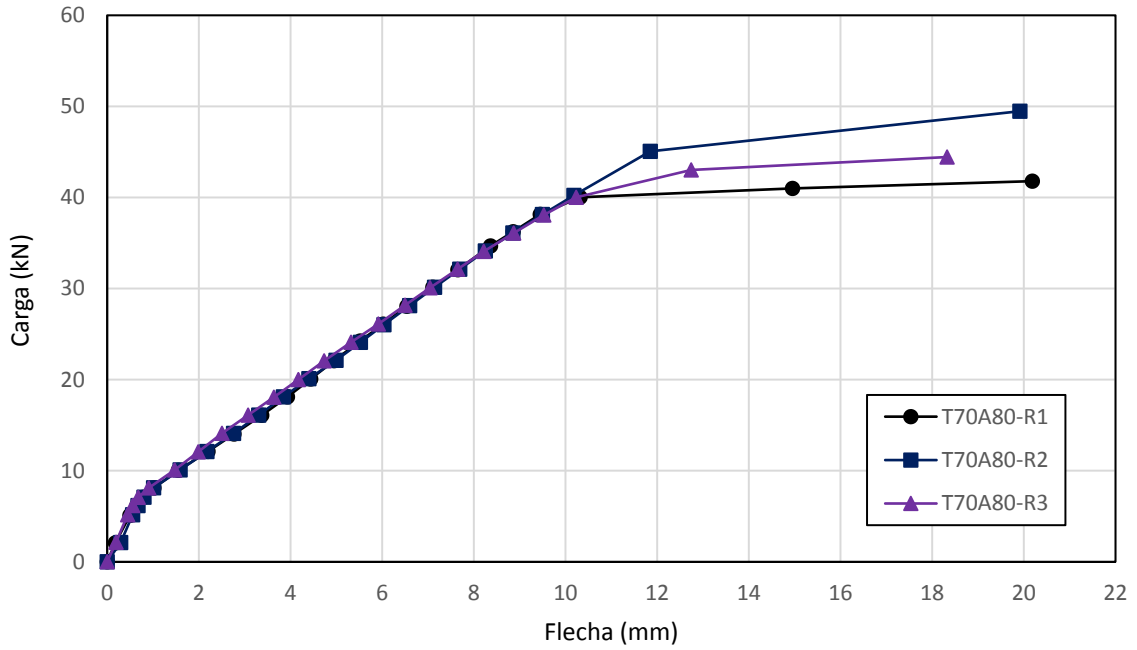


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T70A80

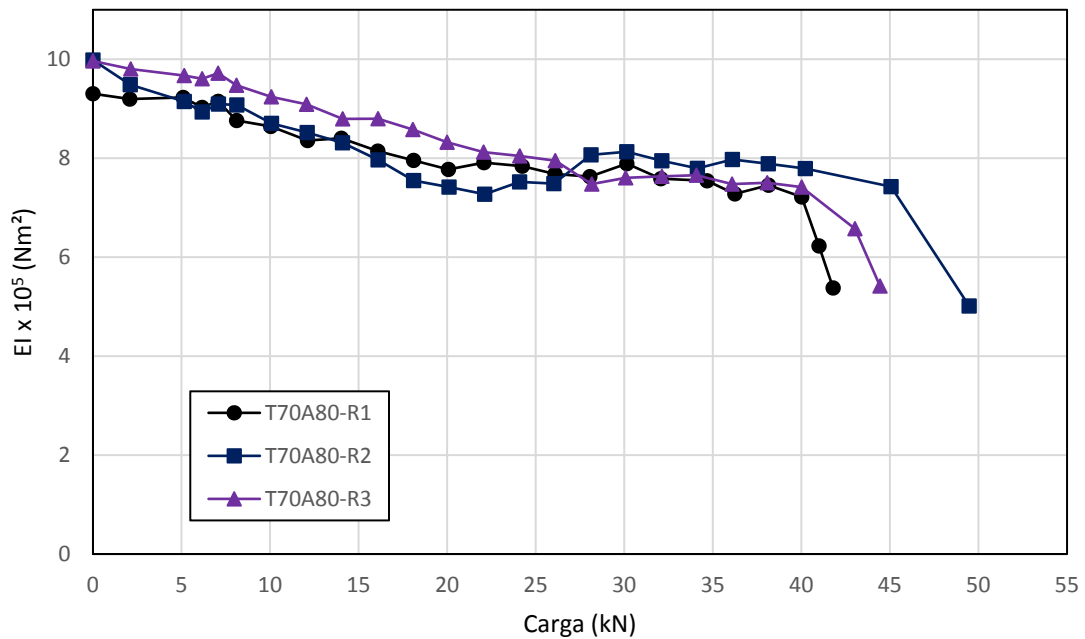


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T70A80



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T70A80

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

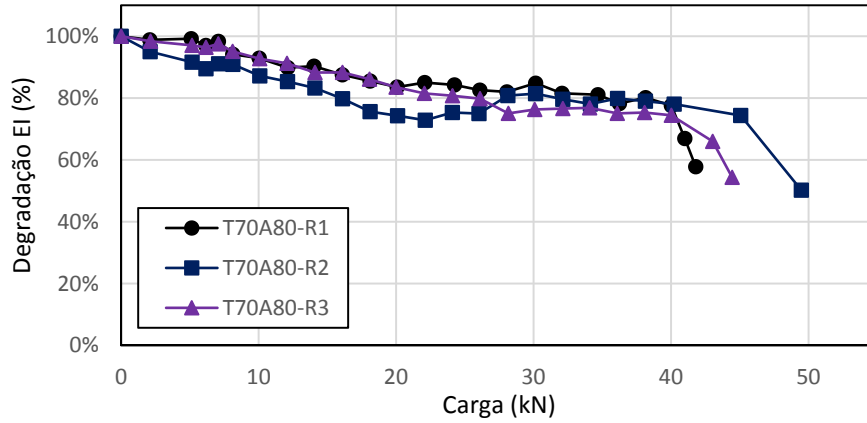


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T70A80

T70A80-ANALÍTICO		T70A80-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
8,27	1,18	2,11	0,38
10,06	2,10	5,13	0,94
12,09	3,34	6,17	1,15
14,07	4,63	7,08	2,03
16,09	5,95	8,11	2,37
18,09	7,22	10,06	2,99
20,06	8,44	12,09	3,64
22,08	9,64	14,07	4,29
24,14	10,83	16,09	4,99
26,07	11,92	18,09	5,73
28,12	13,05	20,06	6,46
30,12	14,14	22,08	7,15
32,10	15,19	24,14	7,80
34,29	16,35	26,07	8,49
36,14	17,31	28,12	9,14
38,12	18,34	30,12	9,67
40,09	19,35	32,10	10,44
43,03	20,86	34,29	11,21
45,24	21,98	36,14	11,91
		38,12	12,51
		40,09	13,33
		43,03	15,39
		45,24	19,37



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T70A80

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

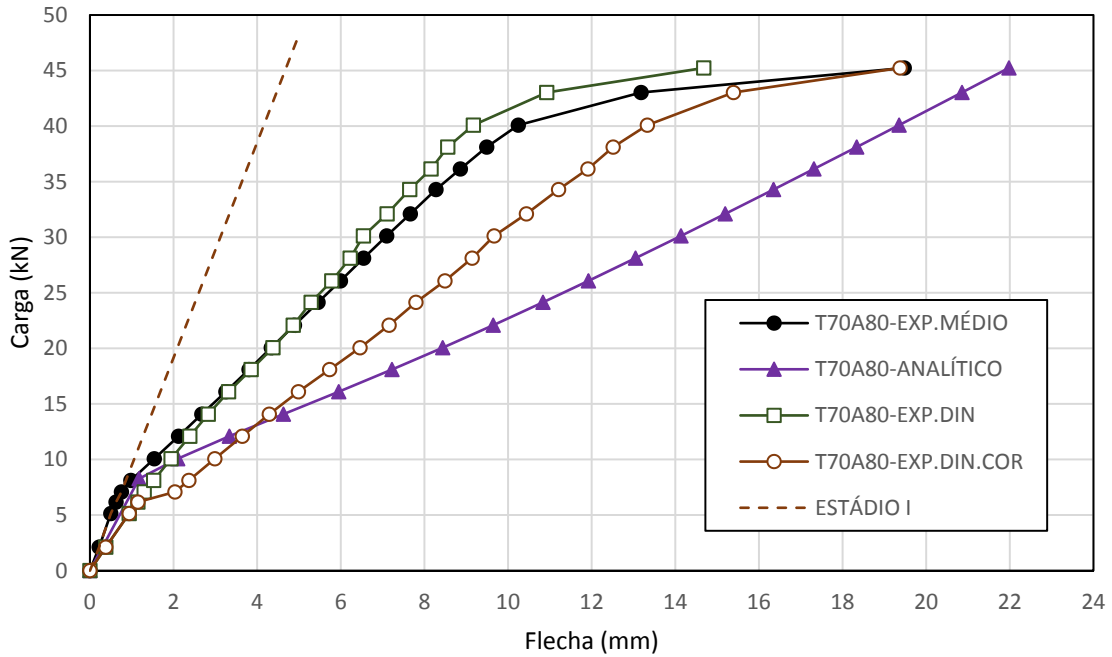


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental

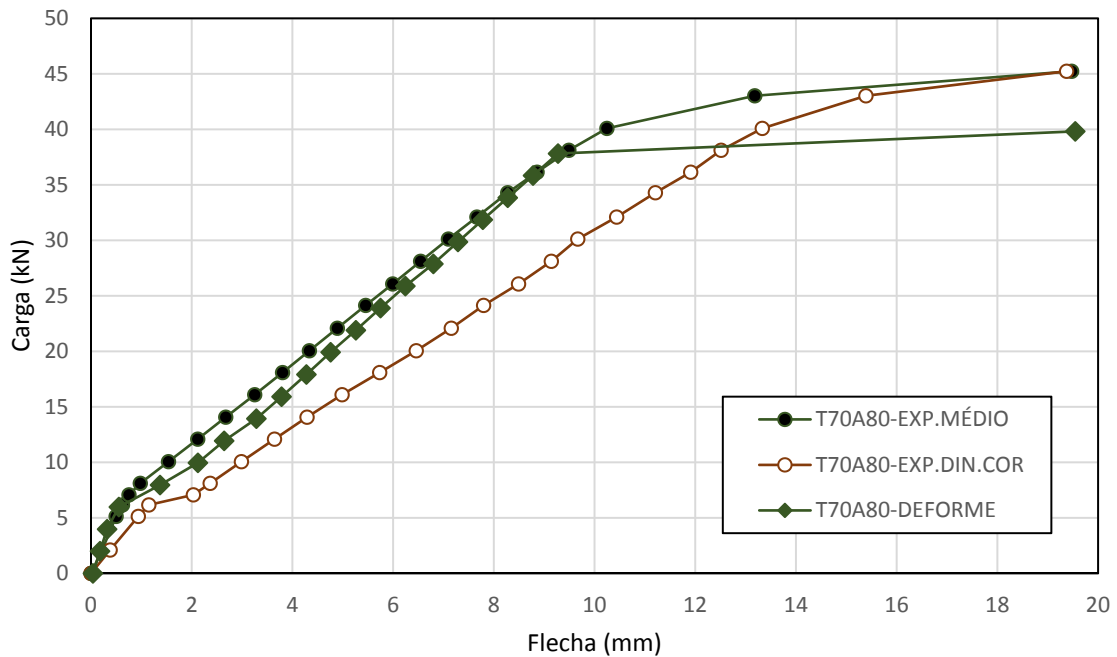


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

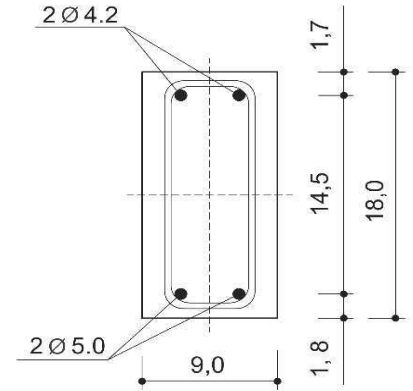
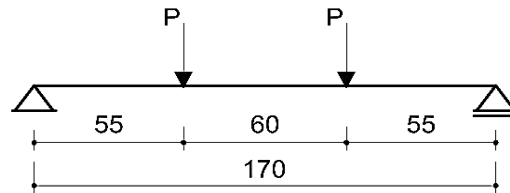
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A50

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 90,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,4
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 30,4
- . Fctm (MPa) = 2,4
- . Ec (MPa) = 22840,0



Corte A-A

Resultados

T80A50-R1					T80A50-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	81,25	8,19	100,00%	0,00	0,00	80,21	7,98	100,00%
1,04	0,11	81,25	8,19	100,00%	1,02	0,01	80,21	7,98	100,00%
2,03	0,23	82,21	8,39	102,37%	2,04	0,19	80,14	7,97	99,84%
4,04	0,52	82,18	8,38	102,31%	4,05	0,48	79,50	7,84	98,25%
5,02	0,84	80,70	8,08	98,64%	5,03	0,73	77,96	7,54	94,49%
6,01	1,53	77,03	7,36	89,88%	6,02	1,39	76,70	7,30	91,46%
7,02	2,60	78,79	7,70	94,04%	7,01	2,38	76,11	7,19	90,05%
8,02	3,43	72,91	6,60	80,52%	8,02	3,20	71,65	6,37	79,80%
10,03	4,75	69,96	6,07	74,14%	10,03	4,61	71,33	6,31	79,10%
12,07	6,03	68,68	5,85	71,46%	12,02	5,99	70,69	6,20	77,68%
14,02	7,24	67,97	5,73	69,98%	14,02	7,42	69,55	6,00	75,20%
16,01	9,24	57,17	4,06	49,51%	16,00	9,97	64,64	5,18	64,95%
17,75	14,59	52,27	3,39	41,38%	17,68	16,34	52,92	3,48	43,54%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T80A50

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A50-R3					T80A50-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	82,28	8,40	100,00%	0,00	0,00	81,25	8,19	100,00%
1,03	0,05	82,28	8,40	100,00%	1,03	0,06	81,25	8,19	100,00%
2,04	0,16	82,13	8,37	99,63%	2,04	0,19	81,49	8,24	100,61%
4,01	0,39	81,44	8,23	97,96%	4,03	0,47	81,04	8,15	99,49%
5,04	0,59	81,42	8,23	97,90%	5,03	0,72	80,02	7,95	97,01%
5,98	0,89	80,27	8,00	95,16%	6,00	1,27	78,00	7,55	92,17%
7,02	1,64	78,59	7,66	91,23%	7,02	2,21	77,83	7,52	91,77%
8,03	2,46	77,80	7,51	89,39%	8,02	3,03	74,12	6,82	83,22%
10,03	3,92	76,36	7,24	86,12%	10,03	4,42	72,55	6,53	79,74%
12,03	5,14	68,11	5,76	68,52%	12,04	5,72	69,16	5,94	72,47%
14,02	6,34	68,23	5,78	68,77%	14,02	7,00	68,58	5,84	71,26%
16,03	7,66	68,37	5,80	69,05%	16,02	8,96	63,39	4,99	60,88%
18,89	13,65	53,29	3,52	41,94%	18,11	14,86	52,83	3,46	42,28%

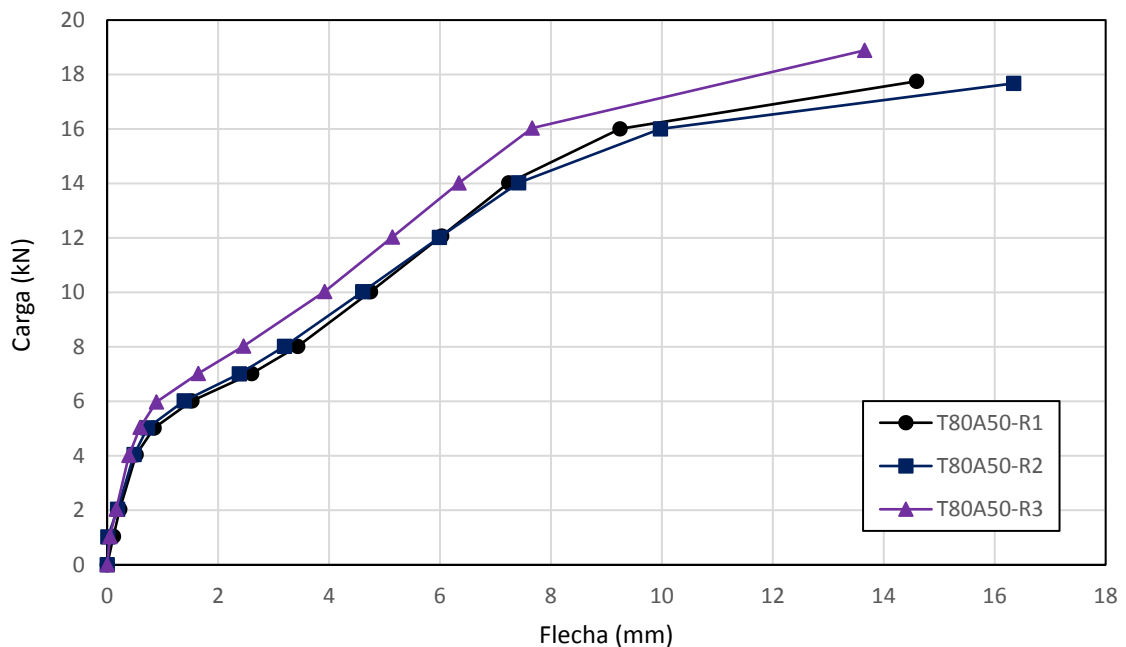


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T80A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A50

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

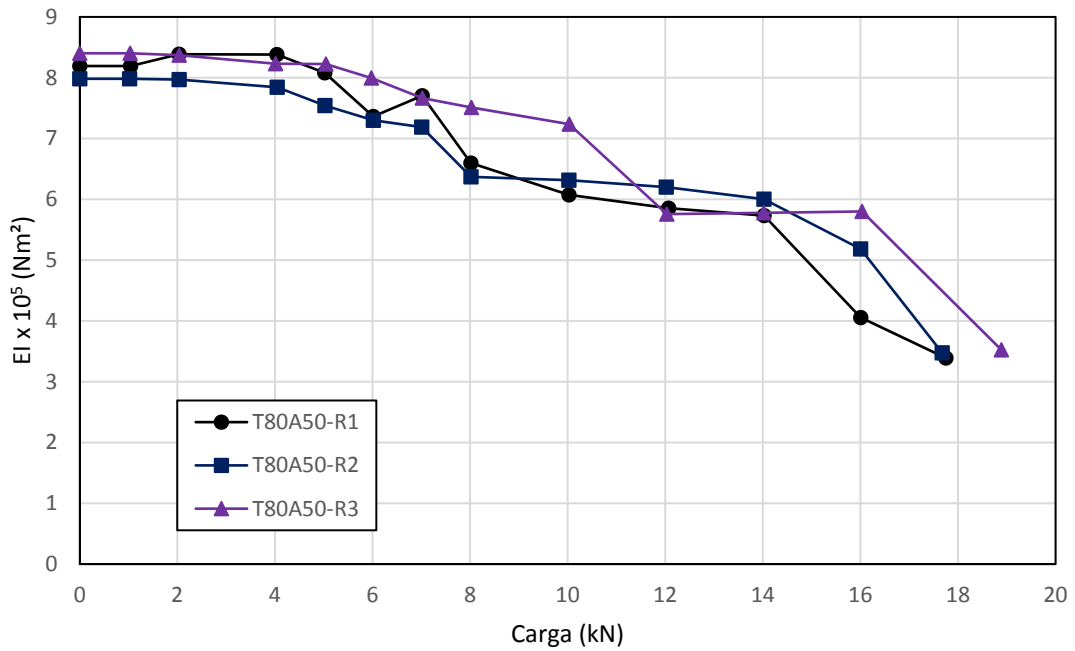


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T80A50

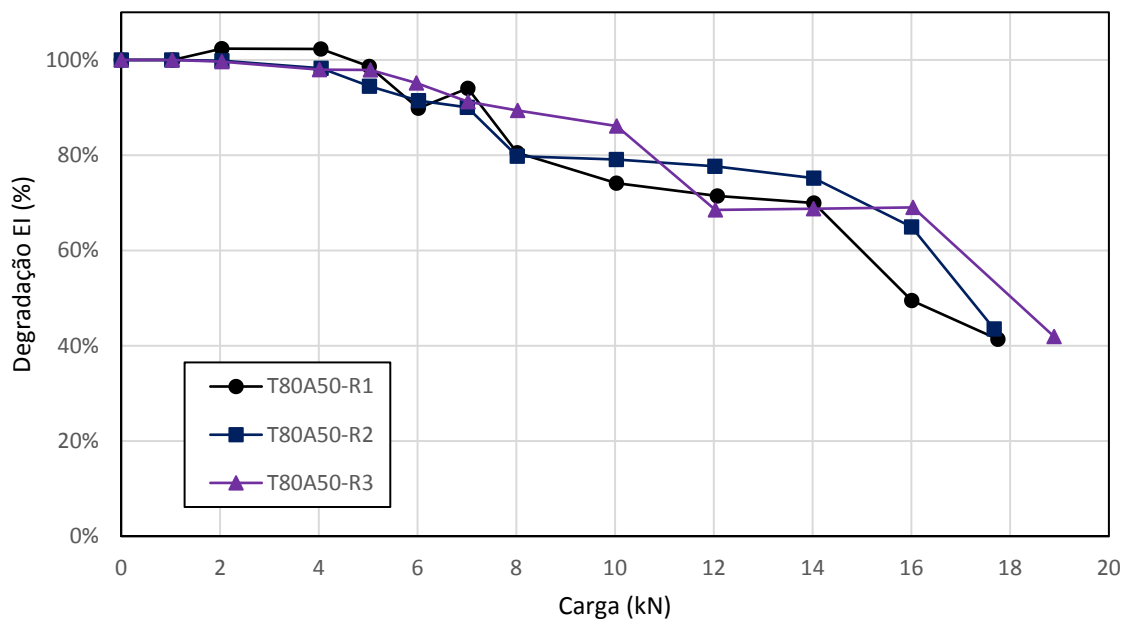


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T80A50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A50

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A50-ANALÍTICO		T80A50-EXP.DIN.COR	
Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
6,75	1,08	1,03	0,22
7,02	1,24	2,04	0,42
8,02	1,95	4,03	0,85
10,03	3,91	5,03	1,70
12,04	6,39	6,00	2,09
14,02	9,10	7,02	2,45
16,02	11,89	8,02	2,99
18,11	14,79	10,03	3,85
		12,04	4,94
		14,02	5,82
		16,02	7,44
		18,11	11,15

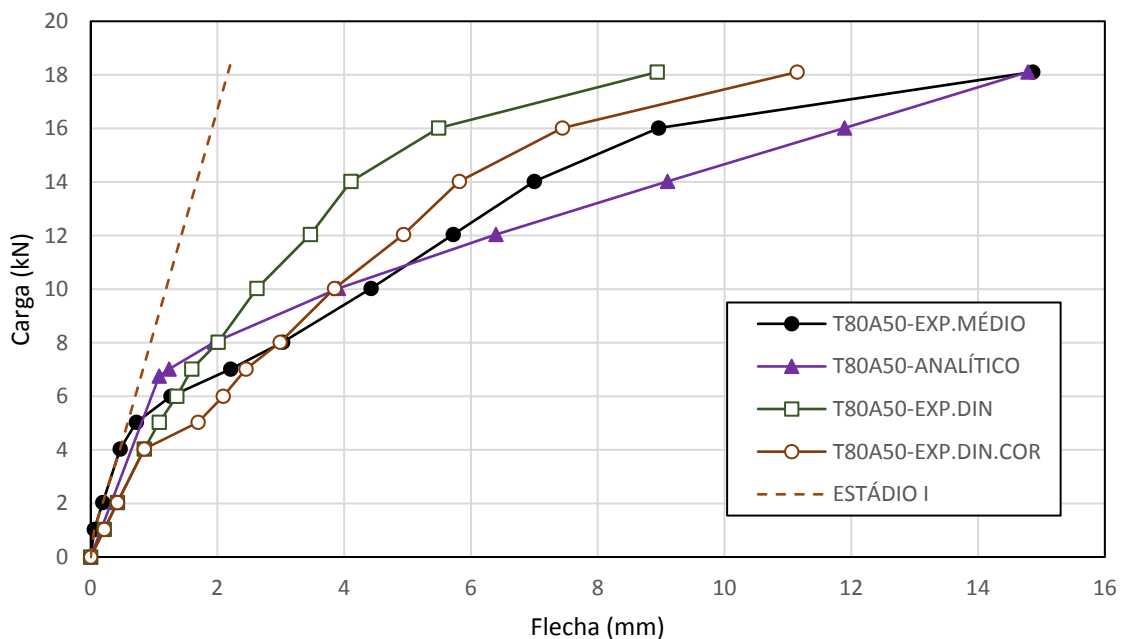


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A50

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

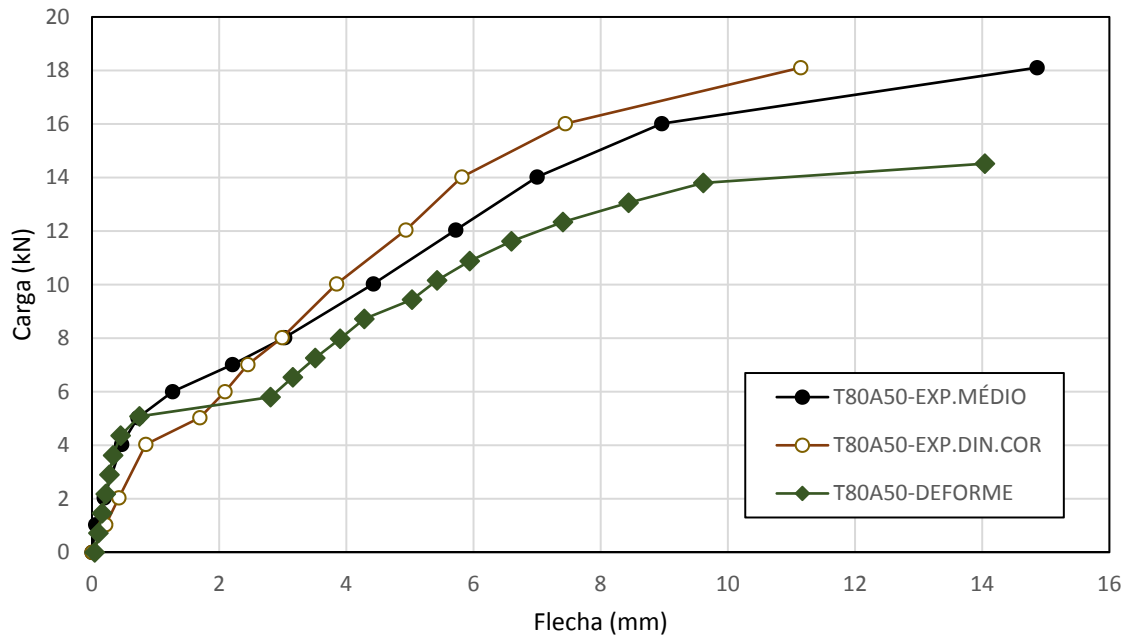


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

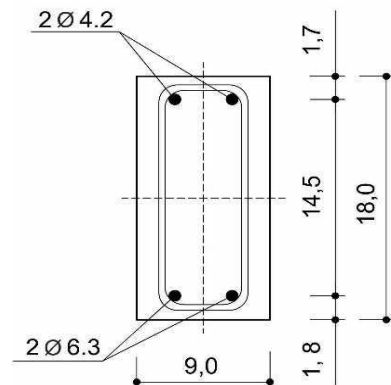
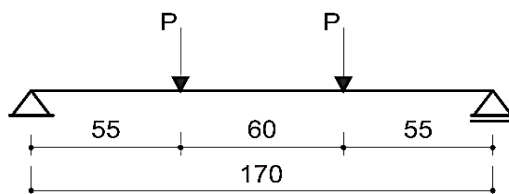
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A63

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 0,6
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 50,2
- . Fctm (MPa) = 3,6
- . Ec (MPa) = 26880,0



Corte A-A

Resultados

T80A63-R1					T80A63-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	81,67	8,26	100,00%	0,00	0,00	84,07	8,75	100,00%
2,04	0,13	81,67	8,26	100,00%	2,06	0,21	84,62	8,87	101,29%
4,06	0,36	81,44	8,21	99,45%	4,06	0,42	82,40	8,41	96,05%
5,06	0,55	80,38	8,00	96,88%	5,07	0,57	81,92	8,31	94,94%
6,05	0,86	80,91	8,11	98,16%	6,05	0,80	81,63	8,25	94,27%
7,04	1,19	79,56	7,84	94,91%	7,06	1,13	80,29	7,98	91,21%
8,03	1,59	79,18	7,77	94,01%	8,04	1,53	80,29	7,98	91,21%
10,03	2,41	78,48	7,63	92,34%	10,04	2,58	79,41	7,81	89,22%
14,03	4,07	78,52	7,64	92,43%	14,04	4,19	78,91	7,71	88,09%
18,05	5,68	77,02	7,35	88,95%	18,05	5,83	78,33	7,60	86,80%
20,02	6,43	76,44	7,24	87,60%	22,05	7,56	76,92	7,33	83,70%
25,71	8,74	76,26	7,20	87,20%	25,37	11,81	76,71	7,29	83,26%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T80A63

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A63-R3					T80A63-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	82,80	8,49	100,00%	0,00	0,00	82,85	8,50	100,00%
2,15	0,20	82,91	8,51	100,27%	2,08	0,18	83,07	8,55	100,53%
4,05	0,40	82,08	8,34	98,27%	4,06	0,39	81,97	8,32	97,90%
5,04	0,60	82,07	8,34	98,24%	5,05	0,57	81,46	8,22	96,67%
6,04	0,92	80,60	8,04	94,74%	6,05	0,86	81,05	8,13	95,70%
7,04	1,30	79,79	7,88	92,86%	7,05	1,21	79,88	7,90	92,97%
8,03	1,70	78,55	7,64	90,01%	8,03	1,61	79,34	7,80	91,72%
10,00	2,58	77,47	7,43	87,54%	10,03	2,52	78,45	7,62	89,68%
14,28	4,29	75,42	7,04	82,96%	14,12	4,18	77,61	7,46	87,76%
18,04	5,70	76,10	7,17	84,46%	18,04	5,74	77,15	7,37	86,72%
20,05	6,42	75,04	6,97	82,13%	20,71	6,80	76,13	7,18	84,44%
26,04	8,76	75,03	6,97	82,10%	25,71	9,77	76,00	7,15	84,15%
26,98	10,82	65,58	5,33	62,72%	26,98	10,82	65,58	5,33	62,65%

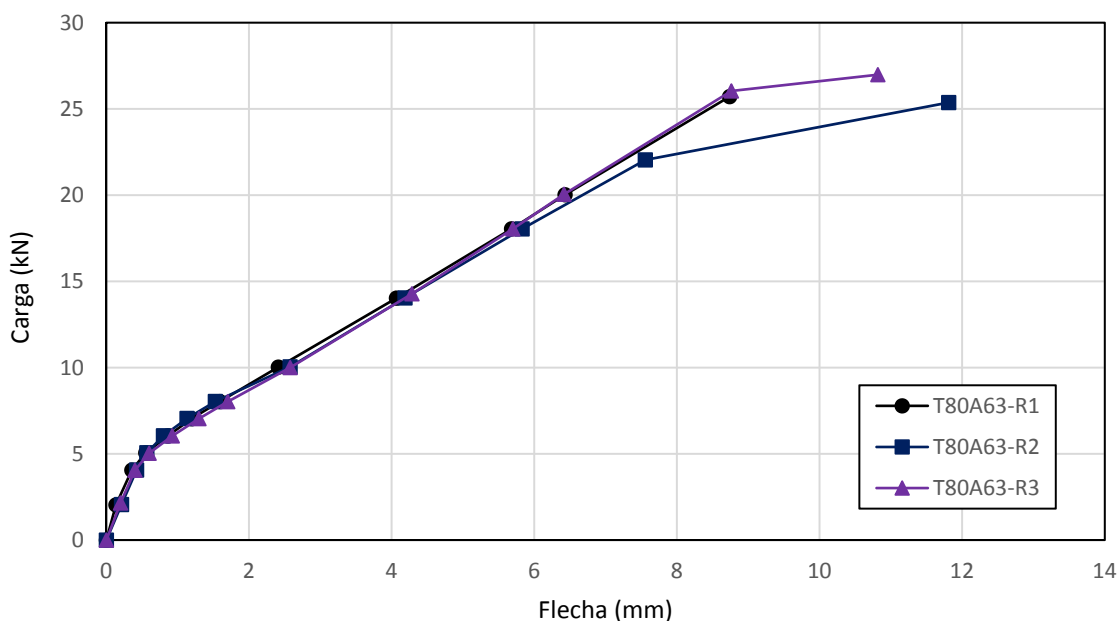


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T80A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A63

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

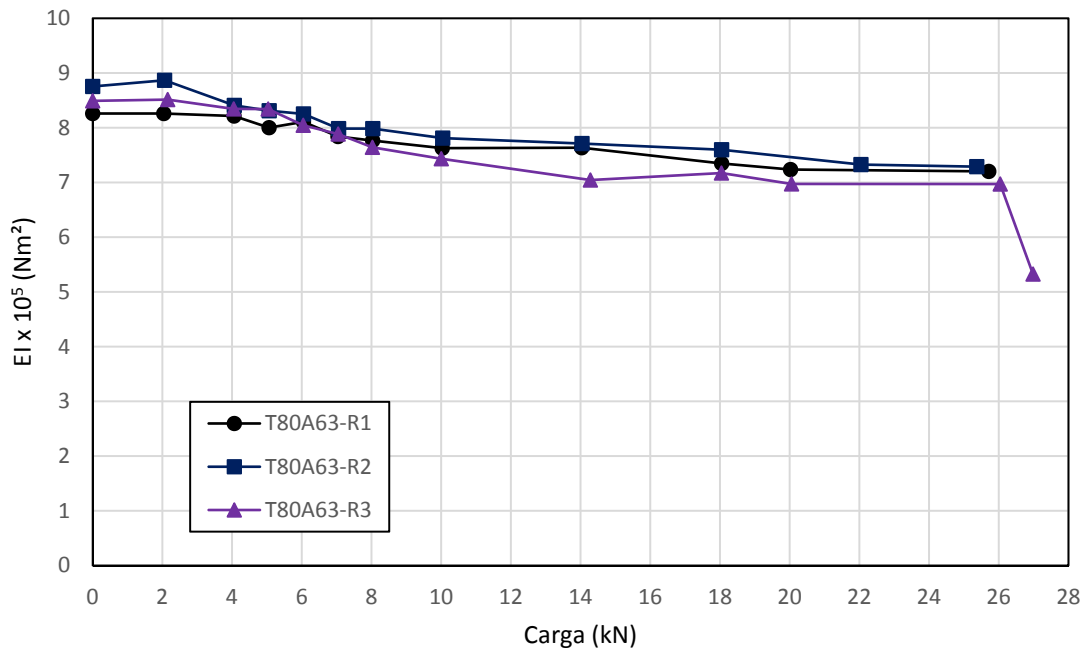


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T80A63

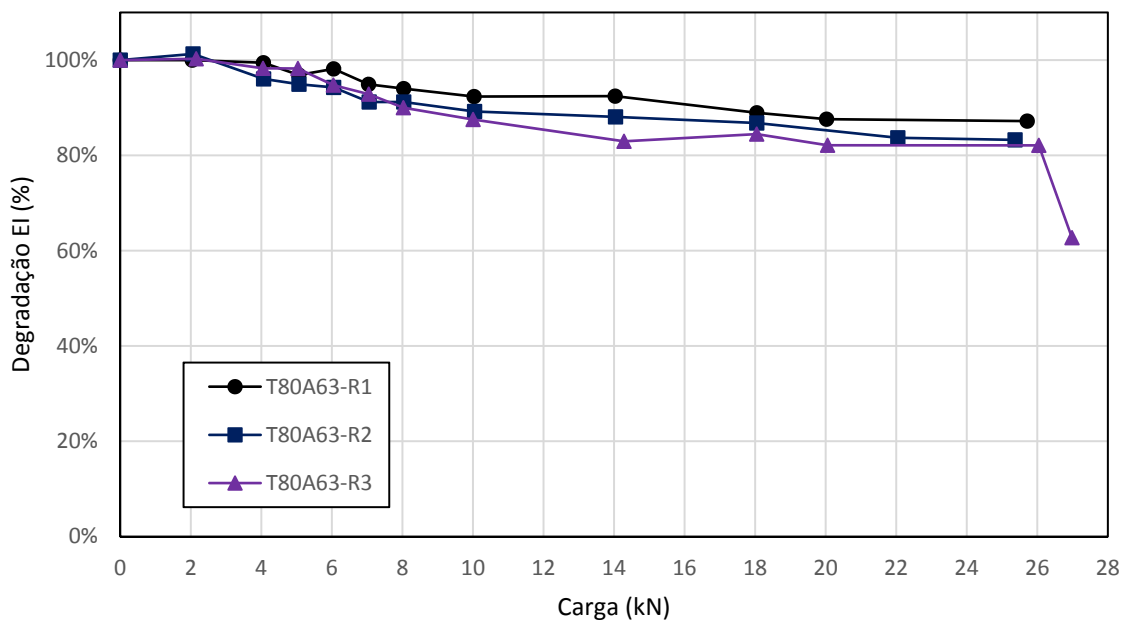


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T80A63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A63

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A63-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
6,89	1,08
7,05	1,17
8,03	1,78
10,03	3,34
14,12	7,18
18,04	10,84
20,71	13,18
25,71	17,32
26,98	18,34

T80A63-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,08	0,42
4,06	0,83
5,05	1,54
6,05	1,86
7,05	2,21
8,03	2,54
10,03	3,22
14,12	4,61
18,04	5,94
20,71	6,95
25,71	8,65
26,98	11,29

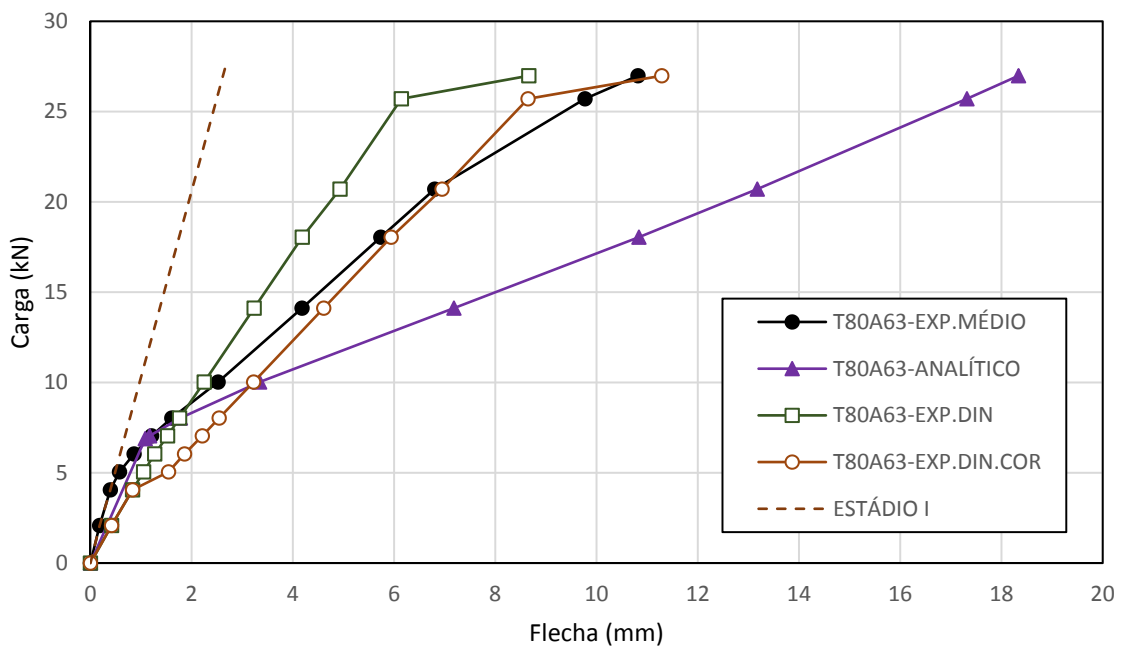


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A63

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

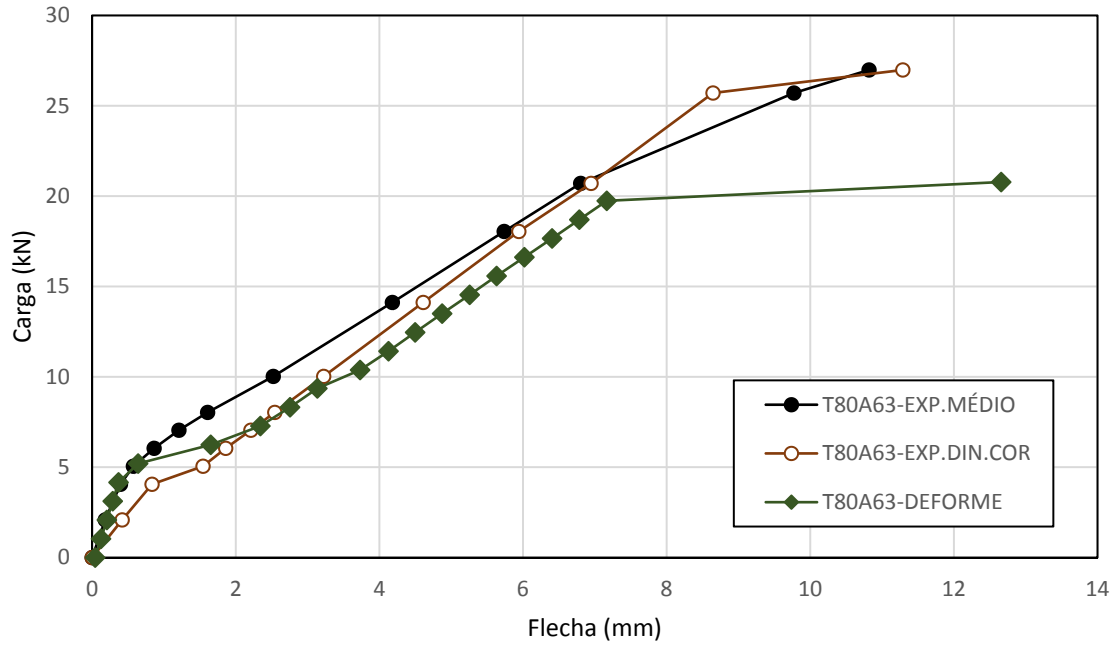


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

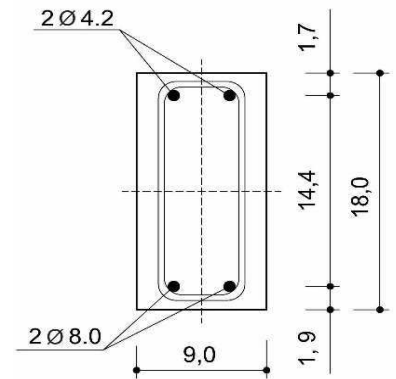
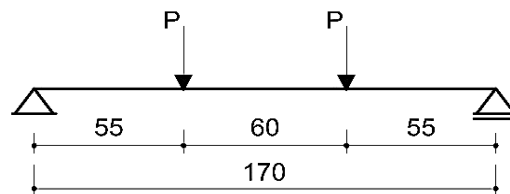
Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T80A80

Página	01/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

Características geométricas e mecânicas

- . L (cm) = 170,0
- . bw (cm) = 9,0
- . h (cm) = 18,0
- . As (cm²) = 1,0
- . Es (MPa) = 210000,0
- . Fc (MPa) = 50,2
- . Fctm (MPa) = 3,6
- . Ec (MPa) = 26880,0



Corte A-A

Resultados

T80A80-R1					T80A80-R2				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 10 ⁵ (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	81,60	8,47	100,00%	0,00	0,00	83,49	8,86	100,00%
2,09	0,21	81,02	8,35	98,59%	2,09	0,21	82,39	8,63	97,36%
4,10	0,37	80,29	8,20	96,81%	4,10	0,42	83,24	8,81	99,40%
5,21	0,56	80,22	8,18	96,63%	5,12	0,56	81,98	8,54	96,41%
6,55	0,86	77,96	7,73	91,27%	6,10	0,76	81,60	8,47	95,52%
7,10	1,05	75,98	7,34	86,70%	7,11	1,01	81,81	8,51	96,00%
8,12	1,31	76,84	7,51	88,67%	8,28	1,34	80,80	8,30	93,65%
10,08	1,88	77,80	7,69	90,89%	10,10	1,85	80,47	8,23	92,89%
16,13	3,61	76,19	7,38	87,16%	16,08	3,61	79,71	8,08	91,15%
20,10	4,70	75,48	7,24	85,56%	20,09	4,79	79,34	8,00	90,29%
30,11	7,56	75,35	7,22	85,27%	30,11	7,64	78,78	7,89	89,03%
40,09	10,81	72,71	6,72	79,38%	40,09	10,76	75,38	7,22	81,51%
45,06	12,85	70,41	6,30	74,46%	45,09	13,13	75,83	7,31	82,49%
48,75	23,90	56,55	4,07	48,03%	48,47	20,67	53,67	3,66	41,31%

Notas:

Nomeclatura dos modelos - T**A**-R**

Grupo 1 - T** - Identificador da relação A/C do traço de concreto (x10E-2)

Grupo 2 - A** - Diâmetro da armadura (x10E-1)

Grupo 3 - R* - Número da repetição



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
 Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
 Modelos T80A80

Página	02/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A80-R3					T80A80-EXP.MÉDIO				
Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	EI x 105 (Nm ²)	Deg EI (%)
0,00	0,00	80,37	8,21	100,00%	0,00	0,00	81,82	8,51	100,00%
2,23	0,18	80,37	8,21	100,00%	2,13	0,20	81,26	8,39	98,63%
4,12	0,40	80,67	8,27	100,75%	4,11	0,40	81,40	8,42	98,98%
5,09	0,59	80,77	8,29	101,01%	5,14	0,57	80,99	8,34	97,98%
6,11	0,84	79,41	8,02	97,63%	6,25	0,82	79,66	8,07	94,78%
7,08	1,13	79,01	7,94	96,64%	7,10	1,06	78,93	7,92	93,06%
8,05	1,41	78,25	7,78	94,80%	8,15	1,35	78,63	7,86	92,35%
10,09	1,96	76,04	7,35	89,52%	10,09	1,90	78,10	7,75	91,11%
16,08	3,66	74,91	7,13	86,88%	16,10	3,63	76,94	7,53	88,42%
20,10	4,81	74,38	7,03	85,65%	20,10	4,77	76,40	7,42	87,18%
30,10	7,72	74,27	7,01	85,40%	30,11	7,64	76,14	7,37	86,58%
39,22	11,08	66,74	5,66	68,95%	39,80	10,88	71,61	6,52	76,59%
					45,08	12,99	73,12	6,80	79,87%
					48,61	22,28	55,11	3,86	45,36%

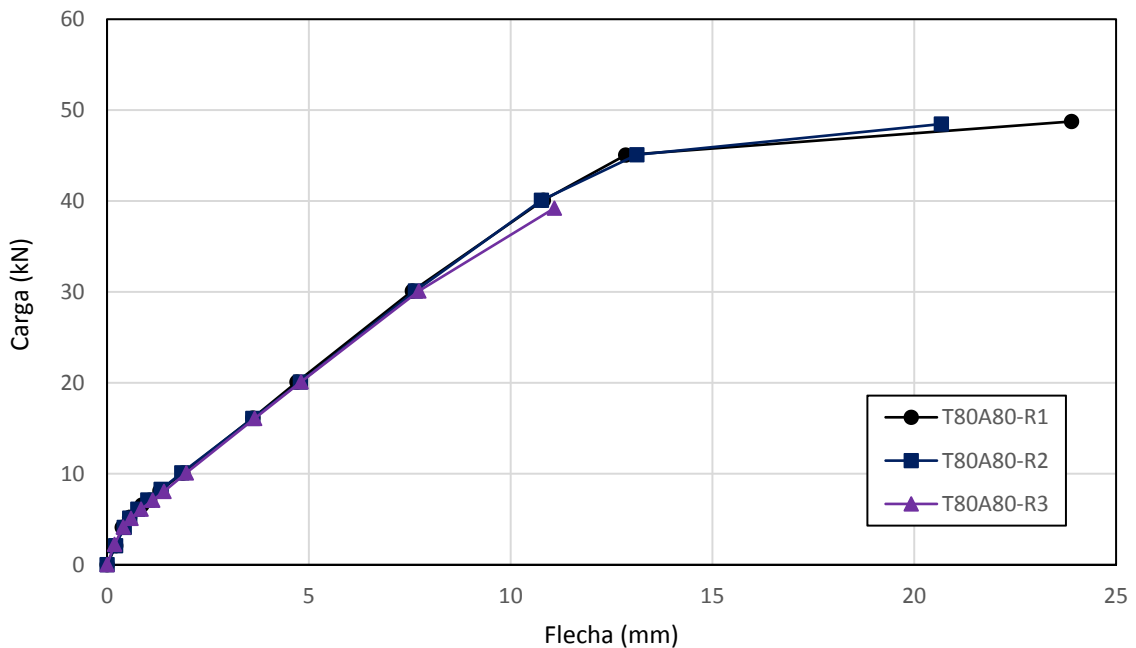


Diagrama Carga-Flecha dos modelos T80A80



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A80

Página	03/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

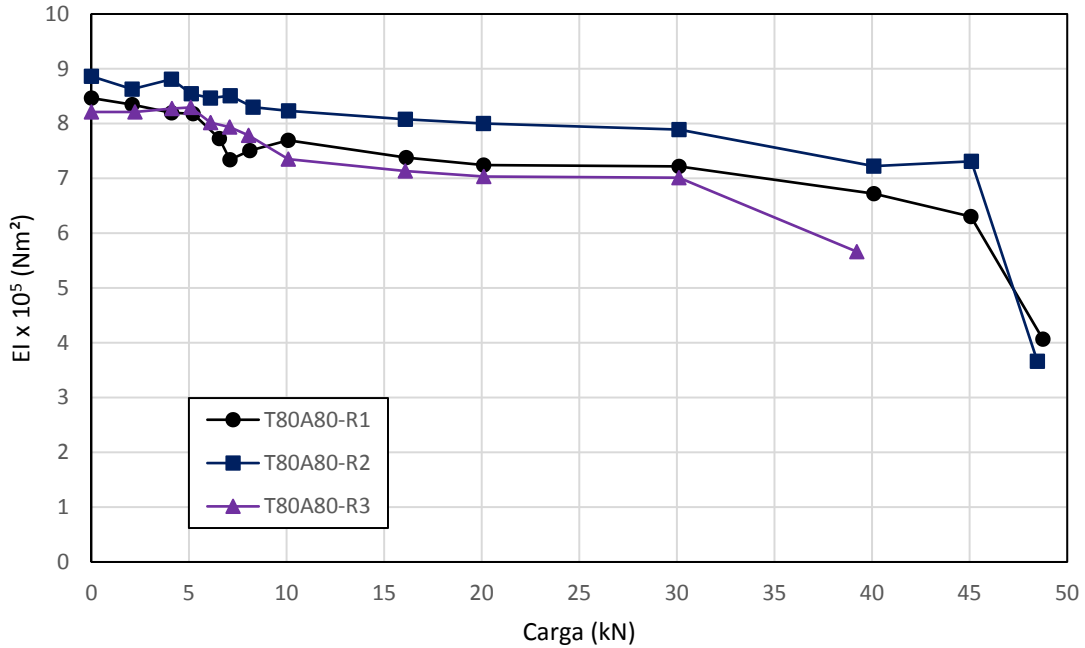


Diagrama de degradação da rigidez dos modelos T80A80

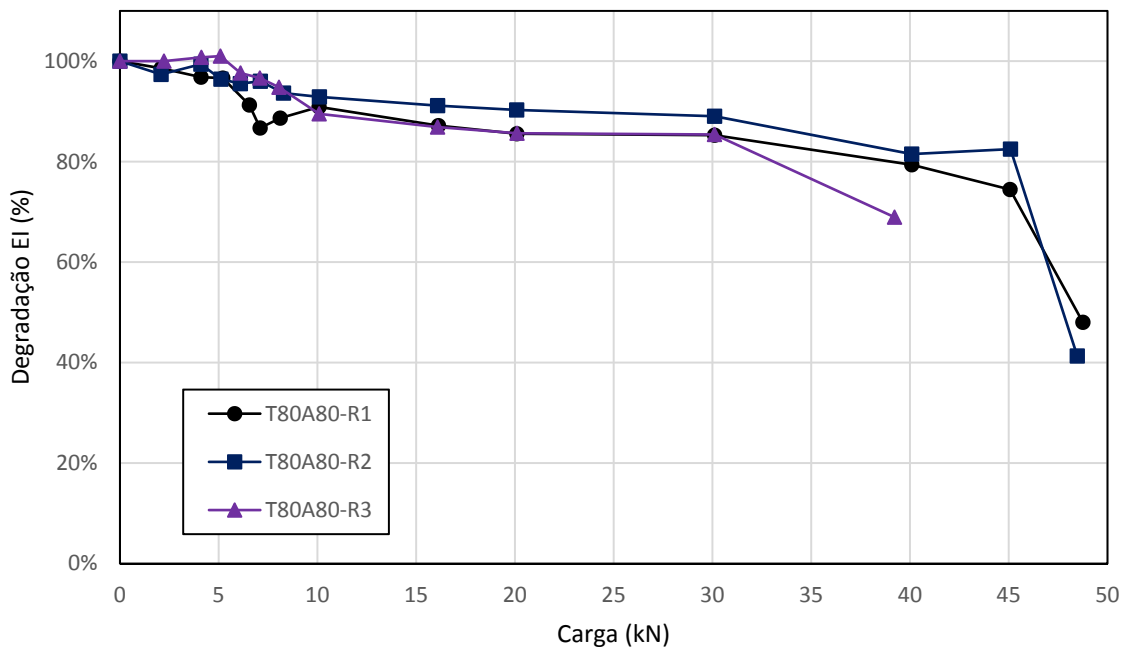


Diagrama de degradação da rigidez percentual dos modelos T80A80



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A80

Página	04/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

T80A80-ANALÍTICO

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
7,08	1,08
8,15	1,64
10,09	2,83
16,10	6,77
20,10	9,17
30,11	14,68
39,80	19,72
45,08	22,43
48,61	24,23

T80A80-EXP.DIN.COR

Carga (kN)	Flecha (mm)
0,00	0,00
2,13	0,43
4,11	0,83
5,14	1,55
6,25	1,93
7,10	2,22
8,15	2,57
10,09	3,21
16,10	5,22
20,10	6,59
30,11	9,92
39,80	14,31
45,08	15,73
48,61	26,26

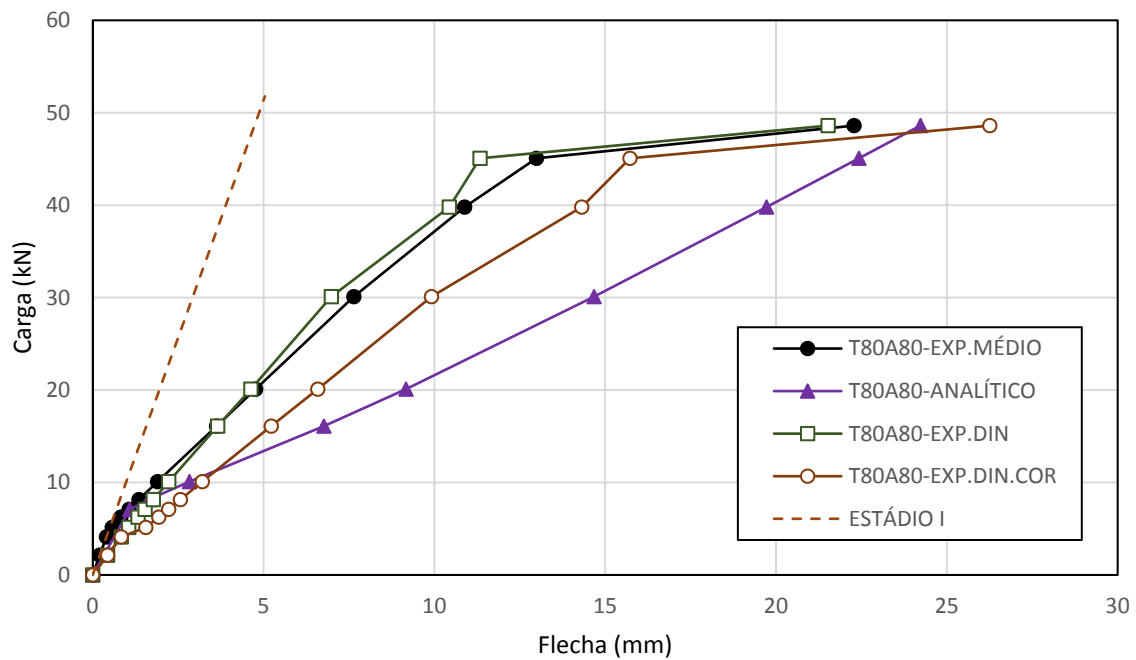


Diagrama Carga-Flecha para resultados analítico e experimental



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil

Relatório de Ensaio

Vigas de concreto armado
Modelos T80A80

Página	05/05	
Revisão	A	
Controle	Resp.	Data
Preparado	Gustavo	08/10/16
Verificado	Gustavo	15/10/16
Aprovado	JLRangel	05/11/16

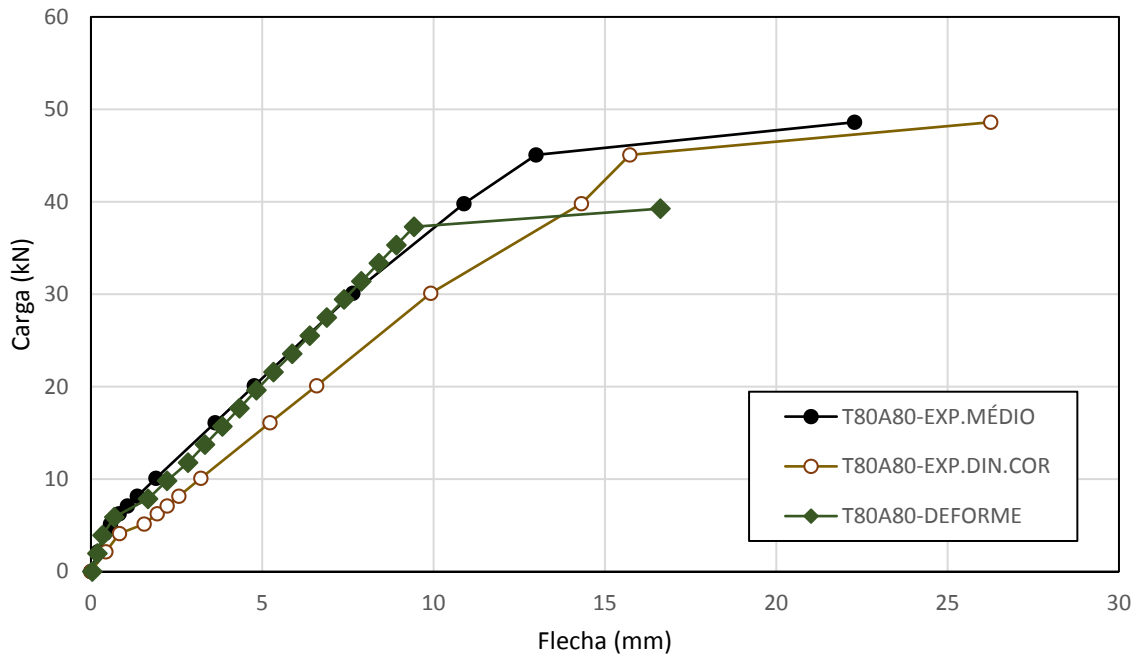


Diagrama Carga-Flecha para resultados experimentais e numérico

ANEXO 1

GUIA DO USUÁRIO DO PROGRAMA DEFORME

Neste Anexo é apresentado o Guia do Usuário do programa DEFORME v3.02-c1, contendo um roteiro de operação.

The logo for the software 'Deforme' is displayed in a white, italicized, sans-serif font. The text is centered within a dark blue rectangular background. A thin white horizontal line is positioned directly beneath the text.

Deforme

Versão 3.02-c1

Análise não-linear de elementos estruturais

Guia do usuário

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

1 INTRODUÇÃO

O DEFORME é um programa computacional destinado à análise de elementos estruturais de concreto armado e argamassa armada em condições de serviço e de colapso.

O programa permite considerar as relações constitutivas dos materiais e o fenômeno do *Tension Stiffening*.

O DEFORME permite determinar a configuração deformada de uma seção transversal qualquer, simétrica em relação ao eixo segundo o qual se dá a flexão, com um arranjo qualquer de armaduras.

Trata-se de um programa integrado, operado a partir de menus, através dos quais o usuário define os dados de entrada do problema, executa os cálculos e gera relatórios.

O programa foi inicialmente desenvolvido por Paes (1994), no âmbito de sua dissertação de mestrado, utilizando-se a linguagem Pascal, os conceitos de programação estruturada e uma estrutura modular. Com o avanço dos ambientes integrados para desenvolvimento de programas, Paes (2000) implementou a versão 3.01 do DEFORME em linguagem Pascal, no ambiente de programação Borland Delphi 5.0TM. A interface desta nova versão foi desenhada utilizando-se recursos de programação orientada a eventos. Na versão 3.01 desenvolvida para ambiente WindowsTM somente foi implementada a determinação da configuração deformada de uma seção transversal submetida a um par de esforços N e M e a determinação do Diagrama Momento x Curvatura.

A versão 3.02 do DEFORME foi implementada em linguagem Pascal, no ambiente Borland Delphi 5.0TM. Esta nova versão permite gerar resultados de configuração deformada de uma seção transversal, flechas e verificação da fissuração.

Na Figura 1.1 apresenta-se a estrutura geral de funcionamento do programa DEFORME.

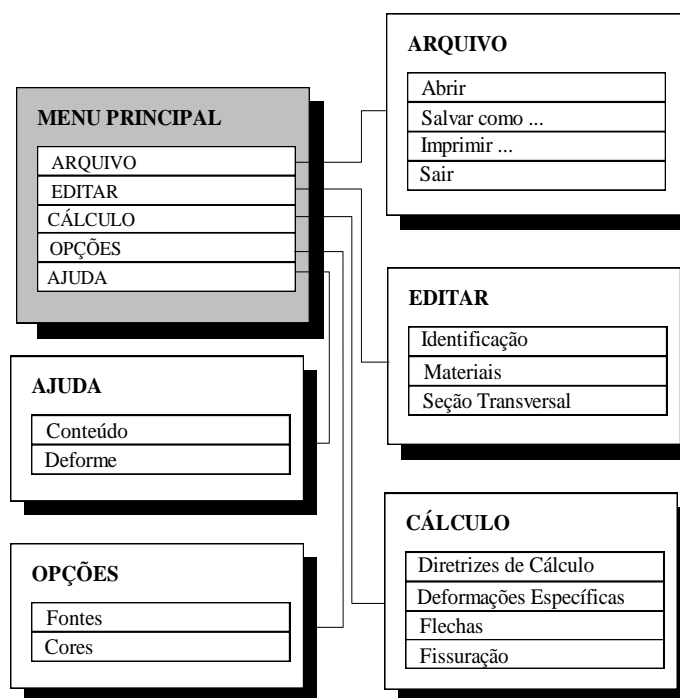


Figura 1.1 – Estrutura de funcionamento do programa DEFORME.

As verificações do DEFORME são realizadas a partir da definição de uma seção transversal qualquer, com pelo menos um eixo de simetria, cujo arranjo de armaduras envolva armaduras discretas e/ou distribuídas.

A base para o estudo do comportamento em serviço é a obtenção da configuração deformada (ε_0 e k_0) da seção transversal quando submetida a um par de esforços N e M. Para o tratamento deste problema foi desenvolvido um algoritmo baseado no método iterativo de Newton-Raphson.

O programa foi desenvolvido com vistas a permitir a simulação numérica de situações usuais de projeto de elementos estruturais de concreto armado e argamassa armada, assim como para casos de estudos experimentais.

2 OPERAÇÃO DO PROGRAMA DEFORME

Para efeitos de operação do programa DEFORME, apresenta-se a seguir a estrutura de entrada de dados e as opções de cálculo disponíveis.

O DEFORME oferece opções de ler, gravar e imprimir arquivos gerados com o programa, utilizando recursos do ambiente WindowsTM (Figura 2.1). À medida que se procedem os

cálculos, o programa gera os resultados em novas janelas, possibilitando a visualização em tempo real.

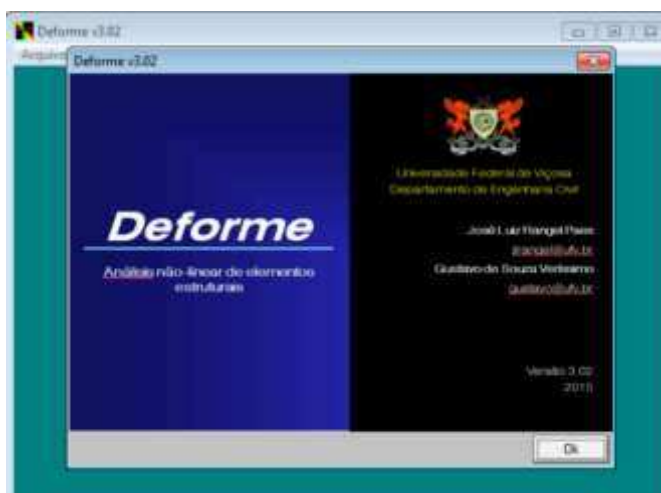


Figura 2.1 – Ambiente de trabalho do programa DEFORME.

2.1 Identificação de um caso de estudo

A conveniente identificação de um elemento em análise é básica para organização de qualquer cálculo de engenharia. Na opção **Editar-Identificação** (Figura 2.2), o programa oferece a possibilidade de identificar o caso em estudo, além de permitir que se faça outros comentários. Pressionando-se o botão **Ok** as informações e comentários são gravados, aparecendo em todos os relatórios gerados.



Figura 2.2 – Janela de identificação de um elemento em estudo.

2.2 Definição dos materiais

Nesta janela, define-se os tipos de materiais que irão compor a seção transversal e suas respectivas características mecânicas. Na opção **Editar-Materiais** (Figura 2.3), o usuário define tais características dos materiais.

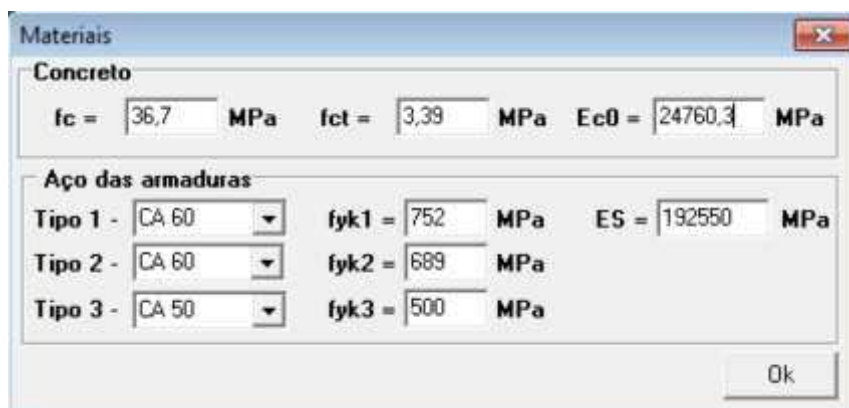


Figura 2.3 – Janela de definição do tipo e características dos materiais.

O programa admite a definição de um tipo de concreto considerando as seguintes propriedades:

- f_c resistência nominal à compressão em MPa;
- f_{ct} resistência nominal à tração em MPa;
- E_{c0} módulo de deformação longitudinal na origem do Diagrama Tensão x Deformação em MPa.

O DEFORME aceita a entrada de aços europeus e brasileiros. Basta que se selecione na lista de aços o que se deseja usar, sendo também possível editar suas propriedades mecânicas.

2.3 Definição da seção transversal

A análise do DEFORME é feita a partir de uma seção transversal qualquer, com pelo menos um eixo de simetria, com qualquer distribuição de armaduras.

Para a entrada de dados no programa (Figura 2.4), a seção transversal deverá ser dividida em vários elementos retangulares. Para cada retângulo, deve informar a largura **B_w** e as cotas mínima, **Z_{min}** e máxima **Z_{max}** de acordo com um referencial. Deve também ser informado o número de camadas que serão consideradas em cada elemento. O programa se encarregará de dividir o elemento de concreto e determinar as características de cada

camada. As armaduras são caracterizadas a partir da definição área de aço A_s e da respectiva distância Z_{as} com base com relação a um eixo de referência.

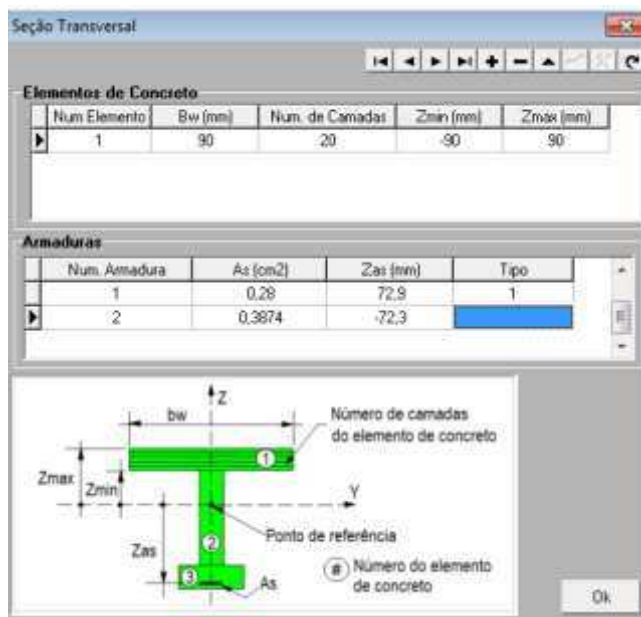


Figura 2.4 – Definição da seção transversal.

2.4 Diretrizes de cálculo

Por meio das diretrizes de cálculo do programa (Figura 2.5), o usuário pode escolher considerar relações constitutivas lineares ou não lineares (Figura 2.6) para os materiais utilizados na seção transversal, de modo a admitir a contribuição do concreto tracionado entre as fissuras.

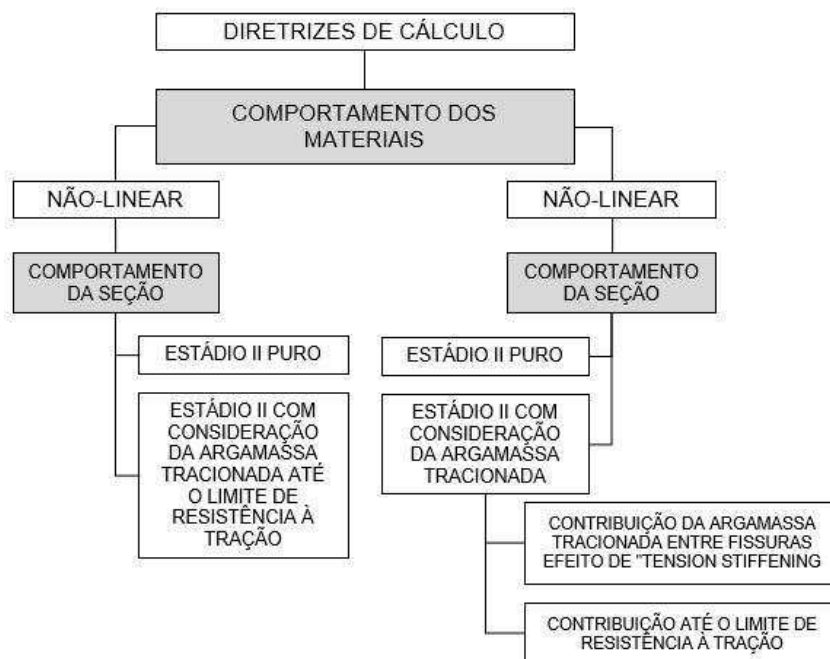


Figura 2.5 – Diretrizes de cálculo.

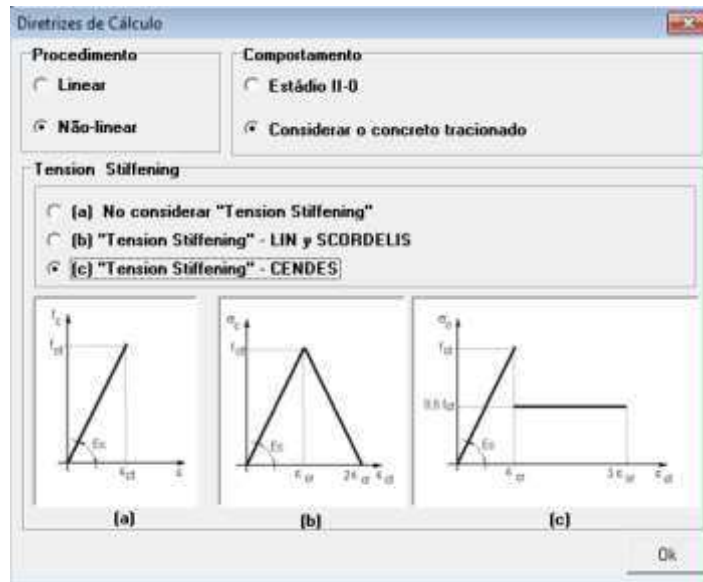


Figura 2.6 – Seleção de opções de consideração do *Tension Stiffening*.

2.5 Deformações na seção transversal para um par de esforços N e M

Para determinação da configuração deformada de uma seção transversal (ϵ_0 e k_0), o usuário deve selecionar a opção **Cálculo-Deformações Específicas-Deformações para N e M** (Figura 2.7) e informar os esforços aos quais a seção está submetida. Ao pressionar o botão **Calcula**, o programa realiza os cálculos e gera um relatório com os resultados obtidos (Figura 2.8). Nesse relatório, se apresentam a deformação axial, ϵ_0 , a curvatura, k_0 , a deformação superior e inferior da seção e a aproximação do processo de cálculo.

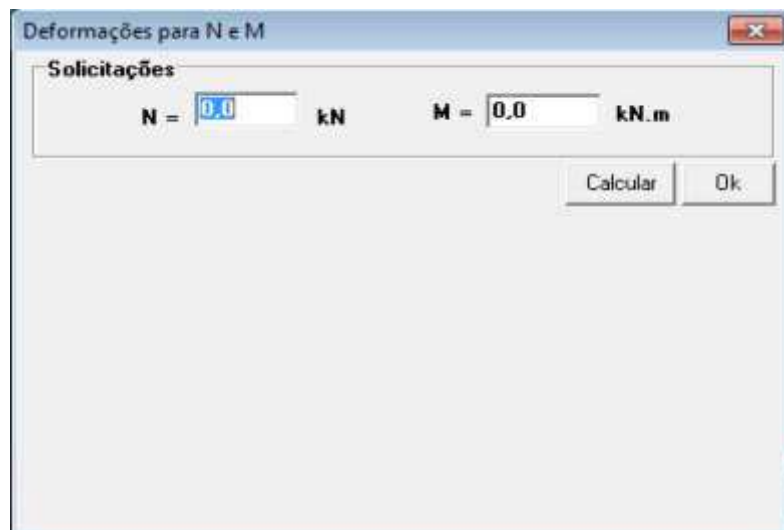


Figura 2.7 – Janela de entrada das solicitações na seção transversal.

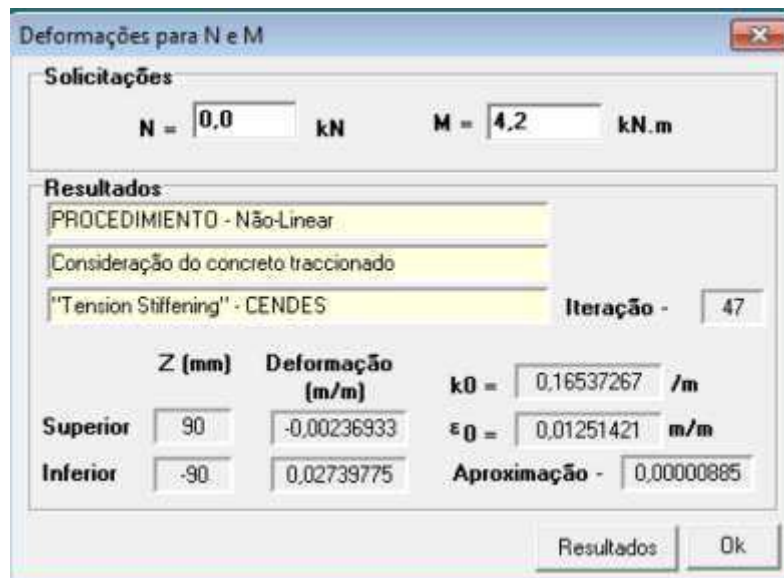


Figura 2.8 – Janela de resultados do cálculo do estado de deformação na seção transversal.

2.6 Diagrama Momento-Curvatura para uma seção transversal

O DEFORME também gera dados para o traçado do Diagrama Momento-Curvatura. Para isso, o usuário deve selecionar a opção **Cálculo-Deformações Específicas-Diagrama Momento x Curvatura** (Figura 2.9). Deve-se, então, definir o intervalo de esforços mínimo e máximo que a seção transversal está submetida, assim como o número de partes em que se dividirá o diagrama.

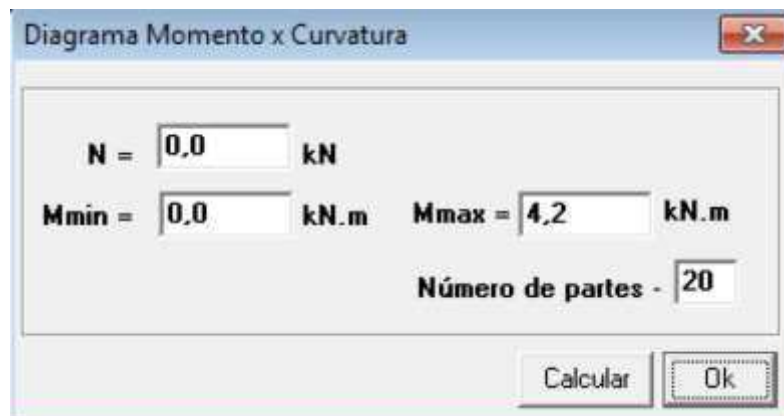


Figura 2.9 – Janela de entrada para cálculo do Diagrama Momento-Curvatura.

Ao clicar no botão **Calcula**, o programa realiza os cálculos, obtendo as curvaturas para todo o intervalo de valores de esforços definido pelo usuário. Pressionando-se **Ok**, o relatório gerado fica disponível para ser salvo e/ou impresso utilizando-se as opções **Arquivo-Salvar Como...** e **Arquivo-Imprimir...**

2.7 Linha Elástica

Os procedimentos de entrada para o cálculo da linha elástica são análogos às outras partes do programa. Acessando-se o menu **Cálculo-Flechas-Linha Elástica** (Figura 2.10) o usuário se depara com um janela na qual ele pode escolher entre duas opções de carregamento: distribuído ou concentrado. Escolhido o tipo de carregamento, preenchem-se os campos de entrada com o vão entre carga concentrada e o apoio (L1), vão entre cargas (L2), carregamento distribuído (q) e carregamento concentrado (P).

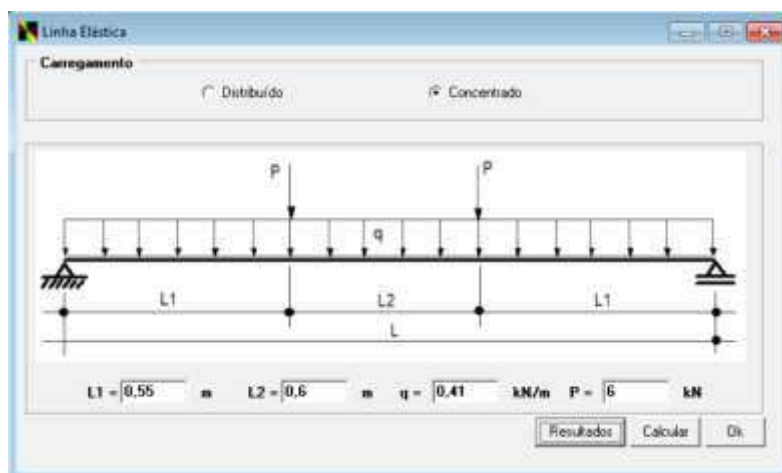


Figura 2.10 – Janela de entrada para cálculo da Linha Elástica.

2.8 Diagrama Carga-Flecha

O DEFORME oferece também a opção de cálculo das flechas e fornece os pares ordenados para o traçado do Diagrama Carga-Flecha, inclusive com a consideração da não constância de rigidez ao longo do comprimento da viga. Deve-se acessar o menu **Cálculo-Flechas-Diagrama Carga-Flecha** (Figura 2.11).

O usuário deve entrar com o vão entre carga concentrada e o apoio (L1), vão entre cargas (L2), carregamento distribuído (q) e o intervalo de valores para o carregamento concentrado (P_{\min} e P_{\max}), assim como o número de partes em que se dividirá a viga para feita dos cálculos.

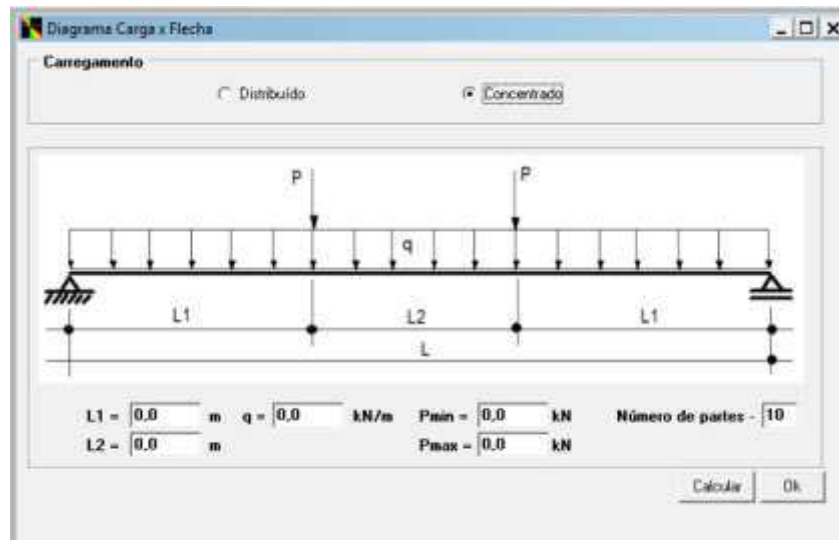


Figura 2.11 – Janela de entrada de dados para o Diagrama Carga-Flecha.

2.9 Momento de Fissuração

Nessa seção calcula-se o momento de aparecimento da primeira fissura. Para tanto, deve-se acessar o menu **Cálculo-Fissuração-Momento de Fissuração** (Figura 2.12). Alimenta-se, então, os campos referentes ao intervalo de momentos fletores (M_{\min} e M_{\max}) e ao incremento que se dará no processo de pesquisa do momento de fissuração. De posse desses valores, o DEFORME calcula o momento de fissuração e o apresenta em um relatório, ao clicar-se no botão **Calcula**.



Figura 2.12 – Janela para cálculo do Momento de Fissuração.

2.10 Manejo dos relatórios do DEFORME

As opções do menu **Arquivo-Salva Como...** (Figura 2.13) e **Arquivo-Imprimir...** (Figura 2.14) permitem ao usuário salvar e imprimir, respectivamente. É necessário se ter em mente que será salvo/impresso o relatório referente ao último procedimento de cálculo realizado pelo usuário. O DEFORME utiliza uma interface padrão do ambiente WindowsTM para o armazenamento e impressão dos arquivos.

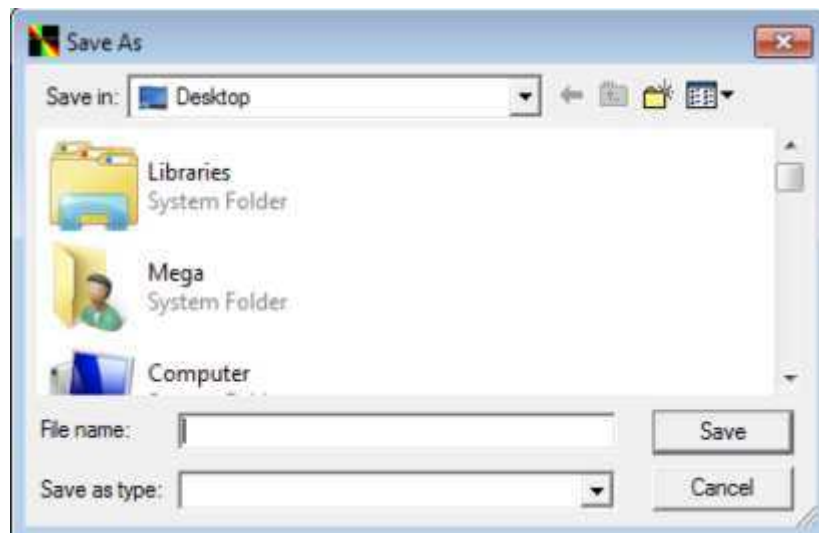


Figura 2.13 – Janela para salvar os arquivos gerados.

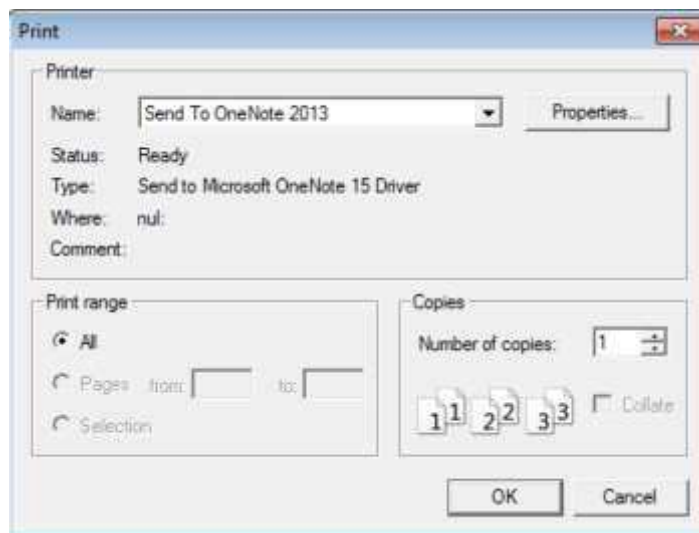


Figura 2.14 – Janela para impressão dos arquivos gerados.