



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG) /
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT) em implantação
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE FURTADO NUNES JORGE

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO
LIMITE DE SERVIÇO UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO

CATALÃO
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

FELIPE FURTADO NUNES JORGE

3. Título do trabalho

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO
UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por José Júlio De Cerqueira Pituba, Professor do Magistério



Superior, em 27/09/2022, às 10:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FELIPE FURTADO NUNES JORGE, Discente**, em 27/09/2022, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3216229** e o código CRC **6E1B478B**.

FELIPE FURTADO NUNES JORGE

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO
ESTADO LIMITE DE SERVIÇO UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal de Goiás (UFG) / Universidade Federal de Catalão (UFCAT) em implantação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Construção Civil. Linha de pesquisa: Mecânica das Estruturas e dos Materiais.

Orientador: Professor Doutor José Julio de Cerqueira Pituba.

CATALÃO
2022

**Ficha de identificação da obra pelo bibliotecário documentalista
Joana Rocha de Souza / CRB-1 1465**

J82c

Jorge, Felipe Furtado Nunes.

Cálculo de deslocamentos em vigas de concreto armado no estado limite de serviço utilizando a mecânica do dano. [manuscrito] / Felipe Furtado Nunes Jorge. - 2022.

CLXXXIII, 112 f.

Orientador: Prof^o Dr. José Julio de Cerqueira Pituba.

Dissertação [Mestrado] – Universidade Federal de Goiás (UFG) / Universidade Federal de Catalão (UFCAT) em implantação, Faculdade de Engenharia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Para obtenção do título de Mestrado em Engenharia Civil. – Catalão, 2022.

Bibliografia.

Anexos: figuras, tabelas, simbolos, abreviaturas e siglas .

1. Concreto armado. 2. Deflexão vertical em vigas de concreto armado. 3. Mecânica do dano . 4. Norma técnica. 5. Regime de serviço. I. Pituba, José Julio de Cerqueira, Orient. II. Título.

CDU: 624.012.45



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 5 da sessão de Defesa de Dissertação de **FELIPE FURTADO NUNES JORGE**, que confere o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

"Banca Examinadora de Qualificação/Defesa Pública de Dissertação/Tese realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo: Art. 2º A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."

Aos vinte e seis dias do mês de agosto de dois mil e vinte e dois e dois partir das 14 horas, na sala virtual (meet.google.com/wfi-rwuq-hnd), realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese/Dissertação intitulada "**CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO**" nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação stricto sensu em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses (BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho (UFG), outra no corpo do texto (UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Professor Doutor JOSÉ JULIO DE CERQUEIRA PITUBA (PPGEC/UFCAT)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professor Doutor CARLOS HUMBERTO MARTINS (PCV/UEM)**, membro titular externo; **Professor Doutor WELLINGTON ANDRADE DA SILVA (PPGEC/UFCAT)**, membro titular interno. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato Aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor José Julio de Cerqueira Pituba, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e seis dias do mês de agosto de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO



Documento assinado eletronicamente por **Wellington Andrade Da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2022, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Júlio De Cerqueira Pituba, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2022, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Humberto Martins, Usuário Externo**, em 26/08/2022, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3115495** e o código CRC **623EA3E5**.

Referência: Processo nº 23070.043923/2022-41

SEI nº 3115495

Dedico este trabalho aos meus pais,
Francisco e Walcinete, e à minha
irmã, Laís.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, equilíbrio e lucidez, me proporcionando inspiração em toda a minha caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Julio de Cerqueira Pituba, por todos os ensinamentos e incentivos recebidos desde a graduação. Pela importante contribuição para a realização deste trabalho, tendo uma dedicada orientação.

Agradeço aos meus pais: Francisco e Walcinete, sempre presentes apoiando em todos os momentos da minha vida, fazendo-me sentir capaz. À minha irmã, Laís, pelo convívio afetivo.

Aos Prof. Dr. Carlos Humberto Martins e Prof. Dr. Wellington Andrade da Silva, pelas sugestões oferecidas no exame de qualificação, que muito contribuíram na elaboração desta dissertação.

Agradeço também aos meus amigos Marcelo, Marcos Vinícius e Roberto, que não só me auxiliaram com ajuda técnica, mas com companheirismo e apoio em toda a minha jornada. Aos novos amigos do mestrado, Caleb, Donizetti, Leandro e Maria Júlia, que compartilharam comigo momentos de estudo, conhecimento, incentivo e descontração ao longo de todo o curso.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela oportunidade de estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ASPECTOS GERAIS E SÍNTESE DO CONTEÚDO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 METODOLOGIA E FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	5
1.5 ESTADO DA ARTE	5
1.5.1 Considerações Preliminares.....	5
1.5.2 Mapeamento Sistêmico	6
1.5.3 Revisão da Literatura.....	12
1.5.3.1 Modelos Constitutivos	12
1.5.3.2 Modelos de Dano e Aplicações em Estruturas de Concreto Armado	14
2 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DO DANO NO CONTÍNUO.....	25
2.1 GENERALIDADES E DEFINIÇÕES	25
2.2 VARIÁVEL DE DANO EM MEIOS CONTÍNUOS.....	28
2.2.1 Conceito de Tensão Efetiva.....	30
2.3 PRINCÍPIOS GERAIS DE EQUIVALÊNCIAS EM ANÁLISE UNIDIMENSIONAL	31
2.3.1 Princípio de Equivalência em Deformação	31
2.3.2 Princípio de Equivalência em Tensão	33
2.3.3 Princípio de Equivalência em Energia Elástica	34
2.4 MODELO DE DANO DE PITUBA – VERSÃO UNIAXIAL (2003).....	35
3 CRITÉRIOS NORMATIVOS	38
3.1 PROCEDIMENTO DA NBR 6118 (ABNT, 2014).....	38
3.2 PROCEDIMENTO DO ACI 318R (2014)	43
4 MODELOS DE ESTIMATIVA DE DESLOCAMENTOS UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO	46

4.1	HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA.....	46
4.2	HIPÓTESES PARA O PARÂMETRO “A”.....	49
4.2.1	Validação da Proposta de Costa (2020).....	53
4.2.1.1	Especificações Adotadas	53
4.2.1.2	Resultados das Análises Numéricas	59
4.2.1.3	Conclusões Gerais Sobre as Análises Realizadas.....	76
5	PROPOSTA ALTERNATIVA DO PARÂMETRO “A”	78
5.1	APERFEIÇOAMENTO DA PROPOSTA	78
5.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS.....	81
5.2.1	Modelo Experimental de Álvares (1993)	81
5.2.2	Modelo Experimental de Vieira et al (2016)	84
5.2.3	Modelo Experimental de Oh (1992).....	86
5.2.4	Modelo Experimental de Barros et al (2007)	88
5.2.5	Modelo Experimental de Santos (2006)	92
5.2.6	Aplicação em Vigas de Domínios 4 e 5	94
5.2.6.1	Viga B.2 de Juvandes (1999).....	95
5.2.6.2	Viga C.3 de Juvandes (1999).....	97
6	CONCLUSÃO	99
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXO A	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Progresso anual em períodos do primeiro resumo de publicações.....	8
FIGURA 1.2 - Progresso anual em períodos do segundo resumo das publicações.....	9
FIGURA 1.3 - Quantidade de publicações por país do primeiro resumo.....	10
FIGURA 1.4 - Quantidade de publicações por país do segundo resumo.	10
FIGURA 1.5 - Relação dos periódicos com artigos dos termos selecionados.	11
FIGURA 2.1 - Campo de validade entre a Mecânica do Dano e Mecânica da Fratura.....	27
FIGURA 2.2 - Elemento de volume representativo danificado.	28
FIGURA 2.3 - Representação da área e tensão efetiva.	29
FIGURA 2.4 - Hipótese de deformação equivalente.....	31
FIGURA 2.5 - Curva tensão <i>versus</i> deformação do comportamento à compressão do concreto.	33
FIGURA 2.6 - Hipótese de equivalência em tensão.....	33
FIGURA 4.1 - Comparação de resultados em viga de concreto armado.	49
FIGURA 4.2 - Configuração das vigas propostas em Álvares (1993).	50
FIGURA 4.3 - Deslocamentos para viga 3 ϕ 10.0 mm com A = 0,0796.	52
FIGURA 4.4 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal.	58
FIGURA 4.5 - Resultado das análises quanto à classificação.....	61
FIGURA 4.6 - Geometria e detalhamento das vigas V31, V51 e V71 de Álvares (1993).....	62
FIGURA 4.7 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V31 de Álvares (1993).	63
FIGURA 4.8 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V51 de Álvares (1993).	64
FIGURA 4.9 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V71 de Álvares (1993).	65
FIGURA 4.10 - Geometria e detalhamento da viga V1_A de Beber (2003).	66
FIGURA 4.11 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V1_A de Beber (2003).	67
FIGURA 4.12 - Geometria e detalhamento da viga VT de Vares (2019).	68
FIGURA 4.13 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Vares (2019).	69
FIGURA 4.14 - Geometria e detalhamento da viga VT de Pivatto (2020).	70
FIGURA 4.15 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Pivatto (2020).	70
FIGURA 4.16 - Geometria e detalhamento da viga VT de Deghenhard e Vargas (2013).....	72
FIGURA 4.17 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Deghenhard e Vargas (2013).....	72
FIGURA 4.18 - Geometria e detalhamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).	73
FIGURA 4.19 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).	74
FIGURA 4.20 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VB-R de Vieira et al (2016).	75
FIGURA 5.1 - Taxa de Armadura (ρ) e Parâmetros (Aideal) correspondentes.	79
FIGURA 5.2 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V31 de Álvares (1993):	81
FIGURA 5.3 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V51 de Álvares (1993).	82

FIGURA 5.4 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V71 de Álvares (1993).	83
FIGURA 5.5 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).	84
FIGURA 5.6 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VB-R de Vieira et al (2016).	85
FIGURA 5.7 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga S1V0 de Oh (1992).	86
FIGURA 5.8 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga S2V0 de Oh (1992).	87
FIGURA 5.9 - Geometria e detalhamento das vigas R1, R2 e R3 de Barros et al (2007).	88
FIGURA 5.10 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R1 de Barros et al (2007).	89
FIGURA 5.11 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R2 de Barros et al (2007).	90
FIGURA 5.12 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R3 de Barros et al (2007).	90
FIGURA 5.13 - Geometria e detalhamento das vigas REF1 e REF2 de Santos (2006).	92
FIGURA 5.14 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga REF1 de Santos (2006).	93
FIGURA 5.15 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga REF2 de Santos (2006).	93
FIGURA 5.16 - Geometria e detalhamento da viga B.2 de Juvandes (1999).	95
FIGURA 5.17 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga B.2 de Juvandes (1999).	96
FIGURA 5.18 - Geometria e detalhamento da viga C.3 de Juvandes (1999).	97
FIGURA 5.19 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga C.3 de Juvandes (1999).	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - Primeiro resumo dos resultados obtidos do mapeamento sistêmico.	7
TABELA 1.2 - Segundo resumo dos resultados obtidos do mapeamento sistêmico.	7
TABELA 3.1 - Valores estimados de (E_{ci}), (E_{cs}) e (α_i) em função da resistência característica à compressão do concreto, considerando o uso de granito como agregado graúdo.	39
TABELA 4.1 - Valores dos coeficientes de vinculação.	47
TABELA 4.2 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.	54
TABELA 4.3 - Dados das vigas experimentalmente ensaiadas.	55
TABELA 4.4 - Critérios qualitativos adotados na análise.	60
TABELA 5.1 - Vigas com variação exclusiva na área de aço.	78
TABELA 5.2 - Novos valores do parâmetro “A”	80
TABELA 5.3 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.	91

LISTA DE SÍMBOLOS

ROMANOS

- A: parâmetro de dano;
- A_1, B_1 : variáveis de dano associadas à tração;
- A_2, B_2 : variáveis de dano associadas à compressão;
- A_s : área de aço positiva da seção de concreto;
- A'_s : área de aço para a região comprimida da seção de concreto;
- b: largura da base da seção de uma viga de concreto;
- b_w : largura da seção de concreto;
- C: módulo de flexibilidade;
- d: altura útil da seção de concreto;
- d' : distância do centro de gravidade da armadura comprimida até a borda comprimida;
- D_n : dano local;
- D: variável escalar de dano;
- D_T, D_C : componentes da variável de dano em tração e compressão;
- D_1, D_2 : componentes da variável de dano em tração e compressão;
- E: módulo de elasticidade longitudinal do material íntegro;
- \tilde{E} : módulo de elasticidade longitudinal do material com dano;
- E_{cs} : módulo de elasticidade secante do concreto;
- E_{ci} : módulo de elasticidade inicial do concreto;
- E_s : módulo de elasticidade do aço;
- F: força nominal aplicada;
- f_{ctm} : resistência à tração média do concreto;
- f_{cmj} : resistência média do concreto à compressão;
- f_{ckj} : resistência característica do concreto à compressão;
- f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto;
- f_{ct} : resistência à tração direta do concreto;
- f'_c : resistência característica do concreto à compressão;
- f_t : módulo de ruptura do concreto;
- $f_{T,C}$: funções contínuas e positivas de Y_T e Y_C ;
- g: função de dano;
- g_T, g_C : potencial anelástico em tração e compressão;
- h: altura da seção de concreto;
- I_c : momento da inércia da seção bruta de concreto;

I_{cr} : momento da inércia da seção de concreto no estágio II;
 I_e : momento da inércia da efetivo de uma seção de concreto;
 I_g : momento da inércia da seção de concreto no estágio I;
 I_{II} : momento da inércia da seção fissurada de concreto no estágio II;
 K : constante de Dano associada à taxa de armadura de uma viga de concreto armado;
 k_d : profundidade da linha neutra;
 L : vão de uma viga de concreto armado;
 M_a : momento fletor atuante na seção crítica do vão considerado;
 M_r : momento fletor resistente do elemento estrutural;
 $M_{G_{i,k}}$: momento fletor oriundo das cargas permanentes;
 $M_{Q_{i,k}}$: momento fletor das ações variáveis;
 \underline{n} : versor normal;
 n : relação entre módulo de elasticidade longitudinal do aço e do concreto;
 S : área total íntegra;
 S_d : desvio-padrão da dosagem do concreto;
 \tilde{S} : área efetiva resistente;
 S_0 : área total de defeitos;
 x : profundidade da linha neutra de uma seção de concreto;
 x_2 : profundidade da linha neutra de uma seção de concreto no estágio II;
 x_3 : profundidade da linha neutra de uma seção de concreto no estágio III;
 x_1 : profundidade da linha neutra de uma seção de concreto no estágio I;
 y : distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;
 Y_{0T}, Y_{0C} : parâmetros de referências para início de dano em tração e compressão;
 Y_1, Y_2 : taxa de energia liberada durante o processo de evolução de dano;
 W_e^* : energia de deformação elástica complementar.

GREGOS

ε : deformação elástica;
 $\tilde{\varepsilon}$: deformação equivalente;
 ε_{cc} : deformação do concreto;
 ε_{st} : deformação do aço;
 $\eta(D_1)$: função de valor escalar dependente da danificação em tração;
 $\eta(D_2)$: função de valor escalar dependente da danificação em compressão;

ν_0 : coeficiente de Poisson do material íntegro;

ξ : coeficiente função do tempo;

ρ' : taxa de armadura de compressão;

ρ : taxa de armadura de tração;

σ : tensão nominal;

σ_{sd} : tensão de cálculo na armadura tracionada;

$\tilde{\sigma}$: tensão efetiva;

$\underline{\tilde{\sigma}}$: tensor de tensões efetivas;

σ_{0T} , σ_{0C} : tensões de início de dano em tração e compressão.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACI - American Concrete Institute;

ANOVA - Análise de Variância;

ASCE - American Society of Civil Engineers;

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;

ELS - Estado Limite de Serviço;

ELU - Estado Limite Último;

EVR - Elemento de Volume Representativo;

LN - Linha Neutra;

MDC - Mecânica do Dano no Contínuo;

NBR - Norma Brasileira;

NLF - Não-Linearidade Física.

RESUMO

JORGE, F. F. N. **Cálculo de deslocamentos em vigas de concreto armado no estado limite de serviço utilizando a mecânica do dano.** Catalão. Dissertação (Mestrado) – Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, 2022, 112 p.

O presente trabalho trata de uma proposta para a análise deslocamentos em vigas fissuradas em concreto armado empregando um modelo constitutivo baseado na Mecânica do Dano Contínuo. Sabe-se que em elementos estruturais de concreto, o fenômeno mecânico preponderante é o processo de fissuração. Antes mesmo de qualquer solicitação imposta, este material já possui pequenas fissuras em sua microestrutura. No entanto, pelas normativas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318R (2014) é possível encontrar uma determinação conceitual distinta, sendo que, para as estimativas de deflexão vertical em vigas de concreto armado, a rigidez da seção é penalizada de forma homogênea, tendo a exclusão da região fissurada e, como consequência, a isenção da não-linearidade do concreto. Isto é, não apresenta coerência com a essência teórica sobre o processo de fissuração do material, já que as fissuras se propagam por um processo gradativo. Neste sentido, a proposta busca preencher esta lacuna identificada nas normas brasileira e americana, propondo uma metodologia para o cálculo de deslocamentos verticais em vigas de concreto armado em regime de serviço utilizando a Mecânica do Dano. Dentre os objetivos, buscou-se avaliar a metodologia proposta, para isso foram levantadas em bibliografias 54 (cinquenta e quatro) vigas ensaiadas experimentalmente de 31 (trinta e um) trabalhos distintos, podendo assim identificar as potencialidades e limitações do modelo. Com os resultados das análises numéricas confrontados com àqueles provenientes dos ensaios e normas, foi identificado bons resultados, essencialmente em vigas de domínio 3. Em seguida, um aperfeiçoamento da metodologia estudada é desenvolvido apresentando-se uma nova hipótese para a expressão de um parâmetro do modelo buscando relacionar a taxa de armadura das vigas com uma constante, sendo esta última, avaliada a partir de uma identificação paramétrica. Da mesma maneira, foram efetuadas análises nas vigas ensaiadas, comparando os resultados numéricos fornecidos pelo modelo com aqueles experimental e das normas. Nos resultados encontrou-se respostas numéricas representativas do comportamento mecânico, evidenciando a viabilidade e aplicabilidade da proposta, relacionando ainda uma configuração correspondente ao regime de serviço. Portanto, conclui-se que a proposta do presente trabalho apresenta respostas de deslocamentos em vigas fissuradas de concreto armado considerando o seu comportamento não-linear via Mecânica do Dano.

Palavras-chave: Concreto Armado, Deflexão Vertical em Vigas de Concreto Armado, Mecânica do Dano, Norma Técnica, Regime de Serviço.

ABSTRACT

ANALYSIS OF RC BEAMS IN SERVICEABILITY LIMIT STATE USING DAMAGE MECHANICS

The present work deals with a proposal for the analysis of displacements in reinforced concrete beams using a constitutive model based on Continuum Damage Mechanics. It is known that in structural concrete elements, the preponderant mechanical phenomenon is the microcracking process. Even before any imposed request, this material already has small microcracks in its microstructure. However, according to NBR 6118 (ABNT, 2014) and ACI 318R (2014) regulations, it is possible to find a different conceptual determination, and for the estimates of vertical deflection in reinforced concrete beams, the stiffness of the section is homogeneously penalized, having the exclusion of the cracked region and, as a consequence, the non-linear mechanical behaviour of the concrete is not considered. That is, it does not present coherence with the theoretical essence about the microcracking process of the material, since the microcracks propagate by a gradual process. In this context, the proposal intends to fill this gap identified in the Brazilian and American standards, proposing a methodology for the calculation of vertical displacements in reinforced concrete beams in service regime using the Damage Mechanics. Among the objectives, we sought to evaluate the proposed methodology, for which 54 (fifty-four) experimentally tested beams of 31 (thirty-one) different works have been used, thus being able to identify the potentialities and limitations of the model. With the results of the numerical analyzes compared with those from the tests and standards, good results have been identified, essentially in domain 3. Then, an improvement of the studied methodology is developed, presenting a new hypothesis for the expression of a parameter of the model seeking to relate the reinforcement ratio of the beams with a constant evaluated from a parametric identification. In the same way, analyses have been carried out on the tested beams, comparing the numerical results provided by the model with the experimental and the standards ones. In the results, numerical answers have been found representative of the mechanical behaviour, evidencing the feasibility and applicability of the proposal, still relating a configuration corresponding to the service regime. Therefore, the proposal of the present work presents displacement responses in cracked reinforced concrete beams considering their non-linear behaviour via Damage Mechanics.

Keywords: Reinforced Concrete, Vertical Deflection in Reinforced Concrete Beams, Damage Mechanics, Brazilian Standard, Serviceability Limit State.

NOTA

Os Programas de Pós-Graduação stricto sensu em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, continuam provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS E SÍNTESE DO CONTEÚDO

Entende-se que a estrutura de uma construção tem como objetivo principal garantir a forma espacial na qual foi projetada e propiciar sua respectiva integridade. As estruturas, ou também classificadas como sistemas estruturais, são estudadas como disposições lógicas e apropriadas por uma série de elementos estruturais. Estes elementos são entendidos como corpos sólidos deformáveis sendo projetados relacionando a capacidade de transmitir e receber esforços oriundos de variadas solicitações, sempre procurando soluções que envolvam tanto a economia quanto a segurança. Isto é, de forma geral, para uma estrutura projetada exige-se que apresente estabilidade, durabilidade, resistência e um custo relativamente não oneroso.

As vigas, objeto de estudo do presente trabalho, por sua vez, são elementos estruturais lineares que podem ser dispostas horizontalmente ou inclinadas, tendo um ou mais apoios. Encarregadas de suportar ações provenientes de paredes e das lajes, apoiadas em pilares que transmitem as ações às fundações.

Rocha (2017) relata que a utilização dos materiais em estruturas, de modo seguro e econômico, é primordialmente relacionada com o conhecimento em específico do comportamento mecânico do material, como também da própria estrutura. Na engenharia moderna, em particular na engenharia de estruturas, é pertinente a utilização de diversos materiais de natureza diversa, ou seja, são constituídos por dois ou mais elementos que, em especial, apresentam diferentes comportamentos físicos (BORGES, 2015).

Neste sentido, afirma-se que o concreto seguramente é um dos materiais compósitos mais relevantes dentre àqueles que são empregados nas estruturas, visto que, na imensa maioria das aplicações, é utilizado o concreto armado, que é caracterizado pela combinação com o aço.

As estruturas são dimensionadas para que evidenciem ao longo de toda sua vida útil resistências superiores às ações, ou seja, possuem recursos superiores às demandas. Seja em aspectos de capacidade resistente como o colapso, assim como em âmbito global de equilíbrio ou visual. A partir deste intuito, uma série de normas e códigos nacionais e internacionais, definem diversas aplicações e restrições que são abordadas como critérios de segurança em seus respectivos projetos. Tais critérios são denominados de Estados-Limites e podem ser empregados por meio de especificações provenientes da NBR 6118 (ABNT, 2014). Neste âmbito, como explanado por Nogueira (2005), os Estados-Limites são caracterizados em estágios nos quais uma determinada estrutura demonstra certo desempenho desapropriado em relação às finalidades que foram projetadas.

Dessa forma, um projeto estrutural contém em seus cálculos coeficientes parciais de segurança, tendo assim, o intuito de amparar todas as possíveis incertezas que são referentes às diversas variáveis de projeto. Estes coeficientes são aplicados nas ações atuantes nas estruturas e resistências dos elementos, garantindo certa folga quanto à segurança relacionada aos Estados Limites Últimos (ELU), como também à verificação em Estados Limites de Serviço (ELS), na qual é inerente às situações em regime de serviço. Dentro do contexto dos Estados Limites de Utilização, Branson (1966) propôs uma alternativa ao cálculo da rigidez equivalente em vigas de concreto armado para avaliar a flecha imediata. É um modelo empírico baseado no fato de que após atingir o momento de fissuração em uma viga de concreto armado, não se pode garantir que todas as seções da estrutura estarão no estágio II, mas sim em uma situação intermediária entre os estádios I e II. No entanto, como retratado em Pituba e Delalibera (2014), a fórmula de Branson é relativamente conservadora, pois a rigidez equivalente é muito próxima da rigidez do estágio II.

No que segue, nesse capítulo são apresentados: definição dos objetivos da pesquisa, justificativa do trabalho, na qual está relacionada em especial com a contribuição geral da pesquisa, sendo ainda discutido os princípios da metodologia a ser empregada, e finalmente, demonstra-se a estruturação acerca do estado da arte, levando em conta os assuntos que abarcam o tema da dissertação, além de uma discussão particular inerente aos modelos constitutivos e trabalhos que fazem referência à aplicação de dano em estruturas de concreto armado.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é estabelecer um estudo analítico do comportamento estrutural em regime de serviço em vigas de concreto armado, dando especial atenção ao processo de fissuração com o desenvolvimento e validação de uma proposta baseada na Mecânica do Dano no Contínuo (MDC). A proposta em questão é ainda aplicada em casos da prática da Engenharia Estrutural, a fim de viabilizar um método alternativo de cálculo de deflexão vertical em relação ao preconizado na NBR 6118 (ABNT, 2014) e no ACI 318R (2014), usando também para tanto, resultados experimentais encontrados na literatura. Além disso, como objetivos específicos procura-se efetuar uma investigação para proposição de alternativas ao desenvolvido por Pituba et al. (2012), Pituba e Delalibera (2014), Oliveira (2017) e Costa (2020), visto que na bibliografia ainda é possível encontrar lacunas em critérios conceituais neste tema, como a adoção de uma simplificação na consideração da não-linearidade física do concreto e aço em suas formulações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Por ser um material com o uso já consolidado e difundido, faz-se necessário o estudo sobre a utilização de modelos constitutivos, tendo o intuito de obter respostas mais realistas possíveis dos mecanismos físicos do comportamento material. Contudo, Pereira Júnior (2014) explana que qualquer sistema mecânico quando submetido a determinados carregamentos, sendo de natureza térmica, elástica ou até mesmo dinâmica, evidenciam algum tipo de resultado. No entanto analisá-lo na maioria dos casos se torna um processo relativamente difícil, já que o processo está fundamentalmente relacionado ao que é inerente aos princípios constitutivos do material.

Em Matias (2018) discute-se o grande interesse em estudos relativos ao concreto armado. O autor relata ainda que há um relevante crescimento em avanços tecnológicos deste material, uma vez que, engenheiros e pesquisadores, estão cada vez mais investindo para tal. A partir da evolução das tecnologias aplicadas no campo da construção civil, especificamente nas áreas de materiais e estruturas, obras constituídas em estruturas complexas estão cada vez mais numerosas e, por consequência, despontam novos desafios para a Mecânica das Estruturas.

Por outro lado, o concreto é formado por um meio aglomerante, tornando-o um material heterogêneo, assim, deriva em uma complexidade na concepção de propor uma lei constitutiva, na qual, reproduza o comportamento fiel do concreto em função de um tipo qualquer de solicitação. Com isso, surgiram as denominadas Teorias Constitutivas Fenomenológicas, que têm como intuito a obtenção de respostas constitutivas por meio do estudo do comportamento das características e variáveis de interesse. Esses modelos estudam o comportamento macroscópico do material homogêneo baseado no que ocorre em sua microestrutura.

Sabe-se que o concreto além de ser um material compósito, é ainda particularizado por possuir em sua composição as fases cristalinas e fases não cristalinas, tornando-o multifase. Diante dessa caracterização, percebe-se que há uma não trivialidade na determinação da resposta do comportamento em mecanismos físicos de ruptura e deformação. Tendo em vista esse aspecto, com o emprego de modelos constitutivos do material, como a Mecânica do Dano no Contínuo, é possível se obter numericamente soluções de problemas não-lineares em meios complexos.

No que se refere ao estudo do embasamento teórico para a realização deste trabalho, a Mecânica do Dano no Contínuo (MDC) serve para modelar o comportamento mecânico de materiais fissurados, inclusive sendo possível a simulação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado, submetidas a cargas de pequena intensidade até carregamentos que levem ao seu colapso.

Ainda de acordo com Guello (2002), o concreto antes mesmo de qualquer solicitação de carga, já apresenta certo grau de danificação, isso se deve a variados fenômenos químicos e físicos que ocorrem ao longo da cura do concreto, como retração, exudação, expansão da argamassa e outros. Com isso, são originadas microfissuras na interface argamassa-agregado e na argamassa. Assim o comportamento não-linear do concreto verifica-se mesmo com níveis muito baixos de tensão, e é influenciado pelo fenômeno

da microfissuração inicial, além da sua propagação de forma evolutiva, quando do processo de carregamento.

Neste sentido, apesar de todo o avanço científico dos materiais, assim como da engenharia estrutural, verificado nas últimas décadas, Costa (2020) afirma que o concreto ainda é um material de comportamento altamente complexo, já que, a não-linearidade decorrente do processo de fissuração o torna bastante difícil de obter simulações numéricas capazes de reproduzir de forma fiel e realista seu comportamento.

Em relação à aplicabilidade dos fundamentos do comportamento não-linear físico do concreto armado, o presente trabalho contribui no emprego de modelos constitutivos matemáticos na análise de peças fissuradas em concreto armado, como por exemplo, na estimativa de descolamentos das mesmas, seguindo a linha de trabalhos do grupo de pesquisa já desenvolvidos como: Pituba et al. (2012), Pituba e Delalibera (2014), Oliveira (2017) e Costa (2020). No presente trabalho procura-se aperfeiçoar os desenvolvimentos já realizados assim como validar os resultados obtidos.

Vale ressaltar que para o projeto de estruturas de concreto armado, as normativas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318R (2014) apresentam simplificações em relação à Não-Linearidade Física (NLF), como a não consideração do concreto tracionado entre fissuras em cálculos de inércia equivalente, como também à verificação de flechas elásticas e flechas diferidas no tempo. Dentro do campo da resistência dos materiais, a determinação da deflexão vertical em vigas de concreto armado utilizando processos de homogeneização quando submetidas a um determinado carregamento é algo consolidado. Por sua vez, as normas técnicas apresentam valores máximos admissíveis tornando possível limitar danos à elementos não estruturais e também em relação ao colapso da peça ou global da estrutura.

Ainda sobre o cálculo dos deslocamentos verticais em vigas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) e o ACI 318R (2014) abordam uma forma conceitual em que, em regime de serviço, esses elementos estruturais são penalizados quanto à sua inércia de uma determinada seção, isto é, há uma ponderação da seção íntegra (estádio I) para a seção fissurada (estádio II), tendo assim, um novo valor de inércia equivalente, sendo inferior ou igual ao do estágio I. Dessa forma, entende-se que essa ponderação é realizada de forma homogênea, tendo a exclusão parcial da seção onde encontram-se as fissuras na região tracionada, desprezando então qualquer processo progressivo de fissuração e não linearidade do material. Logo, é relevante a determinação de uma nova formulação em que, de modo geral, penalize a rigidez da peça empregando uma degradação progressiva do módulo de elasticidade por meio ao processo de fissuração, no qual, é o que se verifica naturalmente de forma real. Portanto, há uma lacuna de pesquisa gerando a motivação do presente trabalho, ou seja, a forma abordada pelos procedimentos preconizados da NBR 6118 (ABNT, 2014) e do ACI 318R (2014) estimarem uma rigidez média para toda a viga com base no modelo proposto por Branson (1968), cuja formulação leva a altos valores de deslocamento.

Frente ao exposto, justifica-se a contribuição da proposta deste trabalho, pela evidência de que há a necessidade de uma avaliação minuciosa do comportamento de estruturas de concreto armado em regime de serviço, no qual, a consideração do processo de fissuração deve ser levado em conta de maneira simplificada em cálculos analíticos, porém com uma concepção teórica coerente com a realidade dos fenômenos físicos envolvidos. A partir disto, ratifica-se a importância de um estudo, em específico, utilizando a Mecânica do Dano no Contínuo, como mencionado anteriormente.

1.4 METODOLOGIA E FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, o trabalho é desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica abarcando toda a temática envolvida, analisando bibliografias internacionais e nacionais, que são determinadas através do mapeamento sistêmico. Dessa forma, é possível classificar e estruturar toda a pesquisa que foi efetuada para tal.

Também é abordada a Mecânica do Dano no Contínuo, para se levar em conta o processo de fissuração. Com o embasamento teórico sobre o modelo de dano desenvolvido em Pituba (2003), passa-se ao estudo sobre o desenvolvimento da formulação da metodologia de cálculo de deflexões verticais em vigas de concreto armado realizado até então por Pituba e colaboradores. Além disso, faz-se necessário um estudo das metodologias preconizadas pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318R (2014), podendo desta maneira efetuar uma comparação com a resposta da proposta ao final do trabalho.

Tendo a compreensão dos fundamentos conceituais até então, parte-se para a modelagem e aplicação, onde são realizados ensaios numéricos descrevendo o comportamento não-linear em vigas de concreto armado, analisando a deflexão vertical desses elementos e comparando com respostas experimentais encontradas na literatura e com respostas apresentadas pelas normativas citadas.

1.5 ESTADO DA ARTE

1.5.1 Considerações Preliminares

Para a elaboração da revisão bibliográfica, foi empregada uma busca minuciosa particularizada em pesquisas randômicas através de bancos de dados da internet e por um estudo de mapeamento sistêmico ou (*mapping study*), que inicialmente foi proposto pelos autores Bailey et al. (2007). No geral, a investigação bibliográfica para o embasamento teórico do trabalho foi elaborada a partir das seguintes áreas de busca: trabalhos aderentes ao tema em específico, modelos constitutivos e modelos de dano necessários quanto à modelagem do material, e finalmente, literaturas onde encontram-se tais modelos aplicados em estruturas de concreto armado.

1.5.2 Mapeamento Sistemático

Para o mapeamento sistemático, foi adotada a metodologia conforme Costa et al. (2014) e Paula e Ilha (2016). Esta consiste na pesquisa por meio de expressões chave que, quando em conjunto a operadores lógicos, formam as designadas *strings* de busca. A escolha dos materiais bibliográficos é feita de forma seletiva, onde foram selecionados os títulos no quais abordavam o assunto, intitulados pela metodologia como "títulos aderentes", na ordem, efetuou-se uma nova seleção a partir da leitura dos resumos dos artigos. Dessa forma, resultando em um refinamento da literatura aderente ao tema.

Foram consideradas as bases de dados *Science Direct* e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Inicialmente, a pesquisa foi dividida em duas partes, em que a primeira expõe uma busca científica com base no desenvolvimento de distintos tipos de modelos de dano, com referência ao material concreto. Já para a segunda, alterou-se o âmbito de interesse, no intuito em se pesquisar o seguimento de aplicações em acordo aos modelos de dano em estruturas de concreto. Para estas áreas de busca, foram aplicadas diferentes *strings* em duas respectivas composições, podendo ser associadas ao operador lógico *AND*, nas quais, são: “*an anisotropic damage model for concrete*” (Um Modelo de Dano Anisotrópico Para o Concreto), “*an isotropic damage model for concrete*” (Um Modelo de Dano Isotrópico Para o Concreto), “*continuum damage modelling*” (Modelagem de Dano Contínuo) e “*a plastic-damage model for concrete*” (Um Modelo de Dano-Plástico Para o Concreto). Já em relação a segunda área de pesquisa, “*damage mechanics*” (Mecânica do Dano), “*reinforced concrete*” (Concreto Armado), “*displacement*” (Deslocamento) e “*serviceability limit state*” (Estado Limite de Serviço), “*damage mechanics*” (Mecânica do Dano), “*reinforced concrete*” (Concreto Armado) e “*technical code*” (Norma Técnica).

Obtém-se vantagens expressivas a partir da aplicação desta metodologia de pesquisa, já que, com o aperfeiçoamento da busca, é possível uma determinação acurada de literaturas aderentes com o tema de interesse, como também os principais pesquisadores, evolução das publicações e onde elas se encontram. Tendo em vista esses aspectos, os termos, etapas e quantidades selecionadas do mapeamento sistemático são relatados nas Tab. (1.1) e Tab. (1.2), que são discutidos logo depois. Vale ainda a ressalva que, para o refinamento final foram considerados aqueles artigos sem repetições entre as bases de dados e periódicos revisados por pares, quanto aos números totais dos aderentes apresentados. Os resultados do mapeamento em referência à Tab. (1.1) estão expostos abaixo:

TABELA 1.1 - Primeiro resumo dos resultados obtidos do mapeamento sistêmico.

BASE DE DADOS	Palavras-chave			
	<i>“an anisotropic damage model for concrete”</i> ; <i>“an isotropic damage model for concrete”</i>		<i>“continuum damage modelling”</i> ; <i>“a plastic-damage model for concrete”</i>	
	Número de artigos			
	Inicial	Com título aderente	Inicial	Com título aderente
Science Direct	31	19	230	26
Periódicos Capes	10	10	18	14
Nº após a leitura do resumo	24		23	
Percentual	58,53%		9,27%	
Total	47			

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que para a segunda composição de expressões chave, foi possível encontrar um número maior de publicações, mostrando-se compreender em termos mais abrangentes, embora após o refinamento, a quantidade final dos artigos aderentes foi inferior a primeira. A seguir, na Tab. (1.2), tem-se o resumo dos resultados obtidos de acordo com a segunda área de busca, logo:

TABELA 1.2 - Segundo resumo dos resultados obtidos do mapeamento sistêmico.

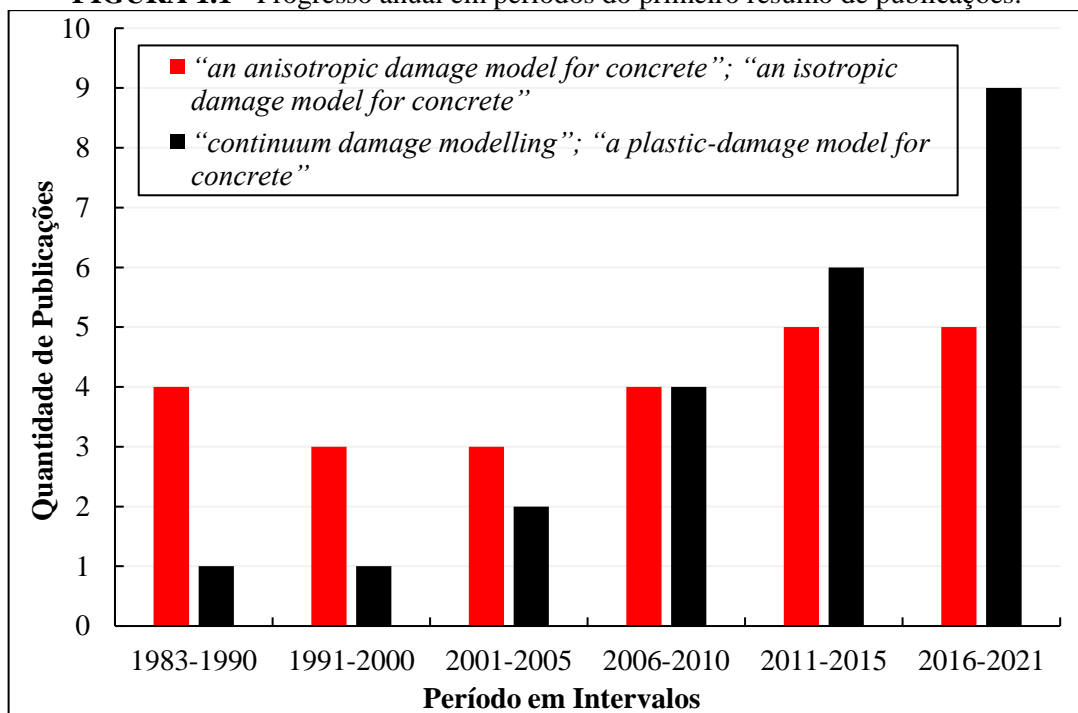
Base de Dados	Palavras-chave			
	<i>“damage mechanics” AND “reinforced concrete” AND “displacement” AND “serviceability limit state”</i>		<i>“damage mechanics” AND “reinforced concrete” AND “technical code”</i>	
	Número de artigos			
	Inicial	Com título aderente	Inicial	Com título aderente
Science Direct	13	9	4	3
Periódicos Capes	8	7	9	9
Nº após a leitura do resumo	14		9	
Percentual	66,67%		69,23%	
Total	23			

Fonte: Autoria própria (2022).

Interessante observar que, para esta segunda parte da pesquisa, foi encontrado um número reduzido de publicações, quando comparadas às aquelas expostas da Tab. (1.1). Isto posto, e sabendo também que estes são termos que de fato, são referentes ao tema proposto do presente trabalho, indica-se a relevância e contribuição quanto a esta área de pesquisa, por se tratar de um tema ainda pouco explorado.

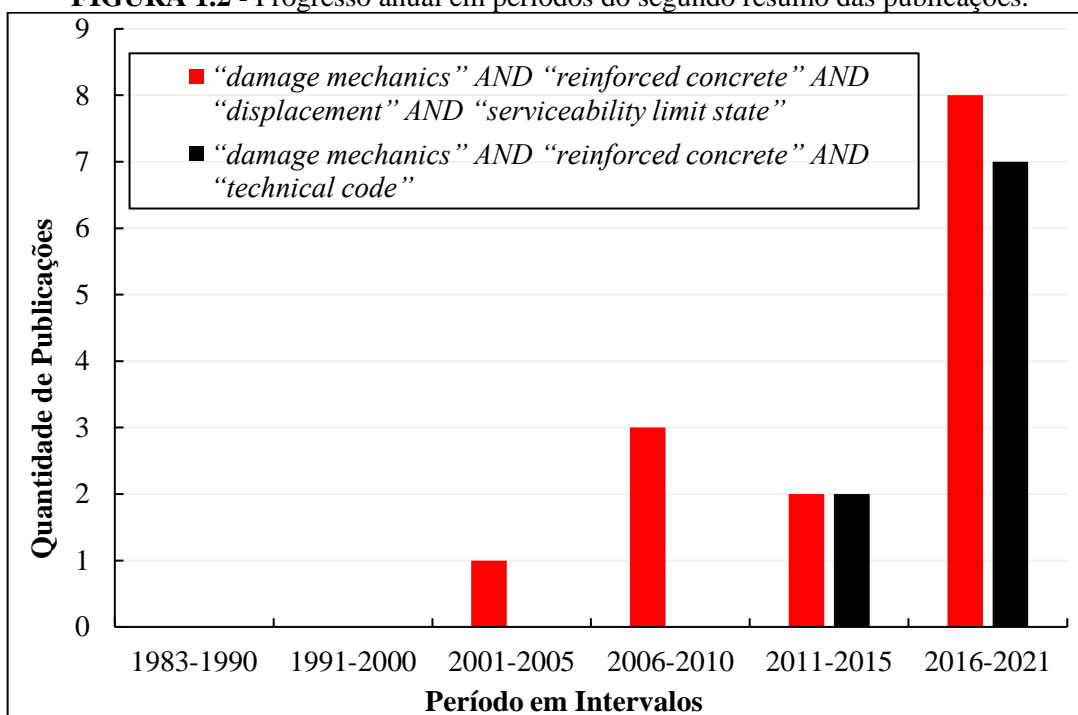
Nas Fig. (1.1) e Fig. (1.2) seguintes, estão exibidos os resultados acerca da distribuição das 70 publicações aderentes ao longo dos anos, referentes as duas áreas de busca. É de referir ainda que, as pesquisas para a elaboração do mapeamento sistêmico foram realizadas em maio de 2021.

FIGURA 1.1 - Progresso anual em períodos do primeiro resumo de publicações.



Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 1.2 - Progresso anual em períodos do segundo resumo das publicações.

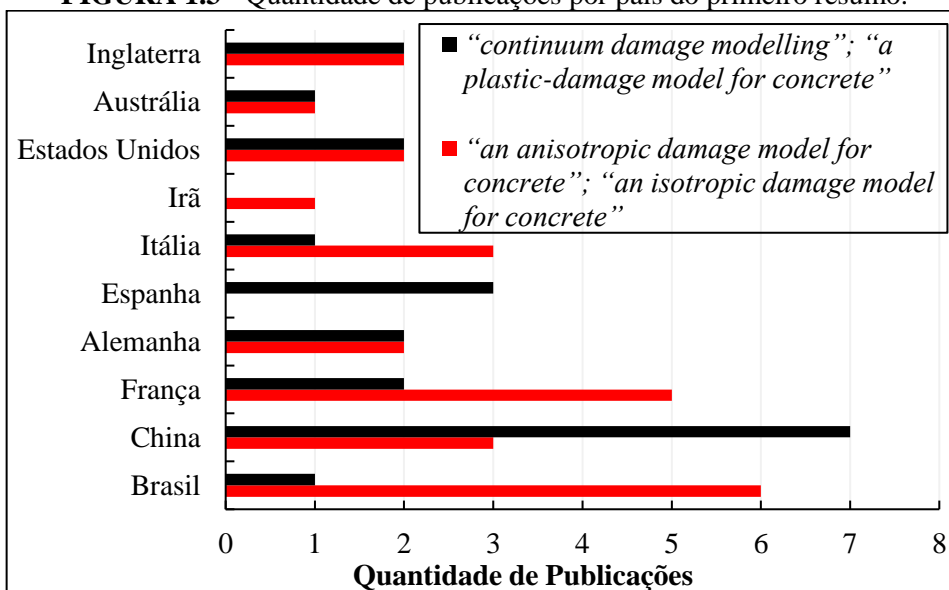


Fonte: Autoria própria (2022).

É possível observar na Fig. (1.1) o progresso relevante da segunda composição de palavras-chave ao decorrer dos anos, diferentemente da primeira, em que se demonstra relativamente constante. Sobre a Fig. (1.2), nota-se que, a evolução das publicações ocorre a partir de um período relativamente recente, em destaque para os últimos cinco anos.

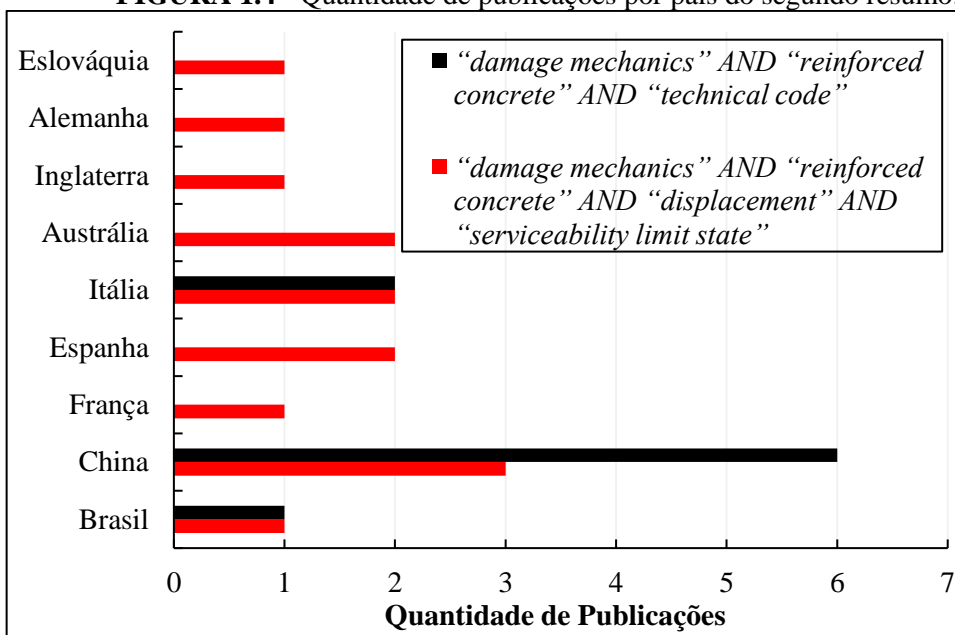
Igualmente, pode-se ainda analisar quantitativamente as publicações em relação aos países de origem. Para as duas vertentes de pesquisa, destaca-se a China com a maior produção, tendo ao todo 19 publicações de artigos, seguida do Brasil com 9 artigos e França e Itália, ambas com 8 artigos. Esses dados estão dispostos nas Fig. (1.3) e Fig. (1.4) seguintes:

FIGURA 1.3 - Quantidade de publicações por país do primeiro resumo.



Fonte: Autoria própria (2022).

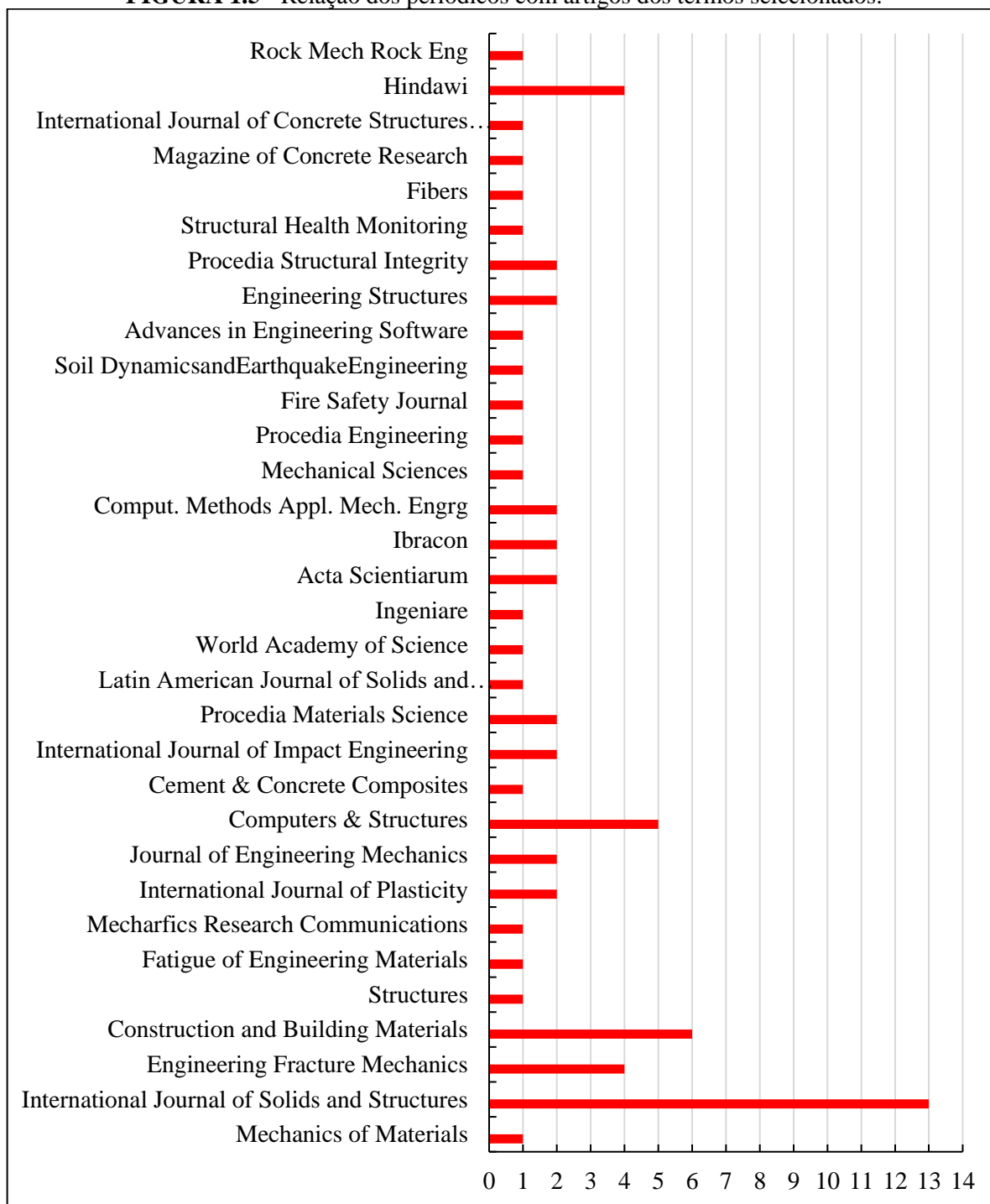
FIGURA 1.4 - Quantidade de publicações por país do segundo resumo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Por fim, a partir da obtenção dos dados pelo mapeamento sistêmico, é possível também analisar quanto aos principais periódicos dos artigos selecionados nos quais foram publicados. No meio de 70 artigos encontrados, evidencia-se que, 34,28% estão concentrados nos periódicos *International Journal of Solids and Structures*, *Construction and Building Materials* e *Computers & Structures*, onde apresentam quantidades de 13, 6 e 5 publicações em cada uma delas, respectivamente. Logo abaixo, na Fig. (1.5) é possível encontrar tais dados:

FIGURA 1.5 - Relação dos periódicos com artigos dos termos selecionados.



Fonte: Autoria própria (2022).

Pode-se notar que não somente os 70 artigos selecionados através do mapeamento sistêmico, mas também dissertações de mestrado, teses de doutorado, normas técnicas, livros, e além de outros artigos, foram utilizados no presente trabalho, já que igualmente tratam com relevância o tema que se desenvolve neste estudo.

1.5.3 Revisão da Literatura

1.5.3.1 Modelos Constitutivos

As formulações dos modelos constitutivos do concreto envolvem conceitos da teoria da Elasticidade, Plasticidade, Mecânica do Dano e da Mecânica da Fratura. Tais modelos, quando empregados na análise do material concreto, geram respostas e soluções satisfatórias.

Contudo, uma boa formulação perante a um modelo constitutivo de base física, não deve somente reproduzir adequadamente o comportamento dinâmico macroscópico do concreto, já que, esta resposta não-linear física é uma manifestação única, decorrente das mudanças irreversíveis que se verificam em sua microestrutura.

Dentro de um quadro geral, há muitos trabalhos desenvolvidos que retratam distintas leis constitutivas para o concreto. Como orientação pode-se citar: Cedolin (1982), Chen & Saleeb (1982) e Xiaoqing et al. (1989), apud PITUBA (1998). Sobre os mais recentes: He et al. (2015), Jefferson et al. (2016), Wu e Cervera (2016), Cervera, Tesei e Ventura (2017) e Bitencourt Júnior et al. (2019).

Conforme Souza e Machado (2013), no decorrer dos anos as teorias da Mecânica do Dano, Mecânica da Fratura e Plasticidade, têm sido consideravelmente disseminadas no âmbito da análise de estruturas em concreto armado, sendo que, cada uma delas adequadas para simular certo tipo de fenômeno. As respostas advindas de ensaios estruturais em laboratório são por diversas vezes limitadas. Assim, se faz necessário o desenvolvimento de modelos numéricos-matemáticos que possibilite a generalização dos resultados para diferentes tipos de carregamentos e estruturas.

Segundo Proença (2000), a redução de coesão gerada entre a pasta de cimento (gel + areia) e os agregados é o evento encarregado pela evolução de microfissuras e pelo surgimento de deformação plástica, sendo relevantemente incitada pela origem da solicitação.

Quando se há a aplicação de tensões mais elevadas, as microfissuras progridem na pasta do cimento. Deste modo, os escorregamentos entre os grãos contribuem diretamente para a deformação residual. Entende-se que ainda nesta etapa, não há ainda alteração considerável de volume.

Já no período inicial da fratura, as microfissuras se localizam e unem-se gerando fissuras macroscópicas e, na etapa final, resulta-se da união de diversas microfissuras formando uma superfície de descontinuidade.

Também em Guello (2002), é possível encontrar a conceituação no que se refere aos modelos constitutivos, o autor afirma que estes são formulados com base em variáveis e distintas teorias como a plasticidade, elasticidade e dano, tentando elucidar alguns dos fenômenos do comportamento do concreto. Em resposta, cada um dos modelos expõe um desempenho relativamente coerente dentro de uma denominada perspectiva ou faixa de aplicabilidade.

Modelos constitutivos que abordam a microestrutura do concreto, pretendem caracterizar o comportamento da Fase Pasta e Fase Agregado, realizando uma interação entre as fases no intuito de investigar o comportamento macroscópico estrutural.

Comi e Perego (2001) relatam que a grande maioria dos modelos constitutivos de concreto disponíveis na literatura decorrem em três categorias: modelos de plasticidade, modelos de dano e os modelos que são caracterizados pelo acoplado de ambos. Os modelos de plasticidade, Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, são historicamente os precursores encontrados na bibliografia. Exemplos de modelos constitutivos de plasticidade, de acordo ainda com estes autores são aqueles propostos por Ottosen (1977), Ohtani e Chen (1988), Etse e Willam (1994), Feenstra e de Borst (1996). Já com relação aos modelos de dano, eles permitem diferentes maneiras de se analisar a deterioração material quanto à rigidez e resistência, alguns trabalhos conceituados são, Resende (1987), Simo e Ju (1987), Lubliner et al. (1989), Yazdani e Schreyer (1990), Comi et al. (1995), di Prisco e Mazars (1996), Lee e Fenves (1998), Pituba (2003). Dentre alguns mais recentes desde então, Trong Nghia-Nguyen et al. (2021), Abdussamet Arslan e Muhammed Gümüş (2021) e Hwang et al. (2021).

Em geral, já os modelos constitutivos elásticos são utilizados na descrição de situações onde a solitação é proporcionalmente crescente, já que, não são apropriados ou não são capazes de representar a história do carregamento, além de não preverem nenhuma deformação plástica. Ao contrário de modelos elastoplásticos, que representam bem a história do carregamento e descarregamento e que, são capazes de levar em consideração as deformações permanentes.

É pertinente a busca habitual de ferramentas que possibilitem, de forma satisfatória e precisa, a previsão de comportamentos mecânicos material, em geral. Entre as diversas ferramentas e estudos que foram desenvolvidos ao longo do tempo, destaca-se a Mecânica do Dano no Contínuo. Esta formulação, segundo Pituba (1998), deduz que o comportamento não-linear do concreto é proveniente do fenômeno da microfissuração, onde modelos constitutivos são idealizados segundo as leis da termodinâmica ou por efeitos mecânicos. Este processo de microfissuração ainda é responsável pela redução da rigidez e da plastificação.

A princípio, é importante destacar a grande relevância do processo de microfissuração em análises de dano aos materiais cimentícios, como o concreto, rochas e cerâmica. Em virtude de que esses defeitos internos influenciam as ligações do material afetando as propriedades elásticas, desta maneira, tais modelos mecânicos admitem que a perda progressiva de resistência, assim como a de rigidez, são decorrentes unicamente a este fenômeno.

No âmbito da modelagem de um dado material, a caracterização de dano parte da premissa da aplicação em regime de ruptura, de análises e descrição do comportamento de metais sob carregamentos monotônicos ou cíclicos. Quando estão em regime de ruptura, os metais apresentam microfissuras, em seguida ao desenvolvimento da plastificação. No entanto, a teoria de dano aplica-se ao concreto devido à grande evolução no desenvolvimento de microfissuras. Assim o progresso da microfissuração é levado em consideração de forma contínua, manifestando-se mesmo com mínimas deformações ou tensões.

1.5.3.2 Modelos de Dano e Aplicações em Estruturas de Concreto Armado

Os modelos de dano podem ser distinguidos como isotrópicos e anisotrópicos, ou ainda conforme a natureza da variável de dano empregada seja escalar ou tensorial. Em relação aos modelos escalares, são teoricamente análises simplificadas e, tem como benefício um número minimizado de parâmetros a identificar. Contudo, podem ter sua aplicação limitada em algumas situações. Já nos modelos anisotrópicos, a variável de dano é de grandeza tensorial, que detém uma vasta área de possibilidades em sua aplicação. Porém, nesses modelos tem-se um grau elevado de complexidade na identificação dos parâmetros do modelo, o que pode torna-lo sem aplicabilidade prática.

De forma geral, define-se o conceito de isotropia a partir das características constitutivas do material, nas quais, não variam com a direção do sistema de coordenadas analisado, por outro lado, no que se refere à anisotropia, há propriedades direcionais.

Nesse domínio, Pituba (2003) esclarece que nos modelos de dano isotrópicos a quantidade de direções ou planos iniciais de simetria do material permanece constante, isso significa que o meio considerado inicialmente isotrópico ou anisotrópico com algum certo grau, as características se preservam com a danificação. Ainda para o caso do concreto pode indicar que o processo de desenvolvimento da danificação nas fases não-lineares motiva a anisotropia, ou mais especificamente a isotropia transversal, que é observada através da orientação específica da microfissuração durante o processo de carregamento.

Neste mesmo contexto, cita-se o modelo precursor proposto por Kachanov (1958). Responsável por introduzir o conceito de dano, este foi elaborado no interesse em formular modelos de ruptura frágil em metais ao longo de um período de deformação lenta. Dessa forma, idealizou-se um parâmetro que é capaz de descrever o estado do material a partir das falhas de fluência, que são decorrentes de ciclos longos de carregamentos. Tal parâmetro foi proposto para caracterizar o estado de integridade do material, o qual pode variar entre 0 a 1, cujo valor igual a 1 representa o material totalmente íntegro, ausente de defeitos, por outro lado, quando igual a 0, é caracterizado por estar inteiramente deteriorado, com nenhuma capacidade de carga resistente. Este autor ainda assumiu o dano como uma variável de natureza escalar.

Já no final da década de 60, Rabotnov (1969) apresentou um modelo que relacionava a redução da rigidez do material a partir do processo de fissuração. Após esse período, Lemaitre e Chaboche (1985) formalizaram a Mecânica do Dano no Contínuo dentro dos Princípios Termodinâmicos dos Processos Irreversíveis.

Verificam-se ao longo dos anos modelos constitutivos propostos que associam o conceito da variável de dano com o material concreto. Dentre eles, em Pituba (1998) é destacado alguns: Lemaitre e Chaboche (1974), Lemaitre (1984) e Marigo (1985) na relação do material com a análise em dano-fadiga, Murakami (1981) e Kachanov (1984), que propuseram a modelagem em (*creep damage*), levando em consideração a degradação lenta do material, e há também o estudo do dano plástico em materiais dúcteis, desenvolvido por Simo e Ju (1987), Tai (1990) e Han e Mou (1993). Da mesma forma, em estruturas de concreto armado e concreto reforçado em fibras submetidas a cargas proporcionais ou cíclicas, referenciam os autores Mazars, Pijaudier-Cabot e La Borderie (1991), Florez-López (1993), Álvares (1998), Pereira Júnior e Pituba (2016) e Araújo e Pituba (2021) que introduzem o dano para esse tipo de estrutura.

Modelos de Dano Isótropos

Ressalta-se entre os isótropos o modelo de Mazars (1984), que foi o pioneiro quanto à modelagem do concreto armado incorporando o dano. O dano é quantificado como uma variável escalar que é função de uma deformação principal equivalente, sendo que, quando esta atinge um valor limite, inicia-se a evolução do dano. Em especial, esta formulação recupera respostas obtidas por meio de ensaios experimentais, diretamente do diagrama completo de tensão-deformação do concreto. Dessa forma, sendo possível não só a determinação de seus próprios parâmetros, como também representar com eficiência o comportamento não-linear deste material.

São encontrados na literatura alguns outros modelos isotrópicos com referência ao concreto, cita-se: Resende (1984), que propôs que a deterioração do material se acomete de tal forma que a característica de isotropia inicial permanece constante, Chaboche e Lesne (1988), quanto ao estudo em dano-fadiga em uma formulação uniaxial, descrevendo a progressão do processo de deterioração material antes da iniciação de fissuras macroscópicas, Pijaudier-Cabot e Bazant (1988), apresentam um modelo de dano contínuo não local e isotrópico, no qual a variável de dano é representada por um parâmetro escalar que afeta a rigidez secante do material, aplicadas em análises de estabilidade dinâmica, Lubliner et al. (1989), no critério de rendimento a partir da combinação de dados experimentais tendo em conta a degradação de rigidez elástica e plástica do material e Luccioni, Oller e Danesi (1996), que propuseram um modelo mecânico constitutivo que acopla a teoria da plasticidade em conjunto com dano.

Mazars e Pijaudier-Cabot (1989) expuseram uma revisão sobre modelos constitutivos de concreto baseado na teoria do dano no contínuo, com discussões relativas às análises de comportamento dúctil, efeitos direcionais como o fechamento de fissuras e também a anisotropia induzida. Pode-se ainda referenciar trabalhos que incorporam modelos escalares, por exemplo o de Cervera, Oliver e Manzoli (1998), Chandrakanth e Pandey (1998), Köksal e Karakoç (1999), Faria, Oliver e Cervera (1998),

Mazars e Pijaudier-Cabot (2001), Tang, Jiang e Zheng (2001), Nechnech, Meftah e Reynouard (2002), Tang et al. (2005), Wu et al. (2006), Rodrigues e Manzoli (2011) e Behbahani, Barros e Gouveia (2015).

Comi e Perego (2001) obtiveram bons resultados quanto à proposta de um modelo isotrópico de dano para o concreto. O intuito foi observar o comportamento macroscópico de estruturas em concreto em conjunto com a implementação da teoria dos elementos finitos. A modelagem teve como principais características: um número relativamente limitado de parâmetros constitutivos necessários, modelagem independente do comportamento tensão e compressão por meio de duas variáveis de dano e o critério de modelo bi-dissipativo.

Ainda sobre os modelos constitutivos escalares, Tao e Phillips (2005) desenvolveram um modelo simplificado de dano biaxial, no qual é determinado um parâmetro de dano ponderado capaz de reduzir as complexidades numéricas e também permite uma maneira menos complexa em modelar o comportamento material decorrente do carregamento biaxial. Os autores ainda relatam que a proposta é aplicável quanto à modelagem de respostas de concreto sob carga monotônica e carga de arrancamento.

Modelos de danos plásticos acoplados têm sido amplamente adotados para descrever a degradação da rigidez e deformações de materiais plásticos, conforme indicado em Horstemeyer e Bamman (2010): Ortiz (1985), Ju (1989), Voyiadjis e Kattan (1992), Armero e Oller (2000), Ibrahimbegovic et al. (2008) e Zhu et al. (2010), assim como outros muitos trabalhos referenciadas nos textos de Ibrahimbegovic (2009) e Krajcinovic (2003).

Também há de se destacar alguns outros autores quanto a análise de dano elastoplástico, Najjar, Zaman e Faruque (1990), Meschke, Lackner e Mang (1998), Jason et al. (2006), Feist e Hofstetter (2006), Poh e Swaddiwudhipong (2009), Liu et al. (2011), Wu e Xu (2011), que são apresentados com base nos princípios irreversíveis da termodinâmica com variáveis internas. Entre os demais recentes: Gernay, Millard e Franssen (2013), Gernay e Franssen (2015), Demin e Fukang (2017) e Sarikaya e Erkmen (2019).

Muitos dos modelos são empregados a certos tipos de estruturas, em referência ao concreto, Barbat et al. (1997) propuseram um modelo de visco-dano a fim de se avaliar o comportamento não-linear em estruturas de concreto armado sob ações sísmicas. Tendo em conta a viscosidade material, Scotta et al. (2001) validaram um modelo isotrópico por meio a análises de falha de cisalhamento, comparando resultados numéricos com os ensaiados experimentais. Já Mazars et al. (2014) trabalhou na aplicação de uma nova formulação denominada de “*modelo μ* ”, com o objetivo de modelar o concreto simples ou armado, também sob carregamento cíclico, e este tem como base num acoplamento da plasticidade e dano dentro de uma formulação isotrópica. Mihai, Jefferson e Lyons (2016) propuseram um modelo elastoplástico de dano, em que, aplicou-se em concreto reforçado com fibras, rendendo resultados precisos de forma a capturar o comportamento característico para este tipo de estrutura.

O desenvolvimento de modelos materiais sujeito a cargas dinâmicas intensas, como por exemplo, cargas de impacto, penetração e explosão, é um tópico que também vem ganhando destaque nas aplicações em estruturas de concreto, dentro da esfera atual. É possível encontrar variadas formulações com base neste âmbito, entre as mais recentes pode-se apontar os trabalhos Kong et al. (2018) e Bai et al. (2020).

Modelos de Dano Anisótropos

Conforme Pituba (1998), a MDC propõe uma abordagem racional para o fenômeno de danificação distribuída em meios contínuos, valendo até os limites da mecânica da fratura. A danificação inclui o processo de nucleação e alargamento de cavidades microscópicas espalhadas em meios submetidos a diferentes tipos de carregamentos, tendo efeito direto sobre as propriedades mecânicas do material. A distribuição de defeitos e microfissuras iniciais localmente varia de forma relevantemente expressiva com a direção considerada, sendo intrinsecamente anisótropa. Por isso, a anisotropia induzida no material com dano é um aspecto importante a ser considerado na elaboração de modelos constitutivos, especialmente se as condições forem de carregamento não-proporcional.

Com relação aos modelos anisotrópicos, em especial ao concreto, alguns já consolidados menciona-se os trabalhos dos autores: Ortiz (1985), na análise simplificada de um modelo de degradação da rigidez elástica, onde módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson diminuem de forma não-linear com o aumento da danificação, isto é, tem como hipótese que o processo de fissuração, manifesta-se com anisotropia material, Yazdani e Schreyer (1988), onde a teoria é capaz de acomodar a anisotropia induzida, Ramtani (1990), Papa e Taliércio (1996) e Comi (2000), em modelos que as deformações permanentes não são consideradas desprezíveis em situações de descarregamento, associando-as em suas formulações unicamente ao fenômeno da danificação. Também outros modelos encontrados na literatura que podem ser evidenciados: Ladeveze (1983 apud PITUBA, 2003), Karihaloo e Fu (1990), Pröchtel e Häubler-Combe (2008), Gernay, Millard e Franssen (2013), Wang et al. (2014), Breccolotti et al. (2015), Javanmardi e Maheri (2017), Long et al. (2017), Wardeh e Toutanji (2017), Wu e Cervera (2018) e Vilppo et al. (2021).

Inclusive, ainda é possível identificar estudos que tratam de formulações de leis constitutivas para meios elásticos que passam a apresentar diferentes comportamentos em tração e compressão, bem como algum grau de anisotropia quando danificados, como pode ser encontrado em Curnier, He e Zysset (1995), Pituba (2006), Pituba e Lacerda (2012), Pituba e Pereira Júnior (2015) e Pituba (2019). No mesmo âmbito, referenciam-se os modelos matemáticos de dano propostos por Pituba (2003) e Pituba e Fernandes (2011). Estes estudos, por sua parte, apresentam um conceito em que se admite o concreto como meio inicialmente isotrópico e que passa a apresentar deformações plásticas, bimodularidade e anisotropia induzidas pelo dano. E que, para se levar em conta a bimodularidade, dois tensores de dano governando a rigidez em tração e em compressão são introduzidos.

Aplicações de Modelos de Dano em Estruturas de Concreto Armado

Com o objetivo de desenvolver métodos de cálculo de deslocamentos e tensões em estruturas de edifícios, Botta (1998) introduziu em suas pesquisas o conceito de modelos constitutivos não-lineares, para determinar com mais precisão o comportamento de estruturas de concreto armado.

A metodologia empregada consistiu na implementação de dois algoritmos que reproduzem os modelos de dano isotrópicos para concreto, originalmente apresentados por Mazars (1984) e Cervera et al. (1996), cuja a intenção foi determinar deslocamentos e os esforços em grelhas de pavimentos de concreto armado, assumindo a armadura concentrada em uma única camada respeitando um regime de comportamento elastoplástico com encruamento positivo.

Nas aplicações numéricas, foram dispostos exemplos de estruturas em concreto armado, onde foram analisados uma viga e um pavimento de um edifício, com adição ainda da comparação entre modelos usuais e modelos de dano. Como resultado, o autor obteve respostas satisfatórias, em destaque à análise do pavimento, podendo observar certa coerência na distribuição de esforços e deslocamentos ao que se espera na aplicação de modelos não-lineares.

Já Marante et al. (2002) propôs uma formulação geral de pórticos tridimensionais em concreto armado para avaliação sísmica, em que foi abordado um experimento numérico com método dos elementos finitos, baseando-se na teoria da mecânica do dano no contínuo, mecânica da fratura e no conceito de rótulas plásticas. As simulações de energia elástica e sísmica atuantes no pórtico foram constituídas usando a hipótese de dissipação concentrada.

Os autores concluem que conceitos de mecânica da fratura e do dano no contínuo podem ser adaptados para a análise de estruturas com rótulas, demonstrando resultados satisfatórios e precisos para a análise de problemas tridimensionais complexos.

Um estudo de pórticos em concreto armado sujeitos a carregamentos sísmicos e simulado com um modelo de dano plástico foi desenvolvido por Faleiro et al. (2008). O objetivo do estudo foi criar um modelo analítico para prever a resposta ao dano plástico de pórticos planos de vários pavimentos seguindo teorias clássicas da mecânica do dano no contínuo e teorias clássicas de plasticidade.

A análise utiliza modelos baseados em dano plástico e dano global em vigas e pilares elásticos com duas rótulas inelásticas, conectadas para avaliar o comportamento não-linear dos elementos. De resposta, o modelo proposto mostra-se ser eficaz para a simulação numérica de pórticos de concreto armado, além de representar com precisão o comportamento sísmico real dessas estruturas.

Machado e Souza (2011) apresentam em seu trabalho um estudo do comportamento de peças estruturais de concreto por meio ao acoplamento do modelo de dano escalar de Mazars (1984) e um modelo de fratura proposto. A análise dos elementos de concreto evidencia o fissuramento inicial com incremento de carregamento através do elemento de interface de linha considerando o fenômeno de amolecimento. Obtém-se no trabalho que a modelagem numérica alcançou a identificação, de forma significativa, a propagação de fissuras pré-existentes em elementos de vigas de concreto armado.

Também utilizando como premissa o mesmo modelo de Mazars (1984), um estudo de calibração de parâmetros foi aplicado a vigas de pórticos planos em concreto armado, apresentado por Nogueira (2012). Para tal, utilizou-se do método dos mínimos quadrados em conjunto com a técnica de Gauss-Newton. A calibração dos parâmetros para cálculo das vigas de concreto armado foi incorporada a um modelo mecânico em elementos finitos que considera o comportamento não-linear dos materiais e geometria da estrutura.

Dessa forma, obtiveram respostas que demonstram estabilidade na calibração dos parâmetros, e em quase todos os testes foi possível alcançar os valores desejados para as classes de concreto armado estudados. Por fim, o autor conclui que os parâmetros do modelo de dano de Mazars podem ser aplicados para este cenário, pois foram encontrados resultados fora da margem de intervalo, os quais apresentaram bons resultados de comportamento na modelagem.

Um modelo de análise simplificado de fissuração e dano em elementos de arco em concreto armado foi indicado por Proença et al. (2013). A técnica baseou-se em uma adaptação da mecânica da fratura, do dano no contínuo e na teoria dos arcos com rótulas plásticas. Os efeitos não-lineares e de deslocamentos foram avaliados, assim como as deformações na parte elástica dos arcos. Os autores concluem que o modelo proposto descreve corretamente o comportamento dos arcos, incluindo a localização das fissuras. E assim o uso da mecânica do dano no contínuo pode ser empregado para avaliação de estruturas em concreto armado grandes e complexas, que possuem componentes circulares.

Com objetivo de prever o comportamento à flexão de lajes de concreto armado, foi proposto um modelo por Lima (2013). O método não-linear, combinou o modelo de dano de Mazars (1984) na simulação da perda de rigidez de concreto durante a fissuração, o modelo elastoplástico no escoamento e ruptura do aço e a teoria clássica de laminados para o comportamento à flexão dos elementos estruturais.

Segundo os autores, os resultados obtidos nas análises foram satisfatórios e conseguiram prever o comportamento de lajes submetidas à flexão, apresentando a vantagem de requerer um número reduzido de parâmetros experimentais.

Utilizando modelos constitutivos baseados em mecânica do dano, Pereira Junior (2014) realizou a modelagem numérica do comportamento mecânico de estruturas de concreto com fibras. A formulação considerou no modelo de dano o concreto como um material isotrópico e elástico, as fibras foram incorporadas utilizando um processo de homogeneização, e a estrutura constituída de vigas foi analisada com a técnica dos elementos finitos. Além que, estes elementos de vigas em concreto armado reforçados foram submetidos a ensaios numéricos de flexão para avaliar a aplicabilidade do modelo. No estudo, o autor conclui que o modelo de dano aplicado no estudo de vigas com reforço fibroso valida o emprego em regime de serviço de estruturas a resposta do comportamento mecânico no que tange à deformabilidade, e que tende a fornecer valores próximos dos observados na bibliografia presente no trabalho.

Pituba e Pereira Júnior (2015) propõem em seu trabalho, um aperfeiçoamento de um modelo de dano anisótropo, de forma que se possa investigar o comportamento em estruturas de concreto armado submetidas à inversão de carregamento. Em seu embasamento, o modelo assume o concreto como um material inicialmente elástico e isótropo, e que passa a apresentar um comportamento mecânico anisótropo, bimodular e plástico, que são induzidos pelo fenômeno da danificação.

Tendo o propósito de se levar em conta o processo de bimodularidade do meio, os autores apresentam dois tensores de dano, nos quais são governantes quanto a rigidez em regimes de tração de compressão. No entanto, na formulação original, presente em Pituba e Fernandes (2011), é observado a não capacidade em se captar a influência de processos preexistentes de danificação em regime de compressão. Visando solucionar esse problema, algumas condições são introduzidas por meio a um novo tensor elástico proposto, objetivando assim simular o efeito unilateral provocado pelo dano. Na análise do modelo, foram elaborados exemplos numéricos a fim de se validar o estudo proposto. Para isso, um modelo unidimensional de dano foi implementado em um código de elementos finitos em camadas, dessa forma sendo possível a modelagem das estruturas de concreto armado. As hipóteses adotadas para avaliação numérica foram: comportamento padrão elastoplástico para as barras de aço longitudinais, aderência perfeita entre os materiais e módulo de elasticidade e deformação inelástica equivalentes definidas a partir de uma regra de homogeneização adotada. Nas aplicações numéricas para as identificações paramétricas do modelo, foram avaliadas por meio a três respectivos tipos de estruturas em concreto armado, experimentalmente ensaiadas. Estas são encontradas na literatura em La Borderie (1991) e Matallah e La Borderie (2009), no que é referente a uma viga de concreto armado, com armadura simétrica e submetida a um carregamento cíclico no meio do vão, em seguida de um pórtico também em concreto armado, originalmente ensaiado por Vecchio e Emara (1992), que leva em consideração somente o carregamento e descarregamento proporcional, sem reversão de carregamento, porém, os autores neste trabalho tomaram para a formulação um carregamento reverso no intuito em mostrar as potencialidades das condições de carregamento. Por fim, a terceira aplicação numérica é sobre uma viga em concreto com armadura longitudinal assimétrica, inicialmente estudada em Pituba e Lacerda (2012), que para aquela ocasião, houve uma imposição de carregamentos monotônicos.

Dessa forma, tendo a finalidade em se comparar as respostas obtidas do aprimoramento de um modelo proposto bi-dissipativo de dano nas mesmas condições das estruturas experimentalmente ensaiadas, os autores obtiveram dentre as principais conclusões: o modelo apresentado atende aos requisitos sugeridos por Weleman e Comery (2002) para a análise micromecânica do efeito unilateral em materiais, a continuidade da lei tensão-deformação através da interface tensão-compressão foi garantida e o modelo permite que se preserve a isotropia do tensor de elasticidade. Além destas, para a validação do referido modelo em situações práticas, foi concebido em uma versão 1D simplificada, cuja análise mostrou-se eficiente na simulação dos processos de danos em estruturas de pórticos submetidas a inversão de carregamento, tendo um baixo custo computacional, trazendo consigo uma simplificação na identificação paramétrica.

Os autores, inclusive, também relatam que tal modelo de dano pode ser empregado ainda em determinadas situações práticas da engenharia estrutural, tais como: simulação numérica de deslocamento em vigas fissuradas de concreto armado submetidas a carregamentos de serviço e estimativa da capacidade de carga última de pórticos e vigas.

Por outro lado, Coelho (2016) aplicou em uma viga de um pórtico plano de concreto armado a teoria de dano concentrado para modelar o comportamento mecânico não-linear do material, sem que fosse necessária a representação do dano ao longo do domínio da estrutura. A implementação computacional se deu na utilização do modelo de dano concentrado acoplado com método dos elementos finitos.

O estudo verificou a influência das forças no deslocamento e os resultados foram comparados com trabalhos numéricos e experimentais encontrados na literatura. Por fim, o autor conclui que os resultados apresentaram boa concordância numérica e experimental sem grandes variações.

Já no trabalho de Rocha (2017), foram abordados dois métodos de análise da influência da resistência ao cisalhamento do concreto na flexão de lajes moldadas em concreto armado. O intuito foi propor um modelo de dano no contínuo através de uma formulação que represente o comportamento de placas retangulares de lajes sujeitas à flexão. A simulação dos elementos estruturais foi feita através da teoria clássica de laminados e a formulação variacional através do princípio do trabalho virtual. O primeiro modelo utiliza combinações de dano isotrópico, que releva o comportamento distinto do concreto com relação à tração e à compressão, já para o segundo, teve como base os fundamentos encontrados nos trabalhos de Oliver et al. (1990) e Köksal e Karakoç (1999), no qual a validação deu-se em pelo menos um experimento submetendo placas de concreto à cisalhamento. Conforme o autor conclui, o uso dos modelos de dano contínuo demonstrou alterar o módulo de elasticidade transversal do concreto, e apresentaram falhas no equilíbrio das lajes gerando uma resposta não satisfatória da análise não-linear.

Ainda Uchoa (2017) realiza um trabalho para estimar a rigidez à flexão de vigas em concreto simples, quando estas estão submetidas a ensaios experimentais de flexão de quatro pontos utilizando a aplicação da teoria de dano concentrado. O modelo adota conceitos da mecânica da fratura e de dano aplicados em rótulas inelásticas para quantificar os efeitos de fissuração sobre o material e seu comportamento não-linear. Para isso, foram comparados valores de rigidez encontrados na bibliografia com a rigidez da flexão e deslocamentos obtidos pelo dano concentrado. A autora demonstra que os resultados apresentaram comportamento semelhante e um pouco inferiores aos com análises elásticas presentes em estudos anteriores.

Já Huguet et al. (2017) apresentaram um modelo constitutivo de dano isotrópico, resultante de tensão não-linear para painéis de concreto armado. Utilizou-se o modelo de escala global e análise multi-escala na interação entre os fenômenos atuantes no painel de concreto. O modelo resultante foi definido por uma teoria de material padrão generalizado.

Os ensaios foram realizados por testes de tensão pura uniaxial, de tensão-compressão e ensaio cíclico de cisalhamento global, a fim de identificar a capacidade experimental em valores globais de força, deslocamento e para os locais de fissuras. Como resultados, os autores apresentaram boa concordância entre as curvas tensão-deformação e a evolução das fissuras, além disso, o modelo permitiu analisar a contribuição relativa de cada fenômeno ao longo do período de carregamento.

Jamali et al. (2018) estudaram um procedimento de avaliação baseado em multicamadas para estimar a capacidade resistente de pontes existentes. Foram usadas combinações de técnicas de monitoramento de integridade estrutural, análise não-linear e abordagens probabilísticas para definir com eficácia os problemas de segurança dessas estruturas. Para a identificação da resposta não-linear, foi utilizado um modelo de dano plástico. Os autores demonstram que a precisão da avaliação da ponte é significativamente melhorada quando técnicas de monitoramento de integridade estrutural com análise de elemento finito não-linear são incorporadas, permitindo assim mais confiabilidade e segurança para a estrutura.

No estudo de Matias (2018) foi apresentada a criação de uma ferramenta computacional para modelar os efeitos não-lineares e dinâmicos em pórticos planos de concreto armado. Para isso, foram implementados dois modelos constitutivos unidimensionais de concreto baseados na teoria da plasticidade e na mecânica do dano no contínuo. O primeiro utilizando o modelo clássico de dano isotrópico de Mazars (1984), e o segundo, um modelo de plasticidade com dano acoplado desenvolvido por Lee e Fenves (1998) e a implementação foi baseada no método de Newton-Raphson. Conforme conclui o autor, os métodos foram suficientes para capturar algumas das principais causas não-lineares em elementos de concreto armado, como a degradação da rigidez e o surgimento de deformações. Além disso, entre as vantagens dos modelos encontra-se a facilidade de ajuste das curvas tensão-deformação baseada na energia de fratura, resistência característica e evolução do dano.

Com base na teoria do modelo de distribuição de Weibull, Zheng et al. (2019) propuseram em seu trabalho explorar mecanismos de falha do concreto projetado através de modelos numéricos de dano. Para isso, três tipos de concreto projetados foram sujeitos a avaliações de propriedades como acústica para estudo de compressão uniaxial, falhas de mecanismos de dano conforme os valores de energia e contagens de acertos cumulativos sob cargas. Logo para estas validações, utilizou-se de amostras dos materiais de experimentos físicos avaliados pelos mesmos métodos para cada um dos tipos de compostos utilizados. Assim, os autores concluíram que o modelo de distribuição de Weibull modificado apresenta melhoras para o uso do concreto projetado e fornece referências para usos futuros.

Rabi et al. (2019) apresentaram um estudo sobre o comportamento de armaduras de aço inoxidável utilizando o método de resistência contínua em vigas de concreto, incluindo vigas com diferentes características a respeito do aço empregado. A técnica para identificar o melhor desempenho foi definida através de avaliação da capacidade de deformação da seção dos elementos com auxílio do método dos elementos finitos, e quanto ao estudo material concreto, um modelo constitutivo baseado na mecânica do dano no contínuo. Como resposta obteve-se a solução em que os parâmetros utilizados no

método geram soluções analíticas completas e precisas, que fornecem um meio confiável para prever a capacidade da armadura de aço inoxidável utilizada em vigas de concreto armado e podendo assim ser utilizadas para projetos reais.

Um procedimento baseado em modelos de fratura não-linear foi proposto por Cifuentes et al. (2019), a fim de analisar o nível de fissuração e segurança estrutural em elementos de concreto armado em função do tempo de desforma. O procedimento foi feito utilizando modelos numéricos em elementos finitos e a avaliação da fratura foi feita por meio de um modelo de dano material realizados em corpos de prova e vigas entalhadas sujeitas à flexão. Os autores demonstram que as previsões numéricas estão de acordo com as observações experimentais validando a metodologia e determinando o tempo de desforma ideal para estruturas de concreto armado.

Uma nova formulação de elemento finito para análise de problemas de localização de deformações em chapas foi apresentada por Oliveira (2020). Em seu trabalho é implementada uma expansão do conceito de dano concentrado em meios bidimensionais. Esta é referente a um acoplamento de ideias chave da mecânica da fratura e do dano, em conjunto também ao conceito de rótulas plásticas. A contribuição do estudo parte da aplicação do modelo constitutivo em questão levando em conta aos elementos estruturais de chapas, já que, tais modelos estavam limitados a análise de pórticos e arcos. A combinação de um elemento elástico de barra agregado com duas rótulas inelásticas nas extremidades é responsável pela geração do elemento finito proposto. Foram obtidos resultados condizentes ao que foi proposto, onde apontou-se objetividade de solução e a convergência para uma solução única a partir do refinamento da malha de elementos finitos quanto aos exemplos apresentados.

Faron et al. (2020), apresentaram estudos de simulações numéricas não-lineares de propagação de fissuras com diferentes abordagens em vigas de concreto sem armadura transversal. O mapeamento dessas fissuras foi realizado por meio do método de elementos finitos, e um modelo material de dano isótropo, baseado na combinação de plasticidade e teoria de dano, previsto em Lee e Fenves (1998). Os estudos demonstraram que a ferramenta numérica é adequada para este tipo de análise, os resultados foram condizentes e satisfatórios validando o seu uso experimental. No entanto, os autores destacam que são necessários mais testes para validação real de todos os pontos propostos.

Martinelli et al. (2020) apresentaram um estudo a fim de avaliar a resposta de fissuras de vigas em compósitos cimentícios reforçados com fibra quando sujeitos à flexão. Para isto, propõem um modelo não linear de fissuras com rótulas, baseado em deslocamento com uma abordagem mesomecânica da distribuição e orientação das fibras de reforço. Uma implementação numérica foi realizada para representar a distribuição espacial aleatória, a orientação das fibras dentro dos compostos e simulação da resposta de fissuração das vigas reforçadas com fibra. Assim, os autores apresentam que o método de fissuras é capaz de representar com bastante fidelidade o comportamento de fissuração de tais compósitos reforçados com fibra.

Um modelo simples de dano concentrado é estudado no trabalho de Teles et al. (2020), para analisar vigas de concreto armado sob cargas de impacto sobre condições inelásticas de fissuração do concreto e escoamento da armadura. A análise tem como base a termodinâmica de processos irreversíveis em que a fissuração é contabilizada como uma variável de dano e o escoamento da armadura é quantificado por deformações plásticas. Os resultados demonstram que o modelo é capaz de quantificar o comportamento não linear de vigas de concreto armado por flexão sujeito aos carregamentos de impacto e ainda estimar deflexões plásticas próximas às experimentais. Os autores concluem que a principal vantagem do modelo proposto é a fácil aplicação a problemas práticos devido as grandezas de entrada e saída serem de fácil compreensão.

Pelo exposto até aqui, percebe-se que a Mecânica da Dano é muito utilizada na simulação do comportamento mecânico do concreto fissurado, porém com finalidades diversas que não àquela de viabilizar a proposição de modelos de estimativa de deslocamentos. Portanto, o presente trabalho tem originalidade de contribuição para a obtenção de métodos de estimativas de deslocamentos em vigas fissuradas de concreto armado mais condizentes com a realidade do comportamento mecânico do material concreto.

2 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DO DANO NO CONTÍNUO

2.1 GENERALIDADES E DEFINIÇÕES

Os processos de dissipação de energia no concreto, como os conceitos originários de Dano e Plasticidade, em visão macroscópica, são reflexos do que ocorre a nível microestrutural. Alguns fenômenos inelásticos em determinados problemas decorrem a partir de uma distribuição difusa de microfissuras, ou através de outros microdefeitos que favorecem a perda de integridade material.

A manifestação da não-linearidade observada na microestrutura em sólidos é decorrente de processos irreversíveis como: alterações de fase, escorregamentos relativos entre cristais, difusão de elementos químicos, perdas de coesão em planos de clivagem de planos cristalográficos, mudanças de porosidade, dentre outros. Interessante ainda entender que o dano inicial do material é constituído por um microdefeito originado por alguns desses processos, nos quais, são caracterizados por vazios ou inclusões, proporcionando assim uma localização de microtensões.

A teoria de dano teve como premissa análises em regime de ruptura do comportamento mecânico de metais enquanto submetidos a carregamentos cíclicos ou monotônicos. As microfissuras surgem em metais em regime de ruptura, após um processo de plastificação pronunciado. Já para o concreto, os fundamentos de dano também podem ser bem aplicados, visto que, a evolução da microfissuração pode ser considerada contínua, e é iniciada mesmo com pequenas deformações ou baixas tensões.

Ainda de acordo com o tipo de mecanismo que caracteriza a degradação mecânica de um material, o dano ainda pode ser classificado em duas distintas classes, dano frágil e dano dúctil. Para a primeira, em síntese, está diretamente relacionada ao crescimento e nucleação de pequenas cavidades aglutinadas até que se forme uma fissura compreendida na mesoescala. Já o dano dúctil, é decorrente principalmente pela deterioração de ligações atômicas localizadas no contorno das interfaces de inclusões.

Isto posto, o dano pode ser entendido como a razão básica da resposta não-linear de grande parte dos sólidos denominados granulares. Macroscopicamente, a partir da evolução da danificação, as deformações permanentes são observadas ainda como respostas oriundas do desenvolvimento do processo de microfissuras, enquanto há um estágio mais avançado de solicitação mecânica, em conjunto de condições ambientais.

Vale ainda retratar que a MDC se apresenta como uma teoria conveniente para a formulação de modelos constitutivos relacionados aos materiais que apresentam defeitos em sua microestrutura. Seus princípios são derivados dos conceitos gerais da termodinâmica. Esta ainda, em meios contínuos, é capaz de reproduzir a não-linearidade do comportamento do concreto, de forma a expressar o resultado da microfissuração com a atenuação das propriedades de rigidez e resistência do material.

Neste cenário, os princípios do dano, de forma local, conseguem descrever o desenvolvimento a partir de um estado inicial, correspondente a uma situação com material íntegro a um estado final, representado pela formação macroscópica de uma fissura. Para o concreto, sabendo que é um sólido onde a fissuração é fenômeno preponderante enquanto comportamento não-linear, a MDC evidentemente é apropriada para a formulação de modelos realísticos, especialmente em regimes de serviço, quando fraturas ainda não são tão preponderantes.

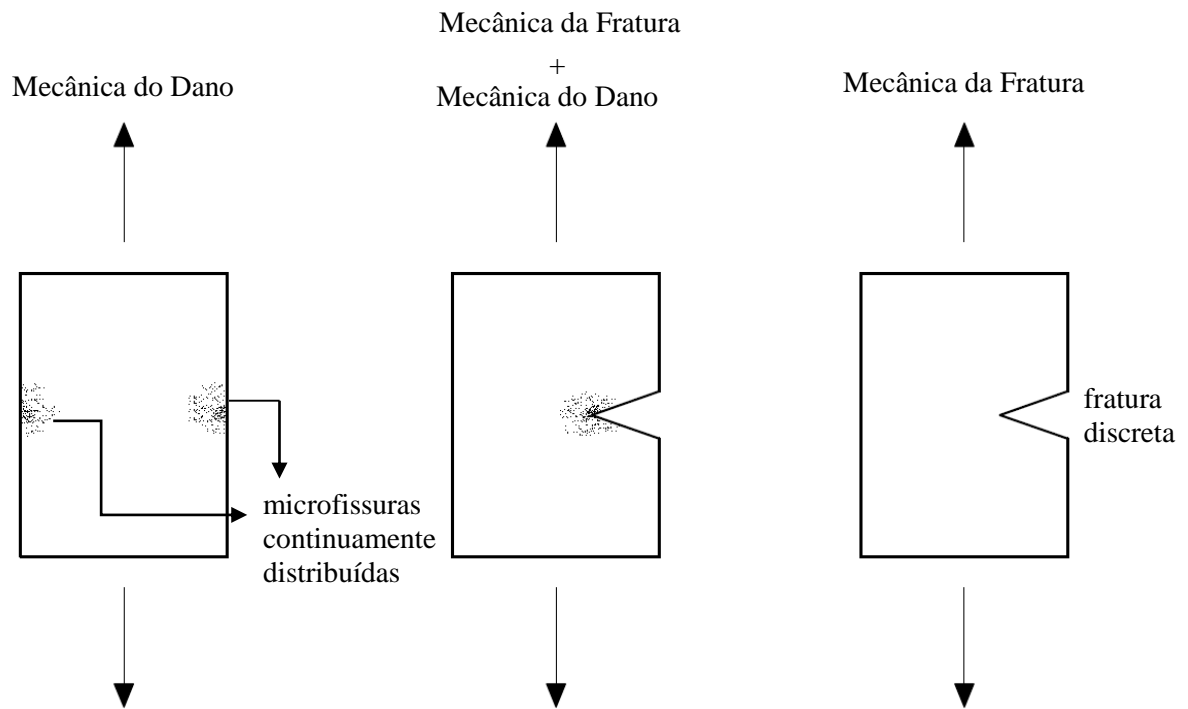
Ainda sobre a definição conceitual, a MDC é designada como um recurso para a simulação, em meios contínuos equivalentes, da deterioração de materiais devida exclusivamente a um processo de microfissuração, sendo bem empregada para simular o comportamento mecânico do concreto fissurado. A teoria procura descrever, mediante uma relação constitutiva local, a evolução do processo real de microfissuração que se desenvolve entre um estado inicial, relativo a uma situação de material íntegro, e um estado final, representado pela ruptura do elemento de volume representativo em torno do ponto considerado, o que se pode associar com a formação de uma fissura macroscópica.

Esta ferramenta constitutiva servirá à modelagem do comportamento mecânico de materiais fissurados, inclusive sendo possível a simulação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado, submetidas a cargas de pequena intensidade até carregamentos que levem ao seu colapso.

Frente ao que foi evidenciado até então, nota-se que o dano não é uma grandeza física capaz de se mensurar diretamente, entretanto, por meio a uma modelagem matemática, é possível quantificá-lo através de uma redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como o módulo de elasticidade longitudinal.

Já o desenvolvimento de uma fatura discreta é decorrente da evolução de uma localização do dano em uma determinada região, constituída por uma pequena largura contida no meio. Com a sua evolução progressiva gera-se uma descontinuidade. Dessa maneira, a fratura discreta é pertencente a uma fase posterior à do dano.

Em discussão sobre a diferenciação entre Mecânica do Dano e Mecânica da Fratura, é demonstrado na Fig. (2.1) abaixo, o campo de validade de cada uma:

FIGURA 2.1 - Campo de validade entre a Mecânica do Dano e Mecânica da Fratura.

Fonte: Adaptado de Botta (1998).

Pelo que é descrito nos trabalhos de Pituba (1998) e Flórez-López, Marante e Picón (2015), entende-se que na MDC, a deterioração de um material é proveniente de microfissuras ou microvazios, nos quais, são suficientemente pequenos para serem considerados aberturas discretas como conceituado na Mecânica da Fratura, porém, grande o bastante para não serem desprezados. Na MDC a resistência de uma estrutura carregada é estabelecida de acordo com a progressão de um campo de defeitos continuamente distribuídos, como poros e microfissuras. Já na Mecânica da Fratura, a resistência de uma estrutura carregada é determinada de acordo com a progressão de um defeito em particular como uma fissura já definida e o meio em torno à fissura é assumido como mecanicamente intacto.

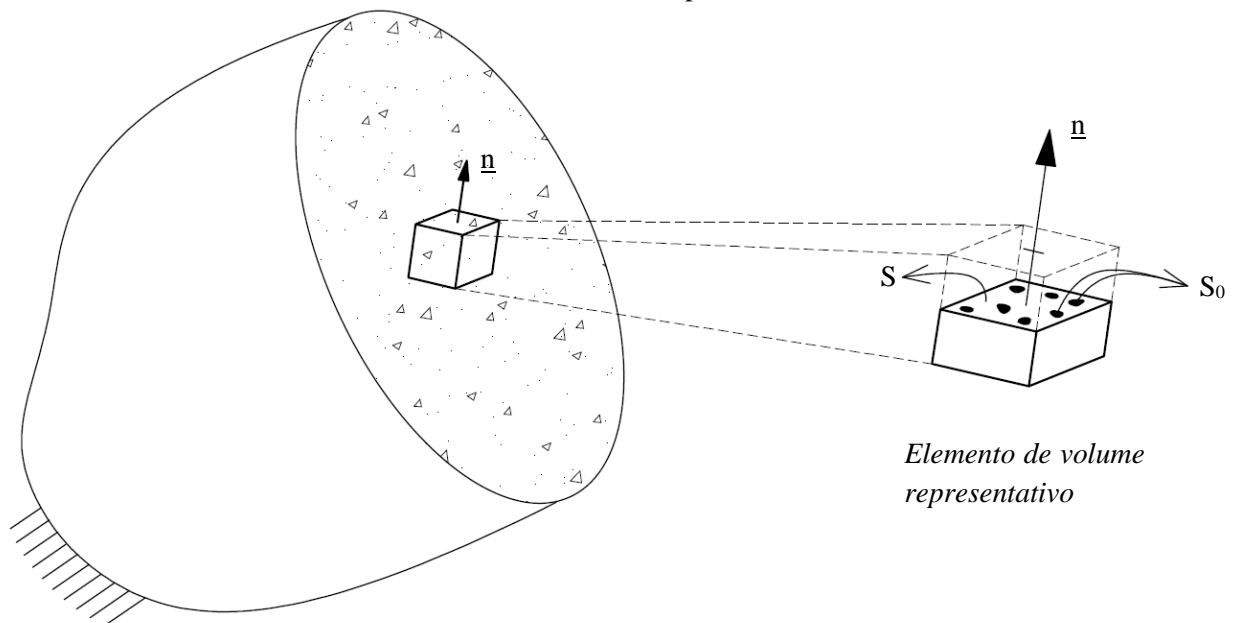
Quanto à formulação em específico de um modelo de dano isotrópico, é necessário envolver conceitos que levam em conta a variável unidimensional de dano, tensão efetiva e, por fim, a deformação equivalente. Estes serão apresentados adiante.

2.2 VARIÁVEL DE DANO EM MEIOS CONTÍNUOS

A princípio, considera-se um elemento sólido em torno de um ponto considerado, contendo uma determinada deterioração em sua microestrutura. Tal qual, é designado de elemento de volume representativo, já que possui dimensões suficientemente grandes para que se possa admitir a continuidade e a homogeneidade na distribuição dos efeitos nele contido e, ao mesmo tempo, pequeno para ser ponderado como um ponto material do contínuo. Com base nisso, é possível admitir-se continuidade para as funções representativas dos fenômenos que ocorrem no elemento.

Tomando S a área de uma das faces do elemento representativo, definida por um vetor normal de direção (\underline{n}), como mostra a Fig. (2.2) abaixo. As microfissuras e microcavidades que são a danificação apresentam direções e formas arbitrárias.

FIGURA 2.2 - Elemento de volume representativo danificado.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em relação ao plano onde a seção é avaliada, (\tilde{S}) é denominado por ser a parcela da área total efetiva, que de fato oferece resistência. A área então com defeitos é dada pela diferença entre a parcela total com a efetiva, podendo ser expressa pela Eq. (2.1).

$$S_0 = S - \tilde{S} \quad (2.1)$$

Sendo:

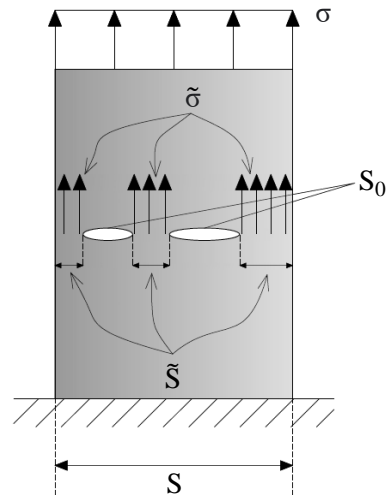
S_0 : parcela com defeitos (microfissuras ou cavidades);

S : parcela total;

\tilde{S} : parcela efetiva resistente.

Além de ser ilustrada pela Fig. (2.3) abaixo:

FIGURA 2.3 - Representação da área e tensão efetiva.



Fonte: Adaptado de Chaves (2009).

A medida local de dano, por definição, no que sugerem em Lemaitre (1984) e Lemaitre e Chaboche (1985 apud PITUBA, 1998), vale:

$$D_n = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{S_0}{S} \quad (2.2)$$

Tal variável de dano pode variar em valores contínuos no limite de intervalo ($0 \leq D_n \leq 1$). Quando ($D_n=0$) relaciona-se a uma área totalmente livre de defeitos, já ($D_n = 1$), corresponde a um estado de total danificação do material. Para estados intermediários, corresponde-se ainda na evolução do processo de deterioração material.

Quando um modelo de dano contém a variável (D_n) detendo de valores independentes da orientação do vetor normal (\underline{n}) e, representando uma distribuição de origem uniforme de microdefeitos e microfissuras, declara-se como dano isótropo, isto é, somente uma variável escalar representa o dano em um estado local de deterioração no elemento, conforme a equação seguinte:

$$D = D_n \quad \forall \underline{n} \quad (2.3)$$

2.2.1 Conceito de Tensão Efetiva

A tensão efetiva é determinada a partir da área efetiva, desta forma, sendo encarregada por resistir efetivamente ao carregamento. Considerando uma força axial (F) aplicada em um elemento de volume representativo, chega-se a uma tensão nominal definida pela equação abaixo:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.4)$$

Na presença de um dano isotrópico de medida escalar (D) a área resistente efetiva então assume:

$$\tilde{S} = S - S_0 = S(1-D) \quad (2.5)$$

Logo, da definição de tensão efetiva ($\tilde{\sigma}$) chega-se que:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} = \frac{\sigma}{(1-D)} \quad (2.6)$$

Sabe-se que, em caso particular:

$\tilde{\sigma} = \sigma$ Para o material íntegro;

$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$ Para o material totalmente danificado.

Nota-se então que a tensão efetiva consiste no aumento de tensão em razão da diminuição da área, na qual, esta redução é originada por meio ao processo de danificação.

Neste âmbito, ainda pode-se reproduzir o dano isotrópico para o caso tridimensional, sendo que, o tensor de tensões efetivas ($\underline{\tilde{\sigma}}$) pode ser apresentado da maneira abaixo:

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \frac{\underline{\sigma}}{1 - D} \quad (2.7)$$

Sabendo que a razão (S/\tilde{S}) é independente da orientação do versor normal, e que o operador $(1 - D)$ é aplicado em todos os componentes do tensor, chega-se na Eq. (2.7).

2.3 PRINCÍPIOS GERAIS DE EQUIVALÊNCIAS EM ANÁLISE UNIDIMENSIONAL

A idealização dos princípios descritos a seguir parte da capacidade de favorecerem a consideração de formulações constitutivas inerentes a meios contínuos com danificação presente, que por sua vez, são envolvidas a tensões e deformações nominais.

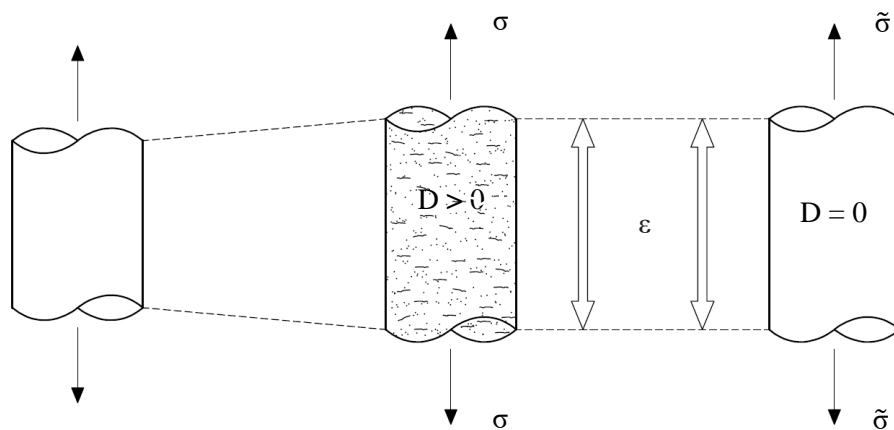
No âmbito de uma validação geral das expressões que envolvem a mecânica dos sólidos em meios contínuos, é imprescindível a incorporação dos princípios de equivalências. Considere um concreto dito virgem, ainda que nesta configuração, em sua microestrutura encontram-se vazios. As equivalências então introduzem uma homogeneização, responsável em transformar o material em íntegro equivalente e, assim, ser possível formular equações válidas para o meio contínuo.

2.3.1 Princípio de Equivalência em Deformação

Para a obtenção de um modelo que seja coerente com a consideração do meio contínuo, faz-se necessária a implementação de uma hipótese com respeito à deformação. Murakami (2012) relata que em um elemento unidimensional, a tensão usual (σ) aplicada em situação na qual há dano, é equivalente à tensão efetiva ($\tilde{\sigma}$) numa hipótese onde não se configura dano. Através disso, para um material danificado sujeito a uma tensão usual, sua deformação deverá ser igual a de um material hipoteticamente não danificado submetido por uma tensão efetiva.

A hipótese do princípio da deformação equivalente foi proposta originalmente por Lemaitre e Chaboche (1985). Segundo este princípio, as leis de comportamento de materiais danificados podem ser derivadas igualmente daquelas decorrentes em materiais sem dano, bastando efetuar a substituição da tensão nominal pela tensão efetiva. Podendo dessa forma ser introduzido em regimes elásticos, inelásticos e também viscoplásticos, já que por essa hipótese, todos esses comportamentos podem ser corrigidos da mesma maneira. Nota-se tal hipótese ilustrada na Fig. (2.4) seguinte:

FIGURA 2.4 - Hipótese de deformação equivalente.



Fonte: Adaptado de Lemaitre e Chaboche (1985).

Em regime elástico linear para a área íntegra, em consideração unidimensional, a deformação elástica segue:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}}{E} \quad (2.8)$$

Onde (E) é o módulo de Young do material totalmente sem deterioração.

A partir da definição de tensão efetiva, chega-se:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1 - D)E} \quad (2.9)$$

Colocando em igualdade as Equações descritas acima, Eq. (2.8) e Eq. (2.9), chega-se a uma relação que define o módulo de elasticidade penalizado, incluso em um meio contínuo de resposta equivalente ao meio danificado.

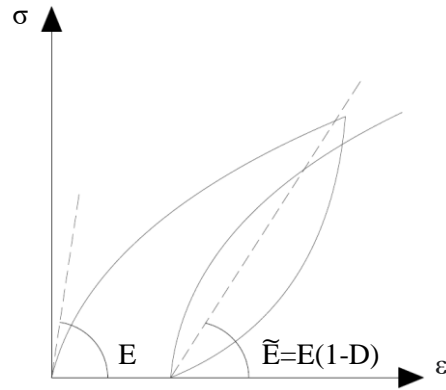
$$\tilde{E} = E(1 - D) \quad (2.10)$$

Após chegar nessa relação, nota-se a evidência da degradação das características mecânicas do material ocasionadas pelo dano estabelecido.

Colocando o parâmetro de dano em evidência, logo:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (2.11)$$

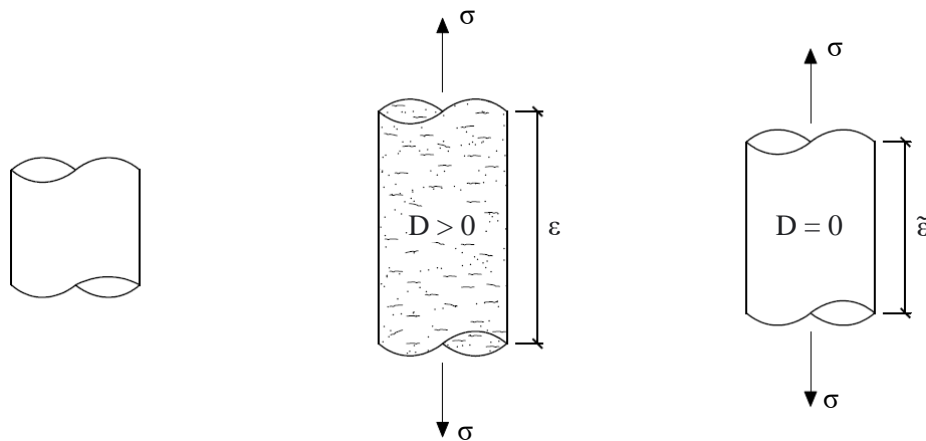
A Eq. (2.11) fornece uma maneira indireta de se determinar os valores da variável de dano em elementos elásticos por meio a análise de estimações do módulo de elasticidade, cujos são inerentes à ensaios com ciclos de carregamento e descarregamento em compressão, conforme a Fig. (2.5) seguinte:

FIGURA 2.5 - Curva tensão *versus* deformação do comportamento à compressão do concreto.

Fonte: Adaptado de Pituba (1998).

2.3.2 Princípio de Equivalência em Tensão

No mesmo intuito da hipótese de equivalência em deformação, é apropriado ainda associar a hipótese de equivalência de tensão. Lemaitre e Chaboche (1990) adotam que o estado de tensão incorporado a um meio contendo dano é alcançado através da lei de comportamento do material íntegro, em que a deformação nominal é representada pela deformação efetiva. Ou por outra, este princípio pondera que um elemento de volume representativo pode assumir os mesmos valores de tensão nominal, seja em quaisquer configurações de deterioração material, isto é, ausência ou não de dano. O que pode ser ilustrado na Fig. (2.6):

FIGURA 2.6 - Hipótese de equivalência em tensão.

Fonte: Adaptado de Pituba (2003).

Valendo o princípio então, pode-se tomar a igualdade das tensões nominal e efetiva:

$$\sigma = \tilde{\sigma} \quad (2.12)$$

As Eq. (2.13) e Eq. (2.14) são referentes as tensões de um material com dano e a um equivalente ao livre de defeitos, respectivamente:

$$\sigma = \varepsilon \tilde{E} \quad (2.13)$$

$$\sigma = \tilde{\varepsilon} E \quad (2.14)$$

Perante as duas últimas expressões descritas acima, além de se levar em conta o conceito de módulo de elasticidade longitudinal efetivo, chega-se a Eq. (2.15):

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon(1 - D) \quad (2.15)$$

Dessa maneira, em uma intensidade de dano (D) é possível obter a deformação que um material sem danificação está submetido referente aquela mesma tensão de um material deteriorado.

Em termos de tensão, com a nova hipótese de equivalência a expressão (2.14) pode ser deduzida pela forma:

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (2.16)$$

2.3.3 Princípio de Equivalência em Energia Elástica

Por fim, a alternativa de equivalência em energia elástica, onde as respostas constitutivas são analisadas pelas parcelas de meio íntegro como a de meio danificado. Assim:

$$\tilde{\varepsilon} = \sigma \varepsilon \quad (2.17)$$

As quantidades efetivas do meio relativas à parte íntegra envolvidas pela rigidez elástica são descritas da forma:

$$\tilde{\sigma} = E\tilde{\varepsilon} \quad (2.18)$$

Da Eq. (2.18) é possível relacionar diretamente o princípio substituindo-se pelas definições de deformação e tensão efetivas, com isso:

$$\frac{\sigma}{(1 - D)} = E \varepsilon(1 - D) \Rightarrow \sigma = (1 - D)^2 E \varepsilon \quad (2.19)$$

Ainda é possível deduzir uma relação quanto à rigidez elástica para um meio contínuo íntegro de resposta equivalente ao meio danificado:

$$\tilde{E} = E(1 - D)^2 \quad (2.20)$$

Assim como feito na Equação (2.11), conduz-se a variável de dano em evidência:

$$D = 1 - \left(\frac{E}{\tilde{E}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

Representando a degradação das características mecânicas do material decorrente do processo de danificação.

2.4 MODELO DE DANO DE PITUBA – VERSÃO UNIAXIAL (2003)

O concreto é um material frágil e compósito, que pode ser analisado em um modelo isótropo e unimodular, de tal modo que, localmente, as propriedades são as mesmas em todas as direções. Contudo, quando há o surgimento do processo de fissuração, o concreto apresenta níveis diferentes de anisotropia, ou seja, com tensores diferentes conforme a direção e, bimodulares, apresentando diferentes módulos de elasticidade em tração e em compressão.

O processo de danificação é o fator gerador da anisotropia no concreto, induzindo um comportamento bimodular no material. O modelo se baseia na aplicação do princípio da equivalência de energia. Quanto à sua modelagem da bimodularidade, é necessária a consideração de dois distintos tensores, um para a tração e outro para compressão, definindo assim o comportamento bimodular do material no período em que a danificação já foi iniciada.

Quanto ao critério responsável pela identificação do início de dano, é efetuada a comparação entre a energia de deformação elástica complementar (W_e^*), calculada localmente considerando-se o meio inicialmente íntegro, isótropo e puramente elástico, e um determinado valor de referência (Y_{0C}) ou (Y_{0T}), calculado a partir de ensaios uniaxiais de compressão ou de tração, respectivamente, conforme a expressão abaixo:

$$f_{T,C}(\sigma) = W_e^* - Y_{0T,0C} < 0 \quad (2.22)$$

Os valores de energia de referência (Y_{0C}) e (Y_{0T}) são parâmetros do modelo definidos pelas seguintes expressões:

$$Y_{0T} = \frac{\sigma_{0T}^2}{2E}; Y_{0C} = \frac{\sigma_{0C}^2}{2E} \quad (2.23)$$

Sendo (σ_{0T}) e (σ_{0C}) são as tensões dos limites elásticos determinados em regimes uniaxiais de tração e compressão, respectivamente. Em relação ao cálculo da energia de deformação elástica complementar (W_e^*), o mesmo é dado por:

$$W_e^* = \frac{\nu_0}{2E} \text{tr}^2(\sigma) + \frac{1 + \nu_0}{2E} \text{tr}(\sigma^2) \quad (2.24)$$

Onde o parâmetro (ν_0) é o coeficiente de Poisson do material íntegro.

Em relação à localização do plano de isotropia transversal após o processo de danificação ter se iniciado, para este trabalho é interessante observar que a tensão uniaxial é um exemplo particular, onde o plano de isotropia transversal é perpendicular à direção da tensão de tração. A mesma observação é válida para o caso de compressão uniaxial. Ambos os casos são utilizados neste trabalho.

Além disso, propõe-se dois tensores de dano que levam em consideração o aspecto bimodular do concreto, assim necessitando da concepção de um critério que é definido pelo hiperplano de função $g(\varepsilon, D)$, caracterizado por sua normal unitária $N(\|N\| = 1)$, dado abaixo:

$$g(\varepsilon, D_T, D_C) = N(D_T, D_C) \cdot \varepsilon^e \quad (2.25)$$

Em casos gerais de solicitações, a Eq. (2.25) modifica-se em:

$$g(\varepsilon, D_T, D_C) = N(D_T, D_C) \cdot \varepsilon^e = \gamma_1(D_1, D_2) \varepsilon_V^e + \gamma_2(D_1, D_2) \varepsilon_{11}^e \quad (2.26)$$

Onde (γ_1) e (γ_2) são estabelecidos pelas expressões seguintes:

$$\gamma_1(D_1, D_2) = \{1 + H(D_2)[(D_1) - 1]\} \eta(D_1) + \{1 + H(D_1)[H(D_2) - 1]\} (D_2) \quad (2.27)$$

$$\gamma_2(D_1, D_2) = D_1 + D_2 \quad (2.28)$$

E as funções de Heaveside utilizadas na relação acima é definida por:

$$H(D_i) = 1 \text{ para } D_i > 0 \text{ e } H(D_i) = 0 \text{ para } D_i = 0 \text{ com } i = 1,2 \quad (2.29)$$

Ainda de acordo com Pituba (2003), as funções $\eta(D_1)$ e $\eta(D_2)$ são estabelecidas, respectivamente, para os casos de tração, supondo que não haja danificação prévia de compressão, e de compressão, supondo que não tenha havido danificação prévia de tração, dadas respectivamente por:

$$\eta(D_1) = \frac{-D_1 + \sqrt{3 - 2D_1^2}}{3} \quad (2.30)$$

$$\eta(D_2) = \frac{-D_2 + \sqrt{3 - 2D_2^2}}{3} \quad (2.31)$$

Já para a evolução das variáveis de dano do modelo, as expressões propostas estão descritas na Eq. (2.32) onde as mesmas foram concebidas de modo a serem ajustadas de valores de curvas experimentais, tem-se:

$$D_i = 1 - \frac{1 - A_i}{A_i + e^{[B_i(Y_i - Y_{0i})]}} \quad (2.32)$$

É relatado que os parâmetros (A_i) , (B_i) e (Y_{0i}) , são parâmetros a serem determinados. O sub-índice (i) está relacionado à variável de dano escalar que está sendo calculada. Os parâmetros (Y_{0i}) são entendidos como limites iniciais para a ativação da danificação. Na versão uniaxial do modelo, a qual é foco do presente trabalho, a identificação paramétrica do modelo é realizada através de ensaios experimentais de tração uniaxial, na obtenção dos parâmetros, (B_1) e $(Y_{01}=Y_{0T})$, e de ensaios de compressão uniaxial para a identificação dos parâmetros (A_2) , (B_2) e $(Y_{02}=Y_{0C})$.

Por fim, admitindo a direção longitudinal compreendendo a direção ortogonal ao plano de isotropia transversal, tem-se as equações para a versão uniaxial do modelo de dano:

$$E(\varepsilon) = \begin{cases} E_C & \text{se } g(\varepsilon, D_T, D_C) < 0 \\ E_T & \text{se } g(\varepsilon, D_T, D_C) > 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

$$E_T = E(1 - D_1)^2(1 - D_2)^2 \quad (2.34)$$

$$E_C = E(1 - D_2)^2 \quad (2.35)$$

3 CRITÉRIOS NORMATIVOS

3.1 PROCEDIMENTO DA NBR 6118 (ABNT, 2014)

No contexto da proposta deste trabalho, faz-se necessária a investigação de respostas de estimativas quanto às deflexões sobre elementos estruturais lineares, em regime de serviço. O procedimento que leva em conta o cálculo dessas estimativas está sugerido no item 17.3.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), onde os resultados podem ser comparados com os valores-limites evidenciados pela tabela 13.3 da norma referente.

Para o modelo proposto do código brasileiro, é sinalizado que pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico linear. Além disso, consideram-se que os elementos estruturais estão submetidos à ação do momento fletor perante aos Estádio I, onde estima-se seção íntegra de concreto, tendo contribuição para a região tracionada, e o Estádio II, cuja o elemento encontra-se fissurado, assim desprezando a contribuição do concreto tracionado em equivalência ao equilíbrio da seção transversal.

A norma apresenta um critério para uma avaliação aproximada da estimativa dos deslocamentos excessivos em vigas de concreto armado. Este critério é empregado com a determinação de uma rigidez equivalente, prescrita pela expressão abaixo:

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (3.1)$$

Onde:

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto (m^4);

I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$ (m^4);

M_a é o momento fletor na seção crítica do vão considerado (kN.m);

M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade na utilização de barras lisas (kN.m);

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto (kN/m²).

O valor do módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) é obtido por meio do emprego do procedimento recomendado no item 8.2.8 da norma. Neste item é estabelecido que a obtenção do módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser por ensaios específicos, ou em ocasiões onde não forem efetuados, pode-se admitir o valor do módulo de elasticidade inicial pelas seguintes expressões:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa} \quad (3.3)$$

Sendo:

f_{ck} é a resistência característica a compressão do concreto (MPa).

Já para os valores de (α_E) são avaliados a partir do agregado graúdo utilizado:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

Dessa forma, através da obtenção de (E_{ci}), (E_{cs}) pode ser calculado:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (3.4)$$

Na qual, (α_i) vale:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (3.5)$$

Contudo, alternativamente pode empregar a Tab. (3.1) no cálculo do módulo de elasticidade secante no projeto estrutural. Tais valores são referentes àqueles apresentados na tabela 8.1 do item 8.2.8 da norma.

TABELA 3.1 - Valores estimados de (E_{ci}), (E_{cs}) e (α_i) em função da resistência característica à compressão do concreto, considerando o uso de granito como agregado graúdo.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci}	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs}	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,9	0,91	0,93	0,95	0,98	1	1

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Logo após determinado o valor do módulo de elasticidade secante do concreto, é necessária a obtenção do momento atuante (M_a), além do momento resistente (M_r). Pela NBR aqui estudada, o momento atuante é preconizado a partir da combinação do tipo quase-permanente para o Estado-Limite de Serviço, e é dado por:

$$M_a = \sum M_{Gi,k} + \sum \psi_2 M_{Qi,k} \quad (3.6)$$

Em que:

$M_{Gi,k}$ é o momento oriundo das cargas permanentes (kNm);

$M_{Qi,k}$ é o momento das ações variáveis (kNm);

ψ_2 é o fator de redução.

Já no item 17.3.1 é tratado sobre o momento de fissuração. Consta-se que nos estados-limites de serviço as estruturas se mantêm configuradas a trabalharem parcialmente no estágio I e no estágio II. A distinção desses dois comportamentos é baseada pelo momento de fissuração, ou por outra, é o momento que instiga a primeira fissura. Dado pela seguinte equação:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I}{y_t} \quad (3.7)$$

Onde:

I é o momento de Inércia da seção bruta do concreto (m^4);

y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada (m);

f_{ct} é a resistência a tração direta do concreto ($f_{ct,m}$ para estado-limite de deformação excessiva) (kN/m^2).

Compreende-se que (α) seja relacionado, na flexão, com a resistência à tração agregada com a resistência à tração direta. E pode assumir os valores: 1,2 para seções transversais T ou duplo T, valor igual 1,3 para seções I ou T invertido e 1,5 para àquelas do tipo retangulares.

Tendo ainda uma avaliação sobre a Eq. (3.7), nota-se que a norma brasileira considera desprezível o efeito favorável das armaduras da seção transversal de concreto armado, dessa forma, reduzindo o valor do momento de fissuração.

O cálculo na determinação do valor da resistência à tração do concreto (f_{ct}) é expresso por:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (3.8)$$

Determina-se, finalmente, as inércias no estágio I e II, ditos (I_c) e (I_{II}). Para uma seção retangular, com ausência de armadura de compressão, são preconizadas as expressões seguintes:

As equações que definem (I_c) e (I_{II}) são:

$$I_c = \frac{b_w h^3}{12} + b_w h \left(x_I - \frac{h}{2} \right)^2 + A_s (\alpha - 1) (x_I - d)^2 \quad (3.9)$$

Nos quais:

b_w é a largura da seção (cm);

h é a altura da seção (cm);

x_I é a posição da linha neutra no estádio I (cm);

A_s é a área de aço positiva da seção (cm²);

d é a altura útil da seção (cm).

$$I_{II} = b_w \frac{x_{II}^3}{3} + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 \quad (3.10)$$

Com:

x_{II} é a posição da linha neutra no estádio II (m).

Logo, a posição da linha neutra no estádio II é encontrada pela equação:

$$b_w \frac{x_{II}^2}{2} + \alpha_e A_s (x_{II} - d) = 0 \quad (3.11)$$

De posse das incógnitas determinadas até então, chega-se à inércia equivalente expressa pela Eq. (3.1). Esta ainda é multiplicada pelo módulo de elasticidade secante. Podendo, dessa forma, estimar a rigidez equivalente, e deve ser encontrando um valor inferior àquele precedido pela rigidez relativa da peça ao estádio I.

É oportuno substituir a rigidez equivalente estabelecida na equação de deslocamento em uma determinada viga analisada, no intuito em que o valor da flecha imediata seja obtido. Restando dessa maneira, obter a flecha diferida. Esta, por sua vez, é encontrada na norma através do subitem 17.3.2.1.2 e que, devido a fluência, é sugerido para seu cálculo:

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50 \rho'} \quad (3.12)$$

Onde:

ρ' é a taxa de armadura de compressão;

ξ é um coeficiente função do tempo.

A taxa de armadura de compressão vale:

$$\rho' = \frac{A_{s'}}{b_w d} \quad (3.13)$$

Sabendo:

$A_{s'}$ é a área de aço negativa da seção (cm²).

A variação do coeficiente em função do tempo é fornecida por:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (3.14)$$

E as incógnitas descritas na Eq. (3.14) são sugeridas pela NBR da seguinte maneira:

$$\begin{cases} \xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} & \text{para } t \leq 70 \text{ meses} \\ \xi(t) = 2 & \text{para } t > 70 \text{ meses} \end{cases} \quad (3.15)$$

Também é recomendado na possibilidade em optar, quanto à obtenção de (ξ) o emprego da tabela 17.1 da norma referente.

Por fim, compreende-se que a flecha total é determinada através do produto da flecha imediata por ($\alpha_f + 1$). Após efetuado todo o procedimento exposto até então, cabe efetivar uma comparação da flecha total calculada com os valores limites designados pela norma, estes encontrados na tabela 13.3. Contudo, cabe aqui ressaltar que o presente trabalho não abordou o caso de flechas diferidas no tempo nos cálculos apresentados nos Capítulos 4 e 5.

3.2 PROCEDIMENTO DO ACI 318R (2014)

O ACI (*American Concrete Institute*), em sua regulamentação (*Building Code Requirements for Structural Concrete*) ACI 318R (2014) faz a previsão do deslocamento em vigas de concreto armado através do método da inércia efetiva. A normativa faz o cálculo da flecha diferida separadamente da flecha imediata. Segundo o subitem 24.2.3.5 do ACI 318R (2014), a flecha diferida é calculada pelo produto de um coeficiente pela própria flecha imediata.

Para o cálculo da flecha imediata, faz-se necessário estipular a rigidez à flexão. Para tanto, designa-se, primeiro, a inércia efetiva. Tal inércia, assim como na norma brasileira, é dada pela inércia de Branson, em acordo com a Eq. (3.16), mudando apenas a notação dos termos.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (3.16)$$

Sendo:

I_e é o momento de inércia efetivo (m^4);

M_{cr} é o momento de fissuração do concreto (kNm);

M_a é o momento atuante na seção mais solicitada (kNm);

I_{cr} é o momento de inércia da peça no estágio II puro (m^4);

I_g é o momento de inércia da peça no estágio I (seção bruta ou homogeneizada) (m^4).

Para a determinação do valor de (I_e) é necessário que se conheça os termos da Eq. (3.16). Apesar da equação ser a mesma usada na norma brasileira, a obtenção de cada incógnita que a compõem se dá de forma diferente. Inicialmente tratando-se dos momentos, o (M_{cr}) é calculado pelo uso da Eq. (3.17).

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (3.17)$$

Onde:

f_r é o módulo de ruptura do concreto (inicialmente dado em (psi));

y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada (m).

Como observado, para esta normativa, não é levado em conta a geometria da viga para a estimativa do momento de fissuração, ou seja, pode-se utilizar a expressão admitindo-se que o coeficiente (α) seja constante e igual a 1,0.

Da mesma forma, há uma variação na determinação da resistência à tração do concreto, aqui denominado de módulo de ruptura (f_r). Faz-se o seu cálculo pelo subitem 19.2.3.1, que é expresso pela equação seguinte:

$$f_r = 7,5\lambda\sqrt{f_c'} \quad (3.18)$$

O valor de (λ) é dado de acordo com o item 19.2.4, onde é relacionado a massa específica do concreto estudado. Neste trabalho adotou-se ($\lambda = 1,0$), onde a classe de resistência do concreto das vigas aqui analisadas perfaz o limite de até 50 MPa.

Com relação ao momento atuante (M_a), a normativa não estabelece aplicação de coeficientes para as cargas no estado de verificação de deformação excessiva. No entanto Lazarini (2019), menciona que para o uso da norma pode-se usar combinações de carregamento de serviço fornecidas pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE).

Já para o cálculo de (I_{cr}), segundo Heringer (2018), a normativa usa o método da área equivalente, onde é considerado em toda a seção da peça, apenas áreas de concreto, ou seja, toda a área de aço é transformada em área equivalente de concreto. Dessa maneira (I_{cr}) é calculado conforme a Eq. (3.19).

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 + (n-1)A_s'(kd - d')^2 \quad (3.19)$$

Sendo:

b é a largura da base da seção (cm);

kd é a profundidade da linha neutra (cm);

n é a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal do aço e do concreto;

A_s é a área de aço para a região tracionada da seção (cm²);

d é a altura útil da seção (cm);

A_s' é a área de aço para a região comprimida da seção (cm²);

d' é a distância do centro de gravidade da armadura comprimida até a borda comprimida (cm).

A distância (kd) pode ser calculada pela Eq. (3.20):

$$kd = \left[\sqrt{2Bd \left(1 + \frac{rd'}{d} \right) + (1+r)^2} - (1+r) \right] / B \quad (3.20)$$

Em que (B) e (r) são dados pelas Equações (3.21) e (3.22), respectivamente:

$$B = \frac{b}{nA_s} \quad (3.21)$$

$$r = \frac{(n-1)A'_s}{nA_s} \quad (3.22)$$

Por fim, o valor da inércia no estágio I, isto é, (I_g) pode ser obtido por meio da Eq. (3.9).

Calculada a inércia efetiva, para se chegar ao valor da deformação, resta adoção do valor do módulo de elasticidade do concreto (E_c). O código americano, de acordo com seu subitem 24.2.3.4, não altera o valor do seu módulo em função da verificação de deformação excessiva, isto é, o módulo de elasticidade a ser usado nas equações de deslocamento em vigas é o mesmo usado para os demais casos de verificação e dimensionamento.

Discorrido o método aplicado para o cálculo da flecha imediata, pode-se efetuar o cálculo da flecha diferida. Seu valor é tido pela Eq. (3.23).

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50p'} \quad (3.23)$$

Na qual:

λ_{Δ} é o fator da flecha diferida;

p' é a taxa de armadura de compressão (Eq. (3.13));

ξ é um coeficiente em função do tempo (obtido da tabela 24.2.4.13 da norma referente).

O cálculo do módulo de elasticidade (E_c) também é efetuado de forma distinta da normativa brasileira. Para concretos convencionais, o ACI 318R (2014) apresenta uma expressão a partir da massa específica do concreto e de sua respectiva resistência à compressão, em que, para concretos de massa específica entre 2300 e 2500 kg/m³ é dada a equação, em (psi):

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \quad (3.24)$$

Sendo assim, o cálculo da flecha total de uma viga de concreto armado, segundo o segundo ACI 318R (2014) é dado pela soma da flecha imediata com o produto da flecha imediata pelo fator da flecha diferida. Mais uma vez, cabe aqui ressaltar que o presente trabalho não abordou o caso de flechas diferidas no tempo nos cálculos apresentados nos Capítulos 4 e 5.

4 MODELOS DE ESTIMATIVA DE DESLOCAMENTOS UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO

4.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA

Em 2012, no trabalho de Pituba, Delalibera e Rodrigues, uma contribuição para o aprimoramento do procedimento que leva em consideração a rigidez do concreto fissurado na estimativa de deslocamento de vigas de concreto armado foi apresentada. Considerava-se o caso de vigas submetidas a cargas de serviço, procedimento preconizado pela norma técnica brasileira, NBR 6118 (ABNT, 2007). Um modelo constitutivo de dano originalmente proposto em Pituba (2006), que considera anisotropia induzida e resposta elástica bimodular foi utilizado para simular o comportamento mecânico do concreto, enquanto um modelo elastoplástico padrão foi admitido para a armadura. Os autores descrevem o processo de perda de rigidez pela redução do módulo de elasticidade do concreto através do modelo de dano, enquanto que, pela norma é sugerida uma minimização do momento de inércia na seção estudada, de forma homogênea.

À vista disso, é desejável uma discussão sobre a consideração do comportamento não-linear do concreto nas estimativas de deslocamentos nesse tipo de estrutura e material. Para tanto, o procedimento previsto em norma e o modelo de dano foram utilizados em análises de vigas em concreto armado submetidas a cargas de peso próprio e acidentais, tendo o intuito assim, em verificar as diferenças entre as respostas numéricas apresentadas pelo modelo e àquelas obtidas pela norma técnica. Em seguida das aplicações acerca de exemplos de vigas com diferentes geometrias e áreas de armadura, utilizando o método estatístico ANOVA (Análise de Variância), foi possível obter as principais variáveis de influência no comportamento de deformabilidade das vigas. Ainda, após análises com o emprego das análises numéricas e da NBR, esta última fornecia valores de deslocamentos maiores.

Por esta circunstância encontrou-se a lacuna que gerou a motivação para a elaboração deste trabalho. A razão se deve pela forma abordada do procedimento preconizado na norma técnica em estimar uma rigidez média para toda a viga com base no modelo proposto por Branson (1968), cuja formulação leva a altos valores de deslocamento. Por outro lado, o modelo de dano degrada a rigidez de forma seletiva. Portanto, é possível levar em consideração a contribuição do concreto entre fissuras para resistir às tensões de tração naquela zona estudada. No estudo ainda é apresentado que além de tudo, é necessária a existência de certa reserva de segurança perante as estimativas dos deslocamentos.

Posteriormente, Pituba e Delalibera (2014) progrediram com a contribuição em particular ao tema. O intuito ainda era relacionado com a proposição de uma metodologia alternativa ao procedimento prescrito pela Norma Brasileira quanto ao cálculo de deslocamentos em estruturas de concreto armado. As premissas no que tange ao modelo de dano seguem ao do estudo anterior, nas quais o concreto é entendido como um material pertencente à categoria dos meios inicialmente isotrópicos que passam a

apresentar isotropia transversal e resposta bimodular induzidas pelo dano. Para análise dos resultados também foi realizado um tratamento estatístico seguindo a metodologia ANOVA.

Naquele estudo foram apresentados resultados das análises efetuadas em vigas com três diferentes seções transversais, vãos e configurações de armadura, porém, foi abordado apenas concreto com $f_{ck} = 30\text{MPa}$ e condições de vinculação de vigas biapoiadas e bi-engastadas. Além disso, naquela ocasião, por meio de análises estatísticas agregadas às numéricas, levaram à determinação de expressões no cálculo do momento de fissuração dependente do f_{ck} empregado. No entanto, estas expressões ainda necessitavam de uma investigação possuindo uma quantidade maior de parâmetros adotados ao problema.

Por influência disso, tais parâmetros foram levados em conta, de modo a ser possível obter expressão para o momento de fissuração que abrangem concretos ditos convencionais de classes C20 a C35. Não só isso, ainda uma discussão à frente de possíveis proposições de fórmulas para a estimativa de deslocamentos em estruturas de concreto armado foi apresentada.

Para tal, foi realizado um ensaio numérico computacional em 324 peças de concreto armado, sendo submetidas a carregamentos com variações proporcionais àqueles que ocasiona o momento de fissuração das seções. Assim, a partir dos resultados, pode-se enfatizar as ponderações relativas ao conservadorismo imposto pela normativa brasileira. Logo depois, foi possível obter expressões de (M_r) referentes para cada classe de concreto, relacionando também a inércia no estágio I de peça estrutural, dadas por:

$$M_r = 0,00004I_c + \beta_1 \quad \text{para concretos C20 e C25} \quad (4.1)$$

$$M_r = 0,00015I_c + \beta_2 \quad \text{para concretos C30 e C35} \quad (4.2)$$

Os valores das expressões acima possuem unidades de (kN.m) para (M_r) e (cm^4) para (I_c) . Já os parâmetros (β_1) e (β_2) , são coeficientes relacionados ao tipo de vinculação adotada para a viga, sendo eles expostos na tabela seguinte:

TABELA 4.1 - Valores dos coeficientes de vinculação.

Vinculação	β_1	β_2
biengastada/bi apoiada	8	4,5
engastada/engaste-apoio	6	2

Fonte: Adaptado de Pituba e Delalibera (2014).

Com este cenário, por esta proposta do cálculo do momento resistente é possível obter valores distintos de (M_r) daqueles alcançados pelo uso da equação sugerida pela NBR (vista no capítulo subsequente). Vale também a ressalva de que através do emprego da ferramenta estatística mencionada (ANOVA), observou-se que os principais parâmetros inclusos nas vigas, tendo base nas variações estabelecidas, são de forma precisa, àquelas encontradas na norma brasileira, onde são demonstradas as variáveis presentes para o cálculo de deflexão vertical de uma viga em concreto armado.

Para o processo evolutivo de fissuração, o módulo de elasticidade longitudinal é função de uma variável capaz de definir o estágio de fissuração da seção de concreto, esta designada como dano. Contudo, a danificação presente é dependente da deformação da peça estrutural e por tensões conexas. Estes estados de tensões e de deformações são intrínsecos ao grau de carregamento que é aplicado na estrutura, significando que para esse processo, existe uma relação não-linear. A expressão que fornece a penalização seletiva da rigidez da seção de concreto através da redução progressiva do módulo de elasticidade em conjunto com a danificação presente, foi aqui já apresentada pela Eq. (2.10).

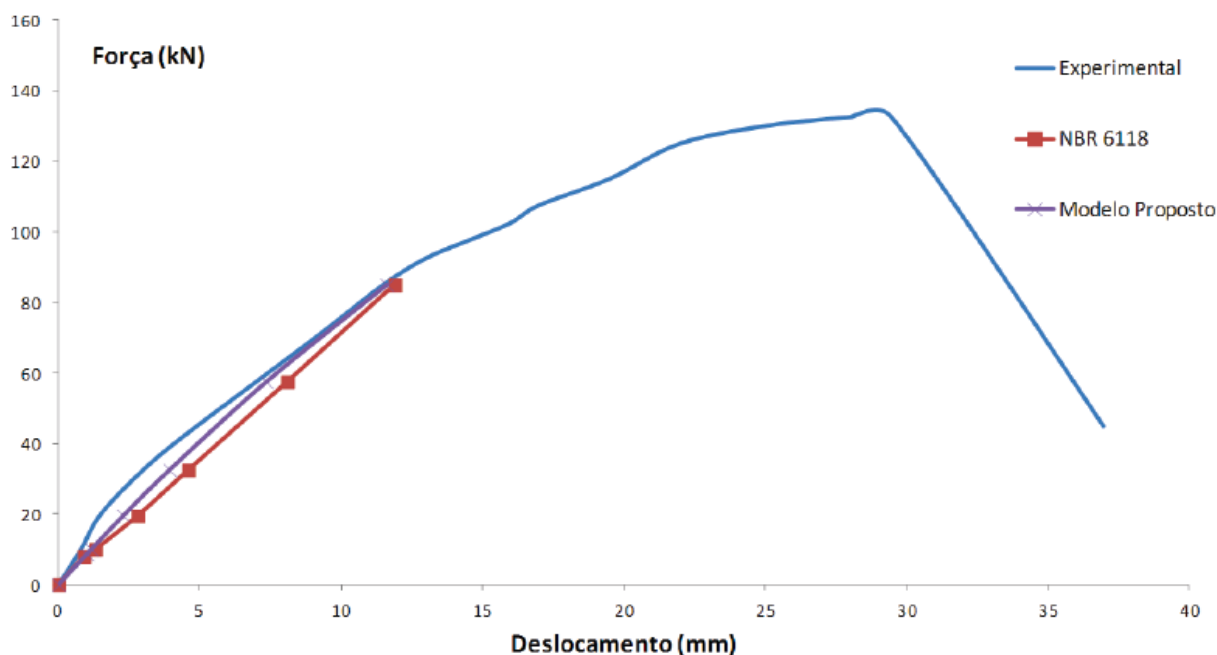
Na definição da variável representativa do dano (D), optou-se em propor uma equação com os parâmetros de importância obtidos pelo ANOVA. Levando à Eq. (4.3) seguinte:

$$D = 1 - \frac{M_r(1 - A)}{M_a} - \frac{A}{e^{\left[\frac{f_{ct}}{1000}(M_a - M_r)\right]}} \quad (4.3)$$

Sendo (M_a) e (M_r) os momentos atuantes e resistentes da viga em estudo, que são ainda obtidos em (kN.m) e, (f_{ct}) a resistência à tração média do concreto, cujo valor é obtido utilizando a Eq. (4.4) (advém do subitem 8.2.5 da NBR). Já para o parâmetro (A), consiste em um valor que, segundo os autores, se pensava ser dependente da classe do concreto que se deseja modelar.

$$f_{ct} = 0,21 f_{ck}^{2/3} \quad (4.4)$$

Na Fig. (4.1) é ilustrada a comparação dos resultados obtidos pela NBR, experimentalmente e pela metodologia proposta no trabalho:

FIGURA 4.1 - Comparação de resultados em viga de concreto armado.

Fonte: Adaptado de Pituba e Delalibera (2014).

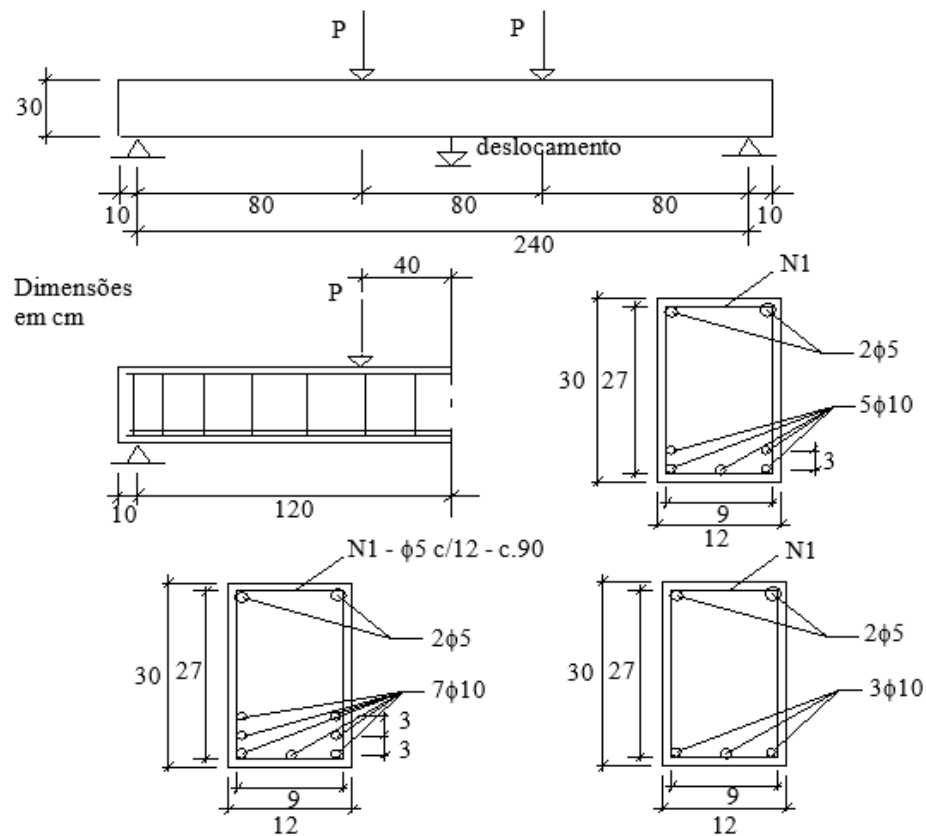
Como conclusões do trabalho, os autores expõem que, mesmo com a inserção de novos parâmetros ao problema, observa-se que o momento de fissuração não leva em conta a distribuição da armadura no elemento estrutural. Nota-se também que os deslocamentos determinados nas análises obtidas pelo modelo e pelo ensaio experimental são inferiores aos obtidos nas análises empregando a NBR, já que pela norma técnica é estimado um valor médio para a rigidez de toda a viga, tendo assim valores altos de deslocamentos. Em contrapartida, o modelo de dano pela forma em que se reduz a rigidez seletivamente pode-se atender a contribuição do concreto tracionado entre fissuras. Por fim, ainda é constatado que os trabalhos apresentam viabilidade quanto à metodologia proposta. Contudo, sua efetiva validação carecia de estudos dando importância às proposições adequadas do parâmetro (A), foco do presente trabalho, além da verificação da segurança no emprego da proposta em práticas da Engenharia Estrutural.

4.2 HIPÓTESES PARA O PARÂMETRO “A”

Diante do exposto até aqui, sendo o dano em vigas de concreto armado dado pela Eq. (4.3), observa-se a existência de um parâmetro (A) em sua formulação. Naquela ocasião, tal parâmetro foi correlacionado a partir de um valor que é dependente da classe do concreto que irá compor a viga, porém, verificou-se a necessidade de uma investigação com maior acurácia.

Oliveira (2017) analisou três vigas de concreto armado (ensaiadas em Álvares (1993)). As peças selecionadas possuem o mesmo vão, seção transversal, vinculação e mesmo carregamento, isto é, a única variação entre as mesmas se dá pela distribuição da armadura positiva. O que pode ser ilustrado na figura a seguir:

FIGURA 4.2 - Configuração das vigas propostas em Álvares (1993).



Fonte: Adaptado de Álvares (1993).

Em Oliveira (2017) foi realizada a simulação numérica dos cálculos dos deslocamentos verticais a partir do modelo proposto em Pituba e Delalibera (2014), como também pelo método preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). De posse dos valores obtidos, foi possível compará-los com os valores dos deslocamentos experimentalmente ensaiados.

Posto que não há uma formulação definida para o cálculo do parâmetro (A), Oliveira (2017) impôs uma variação arbitrária do parâmetro, em que o valor era estabelecido previamente para cada viga, seguindo o critério de aproximação com os dados reais equivalentes àqueles experimentais descritos em Álvares (1993). Por esse viés, notou-se que os valores de (A) demonstraram-se dependentes diretamente da quantidade de aço dimensionado para o momento máximo fletor de cada seção. Por consequência, de posse dos valores obtidos que representavam o estado real de dano de cada viga, foi proposto então o valor do parâmetro de forma constante, sendo ($A = 0,35$).

Contudo, a partir da verificação determinada em Oliveira (2017), orientou-se uma nova proposta de aperfeiçoamento diante uma proposição para o parâmetro (A), apresentado por Costa (2020). Buscou-se propor uma expressão para (A) de forma que o dano pudesse ser tomado como nulo, ou seja, determinar um valor do parâmetro em uma situação na qual a seção de um denominado tipo de concreto, com certo momento atuante ou resistente permanecesse totalmente livre de deterioração. Logo, da Eq. (4.3) e assumindo ($D = 0$), chegou-se:

$$A = \frac{e^{\frac{f_{ctm}}{1000}(M_a - M_r)}(M_a - M_r)}{M_a - e^{\frac{f_{ctm}}{1000}(M_a - M_r)}M_r} \quad (4.5)$$

A fundamentação teórica de toda a formulação baseou-se a partir da verificação em função de qual âmbito o parâmetro (A) era dependente. Pela ocasião e configuração em que foram ensaiadas as vigas em Álvares (1993), Costa (2020) afirma que todas estiveram no estágio III, no qual, é o estágio que a peça se apresenta no Estado Limite Último, como também é dimensionada a área de aço. Isto posto, a problemática dependente de (A) é obtido, com base a teoria de concreto armado, na consideração dos domínios de deformações das peças. Ou por outra, entende-se que por optar que tal parâmetro esteja relacionado aos domínios de deformação das vigas, este é dado por alguma relação entre as deformações sofridas pelo aço e concreto. Essa relação foi fundamentada pelo fato das vigas terem sido ensaiadas sob as mesmas condições, em que se distinguiram apenas na área de aço positiva, melhor dizendo, a única diferença estabelecida é pela forma de ruptura, sendo assim, função restrita da área de aço.

Em face dessas condições, surgiu então a hipótese em que (A) tenha relação com domínio de deformação e é um valor adimensional, tornando-a então como uma igualdade entre estas. Logo, submetendo a Eq. (4.5) nesta hipótese é encontrada a seguinte relação:

$$A = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{st}} \quad (4.6)$$

Nos quais:

x é a profundidade da linha neutra da seção (cm);

d é a altura útil da seção (cm);

ε_{cc} é a deformação do concreto;

ε_{st} é a deformação do aço.

Com os valores calculados pela Eq. (4.6) nas três vigas, e colocando-os em comparação com àqueles determinados em Oliveira (2017), chegou-se na conclusão que para as vigas que se encontraram no domínio de deformação 3, os valores são satisfatoriamente próximos, por outro lado, quando se dá uma configuração de domínio de deformação 2, há uma relevante discrepância, distanciando dessa

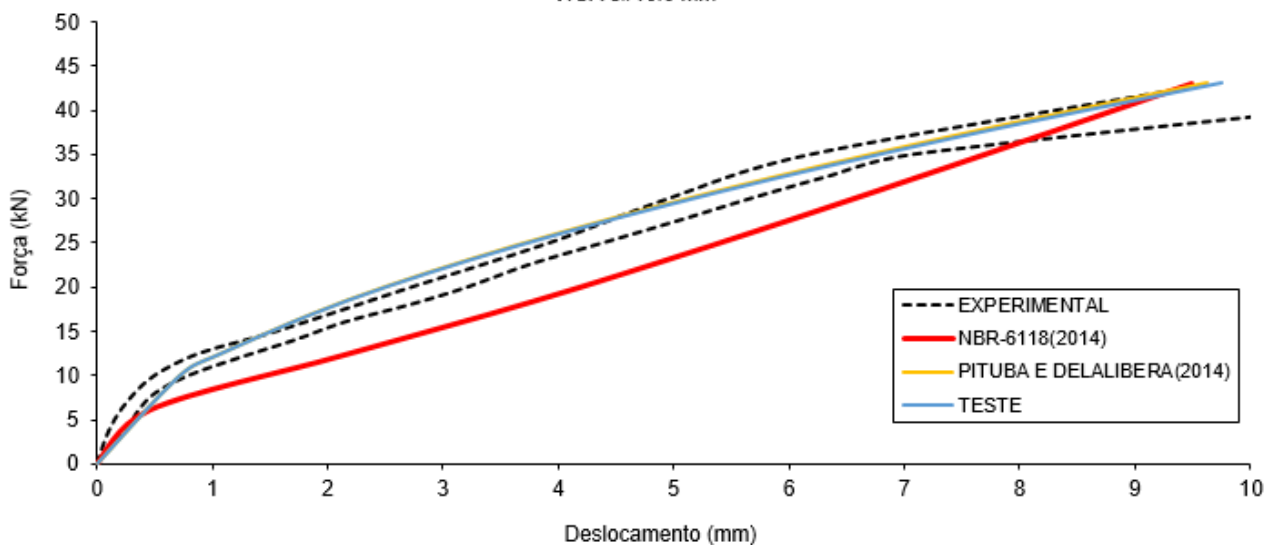
forma do valor real em que represente o dano da viga. Por isso, fez-se necessário tratamentos distintos para as configurações entre domínios 2 e 3.

Por este impasse, foi concebida uma nova formulação de (A) para as vigas no domínio de deformação 2, em que, propôs-se somar toda a deformação da peça e adotar o parâmetro como seu inverso, tendo assim a expressão abaixo:

$$A = \frac{1}{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{st}} \quad (4.7)$$

Com essa nova concepção, foi possível a obtenção de novos valores do parâmetro, sendo inferiores àqueles advindos com a Eq. (4.6), e mantendo ainda a relação entre as deformações das peças. O que pode ser ilustrado na Fig. (4.3), onde fora calculado o valor de ($A = 0,0796$) por meio à Eq. (4.7), tendo grande aproximação no valor constante estipulado em Oliveira (2017), a ver:

FIGURA 4.3 - Deslocamentos para viga $3\phi 10.0$ mm com $A = 0,0796$.
VIGA 3#10.0 mm



Fonte: Adaptado de Costa (2020).

Ressalta-se que a curva de cor azul, designada de TESTE, é equivalente à proposta discutida nesse momento. Como conclusão, foi verificado que a hipótese de aperfeiçoamento proposta por Costa (2020) diante à metodologia de Pituba e Delalibera (2014), através de uma nova roupagem para o parâmetro (A), é admissível de ser empregada ao cálculo de deflexão vertical de vigas de concreto armado, desde que seja nos limites dos domínios usuais recomendados no dimensionamento estrutural preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo estes, domínios 2 e 3. Vale reforçar ainda que diante dos cálculos particulares entre os domínios 2 e 3, devem ser aplicadas respectivamente as Eq. (4.7) e Eq. (4.6).

4.2.1 Validação da Proposta de Costa (2020)

4.2.1.1 Especificações Adotadas

Como já falado acima, em relação à metodologia de Costa (2020) faz-se necessário um número maior em aplicações de exemplos no intuito de se avaliar o comportamento da mesma. Sendo assim, possível identificar de forma acurada quais são suas potencialidades e limitações na aplicação do método.

Para tanto, foram levantadas em bibliografias cinquenta e quatro (54) vigas ensaiadas experimentalmente de trinta e um (31) trabalhos distintos. A concepção da pesquisa orientou-se na revisão de programas experimentais em que fosse possível apresentar alternâncias e maior variabilidade entre as amostras analisadas, tendo como base configurações particulares para cada caso em relação à: taxa de armadura, domínios de deformação do ELU, vãos, seções, F_{ck} , dentre outros.

É necessário destacar que em alguns trabalhos pesquisados, as informações não são todas encontradas de forma clara para efetuar o cálculo dos deslocamentos, no entanto, em determinadas pesquisas é fixada a resistência média de compressão do concreto (F_{cm}) e, nestas condições, o F_{ck} deverá ser determinado. Dessa forma, o método aqui adotado para o cálculo do F_{ck} é aquele preconizado no item 5.6 da NBR 12655 (ABNT, 2015), onde encontra-se a seguinte equação:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 S_d \quad (4.8)$$

Sendo:

f_{cmj} é a resistência média do concreto à compressão (MPa);

f_{ckj} é a resistência característica do concreto à compressão (MPa);

S_d é o desvio-padrão da dosagem (MPa).

A análise da determinação do F_{ck} é derivada dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples do concreto, sendo um processo calculado estatisticamente, envolvendo o conceito de distribuição normal ou curva de Gauss.

Em algumas pesquisas onde o desvio-padrão é desconhecido, faz-se necessário ainda aplicar uma estimativa para o seu valor, na qual é obtida pela tabela 6 da NBR 12655 (ABNT, 2015), apresentada logo abaixo:

TABELA 4.2 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão (Mpa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2015).

No subitem 5.6.3.1 desta norma é possível encontrar qual grupo de condição de preparo do concreto contemplam as vigas. Como são programas experimentais concebidos em laboratório, é induzido que se tenha um preparo e controle minimamente aceitável para as realizações dos ensaios, logo, definiu-se a condição A.

Na determinação dos domínios de deformação foi utilizado a relação de ductilidade (x/d) proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) no subitem 14.6.4.3. Por essa relação é possível identificar a capacidade de rotação dos elementos estruturais em função da posição da linha neutra no ELU. Para isso, deve-se então calcular o valor de (x), que é dado pelas equações:

$$M_d = 0,68 b_w x f_{cd}(d - 0,4x) \quad (4.9)$$

$$M_d = \sigma_{sd} A_s (d - 0,4x) \quad (4.10)$$

Sabendo que:

A_s área de aço da armadura tracionada;

f_{cd} resistência de cálculo do concreto à compressão;

σ_{sd} tensão de cálculo na armadura tracionada.

Estas duas últimas equações são decorrentes do processo de equilíbrio de momentos fletores resistentes internos na seção, sendo proporcionadas pelo concreto comprimido e pela armadura tracionada, respectivamente. Importante tornar relevante que este caso é apropriado quanto a um dimensionamento em particular de seções retangulares com armadura simples.

Igualando-se as expressões dos momentos internos de cálculo é possível obter o valor da linha neutra (LN), desta forma sendo capaz de identificar qual domínio a viga se encontra no ELU, logo:

$$x = \frac{\sigma_{sd} A_s}{0,68 b_w f_{cd}} \quad (4.11)$$

Diante dessas informações e levando em consideração as equações analisadas nos Capítulos 3 e 4, apresenta-se a Tab. (4.3), onde estão contempladas todas as especificidades necessárias para o cálculo dos deslocamentos verticais das vigas ensaiadas experimentalmente aqui levantadas. Logo:

TABELA 4.3 - Dados das vigas experimentalmente ensaiadas.

Autores	Viga	Vão (cm)	Seção (cm)	Fck (MPa)	Ecs (MPa)	Eci (MPa)	Es (MPa)	As (cm ²)	d (cm)	X2 (cm)	X3 (cm)	est (%)	ecc (%)	Domínio	“A”
Álvares (1993)	V31	240	12x30	30,80	27256,053	31079	210000	2,355	26,500	7,566	5,706	10,000	2,744	2	0,0785
	V51	240	12x30	30,80	27256,053	31079	210000	3,925	24,900	8,723	9,511	5,663	3,500	3	0,3820
	V71	240	12x30	30,80	27256,053	31079	210000	5,495	23,071	9,466	13,315	2,564	3,500	3	0,5777
Juvandes (1999)	B.2	150	7,5x15	21,70	22284,499	26087	200000	1,507	11,470	4,876	8,293	-	-	4	-
	B.4(1)	150	7,5x15	31,30	27722,349	31530	200000	1,507	11,470	4,496	5,677	3,570	3,500	3	0,4949
	B.4(2)	150	7,5x15	31,30	27722,349	31530	200000	1,507	11,470	4,496	5,677	3,570	3,500	3	0,4949
	B.6	150	7,5x15	28,70	26152,964	30001	200000	1,507	11,470	4,596	6,270	2,900	3,500	3	0,5466
	B.12	150	7,5x15	25,00	24150,000	28000	200000	1,507	11,470	4,734	7,198	-	-	4	-
	C.3	141	15x15	11,50	15738,396	18991	200000	2,453	11,245	5,067	12,735	-	-	5	-
Brixner (2017)	V01	240	14x25	34,00	28898,197	32653	210000	1,570	21,500	5,160	2,954	10,000	1,590	2	0,0863
Santos (2006)	REF1	400	15x40	34,80	29302,270	33035	188000	6,029	36,900	11,455	11,290	7,940	3,500	3	0,3060
	REF2	400	15x40	34,20	28999,442	32749	188000	12,300	35,100	14,720	21,473	2,220	3,500	3	0,6117
Araújo (2002)	VC-1R	400	15x45	23,80	23481,313	27320	189000	6,029	42,070	13,578	17,534	4,900	3,500	3	0,3595
Morais (1997)	VM-1R	400	15x45	27,80	29100,534	32845	210000	13,446	41,000	17,454	25,515	-	-	4	-
Beber (2003)	V1_A	253	15x30	30,00	26838,410	30672	210000	2,453	27,245	7,168	4,882	10,000	2,180	2	0,0821
Pinto (2001)	VPC2	192	12x30	18,00	20076,180	23759	210000	6,029	26,700	12,302	24,998	-	-	4	-
Vares (2019)	VT	150	10x15	42,25	33084,950	36508	210000	1,005	12,100	3,343	2,118	10,000	2,120	2	0,0825
Carelli (2002)	VC2	170	15x35	20,00	21287,370	25044	210000	6,029	31,200	12,257	17,998	2,570	3,500	3	0,5769
Beber (1999)	VT1	250	12x25	27,00	25242,910	29098	214800	1,570	22,370	6,032	4,340	10,000	2,410	2	0,0806
Fernandes (1996)	VREF	240	12x30	23,93	19659,940	23312	210000	2,355	27,500	8,844	10,142	5,990	3,500	3	0,3688
Oh (1992)	S1V0	180	12x18	33,70	28746,040	32509	200000	2,534	14,000	4,900	4,693	6,940	3,500	3	0,3352
	S2V0	180	12x18	33,70	28746,040	32509	200000	3,972	14,000	5,817	7,356	-	-	4	-

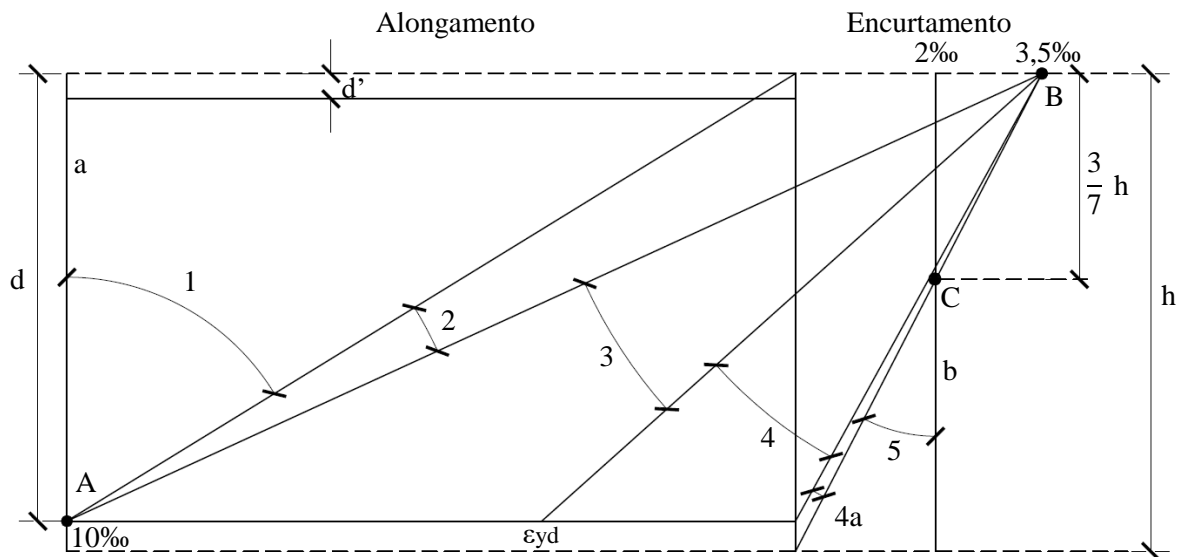
Autores	Viga	Vão (cm)	Seção (cm)	Fck (MPa)	Ecs (MPa)	Eci (MPa)	Es (MPa)	As (cm²)	d (cm)	X2 (cm)	X3 (cm)	est (%)	ecc (%)	Domínio	“A”
Barros et al (2007)	R1	90	12x17	37,60	30698,660	34339	200000	0,392	13,650	2,208	1,227	10,000	0,990	2	0,0910
	R2	90	12x17	37,60	30698,660	34339	200000	0,663	13,575	2,787	1,649	10,000	1,380	2	0,0879
	R3	90	12x17	37,60	30698,660	34339	200000	0,995	13,575	3,327	2,474	10,000	2,230	2	0,0818
Leonhardt e Walther (1963)	ET1	300	30x35	24,20	23705,360	27548	195000	12,560	22,870	9,571	15,494	-	-	4	-
	OA1	366	31x56	22,50	22744,680	26563	217870	25,880	46,400	20,394	33,230	-	-	4	-
	OA2	547	31x56	23,70	23425,120	27262	217870	32,350	47,040	22,033	39,434	-	-	4	-
Bresler e Scordelis (1962)	OA3	640	31x56	37,60	30698,660	34339	217870	38,810	46,400	21,173	29,819	-	-	4	-
	A1	366	31x56	24,10	23649,460	27491	217870	25,880	46,400	20,110	31,023	-	-	4	-
	A2	547	31x56	24,30	23761,190	27605	217870	32,350	47,040	21,924	38,460	-	-	4	-
	A3	640	31x56	35,00	29402,920	33130	217870	38,810	46,400	21,496	32,035	-	-	4	-
	B1	366	23x56	24,80	24039,260	27888	217870	25,880	46,400	22,211	40,634	-	-	4	-
	B2	547	23x56	23,20	23142,980	26973	217870	25,880	46,400	22,501	43,437	-	-	4	-
	B3	640	23x56	38,70	31240,280	34837	217870	32,350	47,040	22,114	32,549	-	-	4	-
	C1	366	15,5x56	29,60	26628,410	30467	205460	12,940	46,400	18,842	25,259	2,930	3,500	3	0,5444
	C2	547	15,5x56	23,80	23481,310	27320	205460	25,880	46,400	25,004	62,830	-	-	5	-
C3	640	15,5x56	35,00	29402,920	33130	205460	25,880	46,400	23,245	42,724	-	-	4	-	
Nora (2018)	VT1	130	7x14	28,71	26158,270	30006	210000	1,005	12,180	4,270	4,479	6,020	3,500	3	0,3677
Almeida (2016)	VRF	200	14x29	30,00	26838,410	30672	200100	3,680	25,875	8,300	7,847	8,040	3,500	3	0,3033
Pivatto (2020)	VR	200	15x25	17,5	21696,190	25714	210000	2,453	20,745	6,622	6,681	7,370	3,500	3	0,3220
Branco (2016)	VREF	200	12x25	40,70	33364,750	37000	248000	2,450	22,900	6,956	4,493	10,000	2,440	2	0,0804
Ribeiro et al (2013)	V2	180	20x30	25,00	24150,000	28000	210000	2,355	26,500	6,414	4,218	10,000	1,890	2	0,0840
Lim e Oh (1999)	SOV0	130	10x18	27,40	25458,520	29313	200000	4,019	12,200	6,170	13,136	-	-	5	-

Autores	Viga	Vão (cm)	Seção (cm)	Fck (MPa)	Ecs (MPa)	Eci (MPa)	Es (MPa)	As (cm²)	d (cm)	X2 (cm)	X3 (cm)	εst (‰)	εcc (‰)	Domínio	“A”
Fugiyama <i>et al</i> (2021)	VREF2	120	12,5x23,5	27,98	25769,510	29622	210000	2,453	20,625	6,679	6,281	7,990	3,500	3	0,3045
Kovács e Balázs (2003)	A1	180	10x15	31,00	27359,990	31179	200000	4,019	11,200	5,690	11,611	-	-	5	-
Deghenhard <i>et al</i> (2016)	A1	180	12x20	25,00	24150,000	28000	210000	1,570	16,500	5,094	4,687	8,820	3,500	3	0,2840
Santos e Fanton (2020)	VT	120	7x14	32,42	28092,800	31886	210000	1,005	9,997	3,682	3,966	5,320	3,500	3	0,3967
Oliveira e Vargas (2021)	VC1	200	12x30	25,00	24150,000	28000	210000	1,570	26,500	6,710	4,687	10,000	2,150	2	0,0823
Fernandes e Vargas (2015)	A1	190	12x20	20,00	21287,370	25044	210000	1,570	16,500	5,356	5,856	6,360	3,500	3	0,3551
Deghenhard e Vargas (2013)	VT	180	12x20	25,00	24150,000	28000	210000	1,570	16,500	5,094	4,687	8,820	3,500	3	0,2840
Silva <i>et al</i> (2018)	V0	250	15x30	21,00	21877,220	25662	210000	3,680	26,745	9,113	10,463	5,450	3,500	3	0,3912
Vieira <i>et al</i> (2016)	VA_R	240	12x24,5	30,00	26838,410	30672	217000	2,453	20,875	6,817	6,102	8,470	3,500	3	0,2923
	VB_R	240	12x24,5	30,00	26838,410	30672	217000	1,570	21,000	5,691	3,906	10,000	2,280	2	0,0814

Fonte: Autoria própria (2022).

Os parâmetros (X_2) e (X_3) são referentes a profundidade da linha neutra nos Estádios II e III, respectivamente. Já a ruptura do material no ELU é caracterizada através das deformações específicas do aço e do concreto, no momento em que a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios. Estas são especificadas por (ϵ_{st}) para o alongamento do aço e (ϵ_{cc}) para o encurtamento do concreto, ambas apresentadas na Tab. (4.3). E o cálculo parte da análise do diagrama indicado na figura 17.1 do item 17.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), no qual é apresentado abaixo:

FIGURA 4.4 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal.



Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Por meio do diagrama acima determinam-se as deformações específicas do aço e concreto empregando de forma geral a expressão:

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{st}} = \frac{x_3}{d - x_3} \quad (4.12)$$

Observa-se ainda que o valor de (X_3) é àquela determinado pela Eq. (4.11). Por conseguinte, parte-se para a análise dos resultados com base à aplicação do método proposto por Costa (2020) nas vigas tratadas na Tab. (4.3).

Nesta etapa da análise foram calculados os deslocamentos em vigas nas quais se apresentavam nos domínios 2 e 3, em razão que a proposta se sucedeu através apenas destes domínios. Com isso, investigou-se o comportamento da resposta em diferentes tipos de parâmetros encontrados nas vigas, podendo dessa forma, como dito anteriormente, identificar quais as limitações de sua aplicação, posto que, em Costa (2020) os cálculos foram baseados em um número reduzido de amostras experimentais.

4.2.1.2 Resultados das Análises Numéricas

Em princípio verificou-se os domínios das vigas, já que toda a metodologia desta proposição foi fundamentada para os domínios 2 e 3. Por esse viés, vigas com respostas no ELU superiores ao domínio 3, não abrangeram as análises das estimativas de deslocamentos. Com isso, foi possível aplicar a metodologia em 34 vigas, porém de modo a não deixar o texto exaustivo ao leitor, apenas 6 exemplos serão apresentados detalhadamente neste capítulo como exemplos das análises realizadas. Importante ainda destacar, que todos os parâmetros iniciais e aqueles calculados estão retratados na Tab. (4.3). Além disso, os resultados obtidos para o restante das vigas estão demonstrados no Anexo A, ou para mais detalhes específicos das vigas, como detalhamentos das armaduras e método de ensaio aplicado, podem ser encontrados nas respectivas bibliografias.

Com o objetivo de se avaliar os resultados das análises, fez-se necessário uma classificação das respostas, podendo ser denominadas em “Muito Ruim” até “Muito Bom”. Para tanto, inicialmente foram adotados alguns critérios para se realizar esta avaliação, sendo:

- De forma geral, primeiramente analisou-se os valores dos deslocamentos, fazendo-se uma comparação entre aqueles provenientes dos ensaios experimentais com os calculados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e do modelo proposto;
- Com o mesmo intuito, gráficos (Força *versus* Deslocamento) foram gerados. Estes contemplando os três tipos de resultados, podendo avaliar e comparar visualmente o comportamento das respostas das curvas;
- O método de aplicação das cargas dos ensaios experimentais, foi aquele exercido até o regime de ruptura das vigas. Contudo, como o modelo proposto foi elaborado a partir da teoria da MDC, onde prevalece o processo de fissuração, é necessário aplicar um critério para encontrar o regime de serviço a partir dos carregamentos derivados dos respectivos ensaios. Para tal, aplica-se o valor de 40% da carga de ruína para o limite do carregamento de serviço. Porcentagem essa determinada a partir do cálculo do inverso dos coeficientes de segurança preconizados pela NBR 8681 (ABNT, 2004). Sendo considerado (1,40 para as ações, 1,40 para o concreto e 1,15 para o aço) chega-se em: $\left(\frac{1}{1,40 \times 1,40 \times 1,15} = 0,44\right)$, assim, neste trabalho adotou-se o valor de 40%;

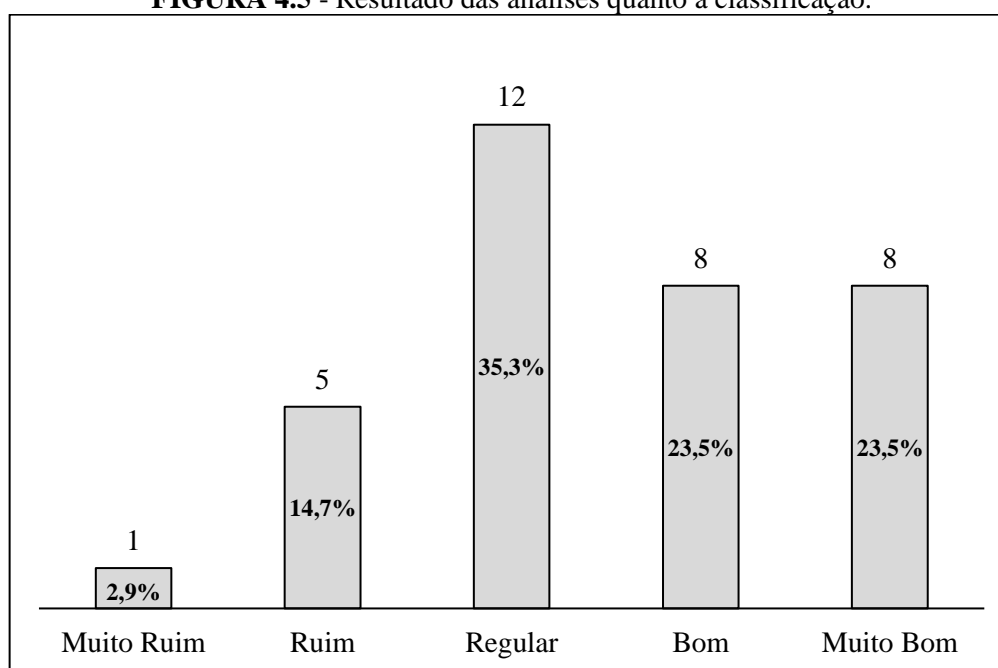
Em seguida, partindo de fato para o protocolo geral adotado nas análises, apresenta-se os critérios qualitativos através da tabela seguinte:

TABELA 4.4 - Critérios qualitativos adotados na análise.

Muito Ruim	são as vigas que apresentaram deslocamentos do modelo muito discrepantes do experimental e da norma, podendo-se observar graficamente
Ruim	referente as vigas que se obteve uma resposta ainda distante de deslocamentos, porém seguindo a mesma tendência apresentada nas curvas experimentais
Regular	vigas que se comportaram com os resultados de deslocamentos próximos aos do experimental, entretanto, não satisfaz o conceito físico entre as profundidades das linhas neutras dos estádios I, II e III
Bom	tiveram como característica deslocamentos próximos aos do ensaio e ao mesmo tempo valores mais rígidos que o da norma. E também apresentaram as alturas das linhas neutras entre estádios com valores apropriados a um estado real de carregamento
Muito Bom	são as vigas que tiveram uma resposta muito próxima ao experimental, linhas neutras também exatas, e o cálculo da norma mais conservador em relação aos outros dois, tendo assim o resultado ideal do que foi proposto ao modelo

Fonte: Autoria própria (2022).

Logo, feitas as análises e levando em consideração os critérios adotados acima, o resultado pode ser demonstrado através do gráfico da figura abaixo:

FIGURA 4.5 - Resultado das análises quanto à classificação.

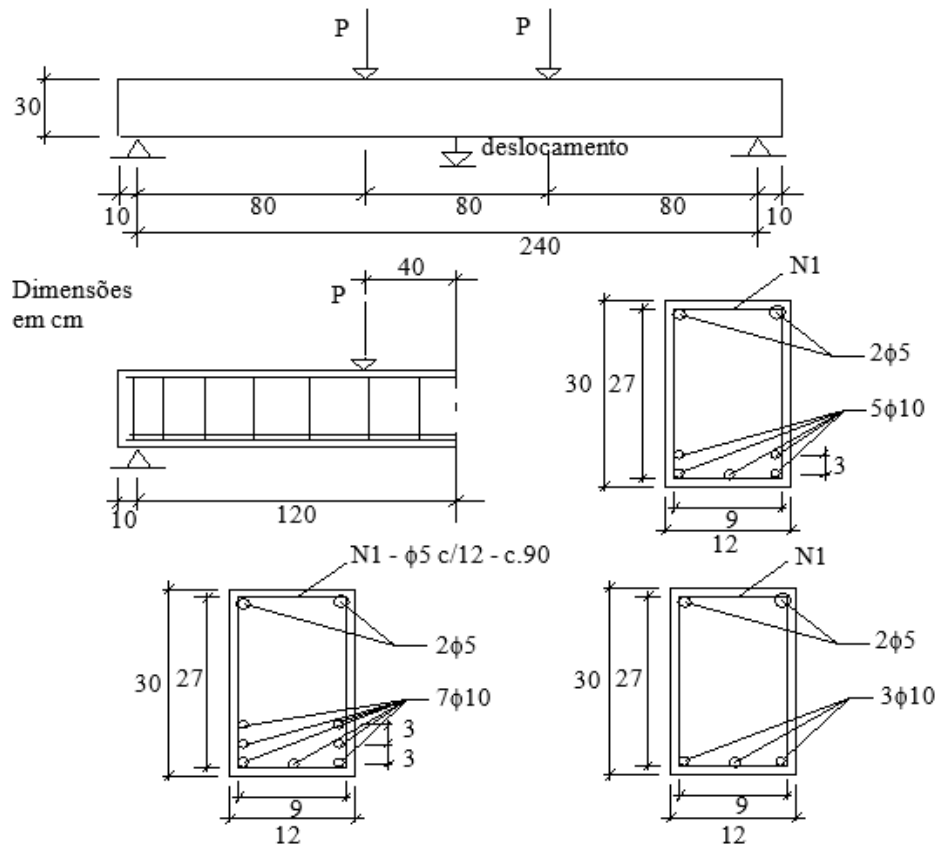
Fonte: Autoria própria (2022).

Em uma perspectiva mais abrangente, nota-se que o modelo calculado seguindo os princípios praticados, foi obtida uma resposta com números suficientemente bons, tendo em vista que há uma concentração da porcentagem quando somada (82,3%) entre Regular, Bom e Muito Bom.

Sendo assim, apresenta-se a análise comparativa dos resultados de flechas imediatas, que são ilustrados por meio de gráficos com curvas carga-flecha. Nos tópicos a seguir estarão indicados cada modelo experimental utilizado para a comparação. Necessário ainda ressaltar que todos os exemplos serão demonstrados dois gráficos, um em regime de ruptura proveniente do próprio ensaio, e o segundo, uma visualização ampliada do regime de serviço para àquele caso em específico.

4.2.1.2.1 Modelo Experimental de Álvares (1993)

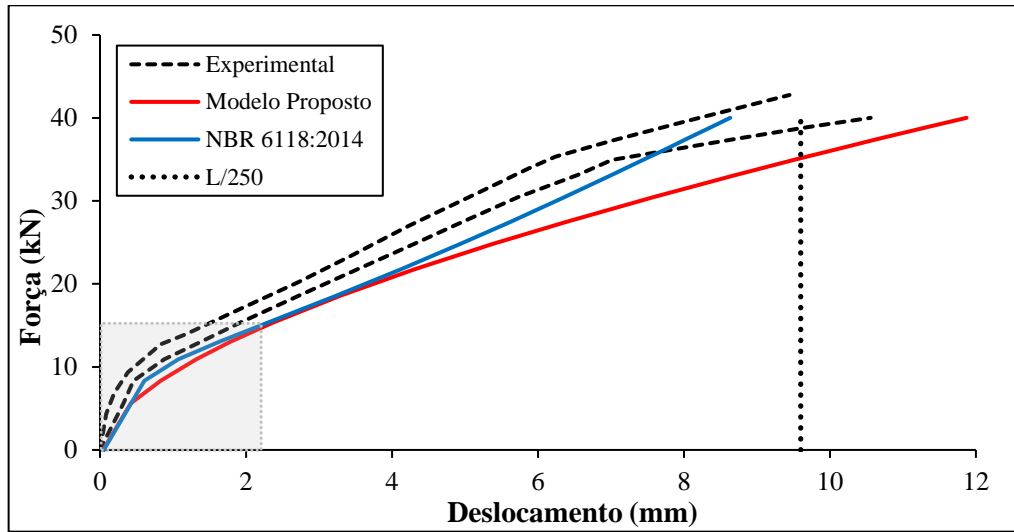
O autor investigou por meio de ensaios experimentais o comportamento de vigas de concreto armado reforçado à flexão. Em seu trabalho foram confeccionadas três tipos vigas que se distinguem somente no detalhamento da armadura longitudinal, conforme exibido abaixo:

FIGURA 4.6 - Geometria e detalhamento das vigas V31, V51 e V71 de Álvares (1993).

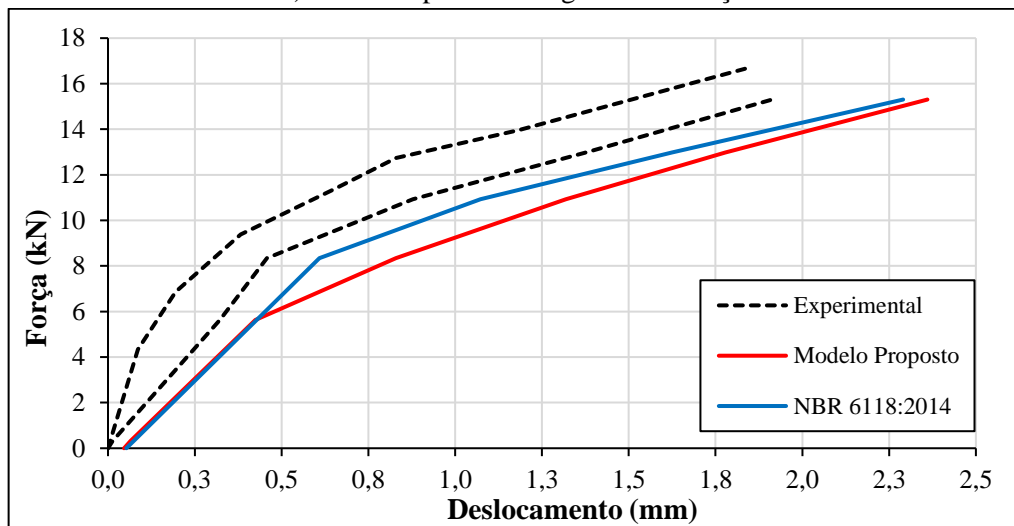
Também são expressas as curvas dos resultados numéricos, que podem ser analisadas nas Fig. (4.7), Fig. (4.8) e Fig. (4.9), logo:

FIGURA 4.7 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V31 de Álvares (1993).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



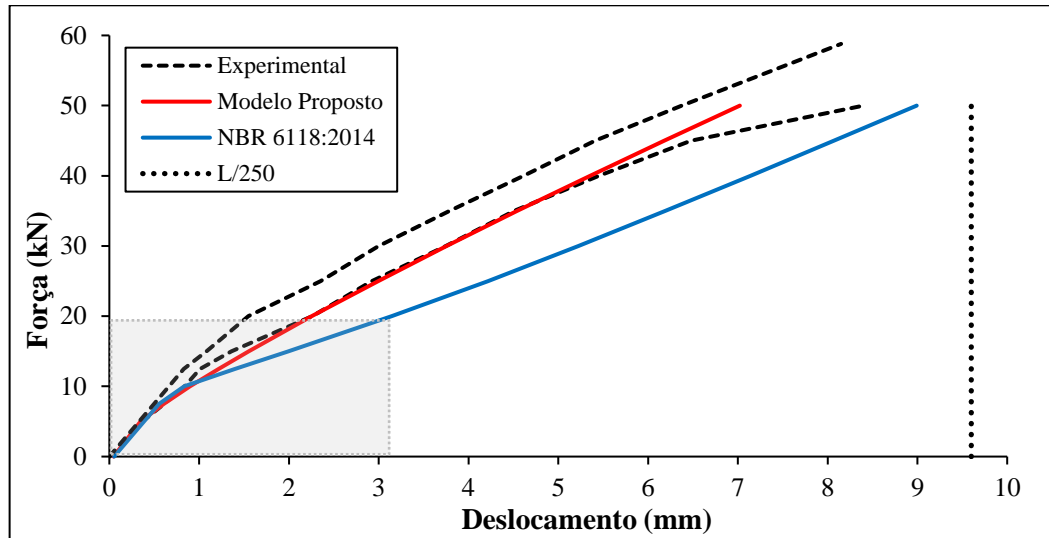
b) Visão ampliada do regime de serviço.



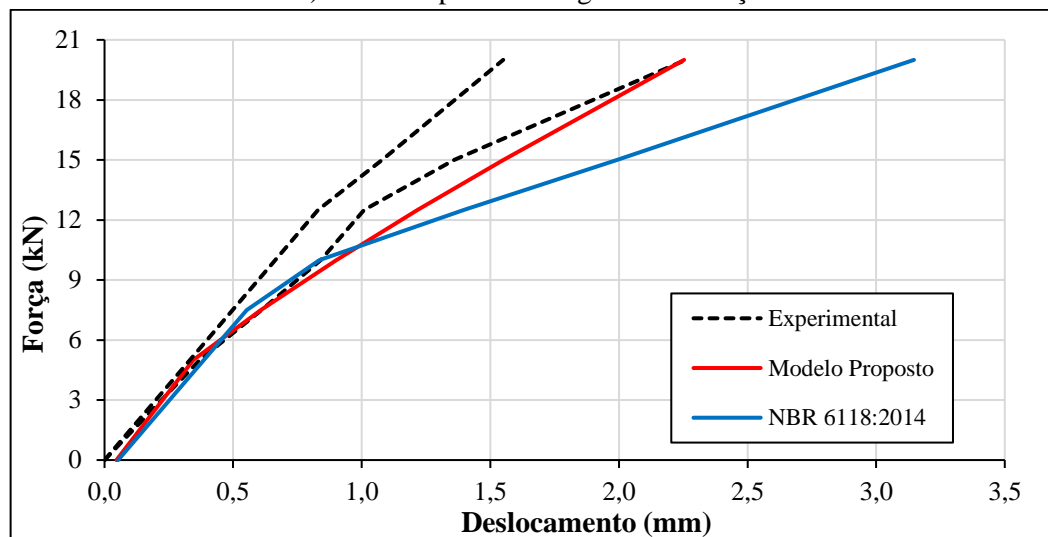
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 4.8 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V51 de Álvares (1993).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



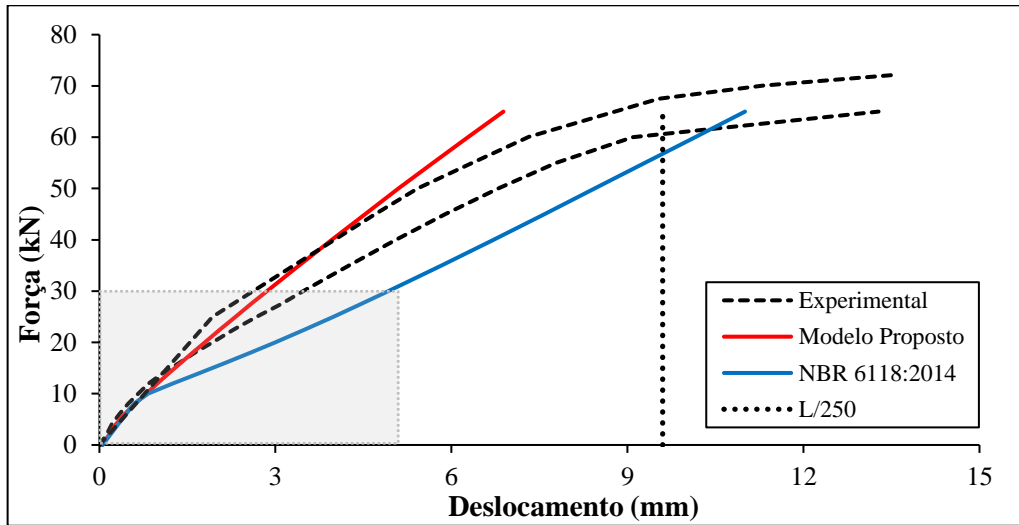
b) Visão ampliada do regime de serviço.



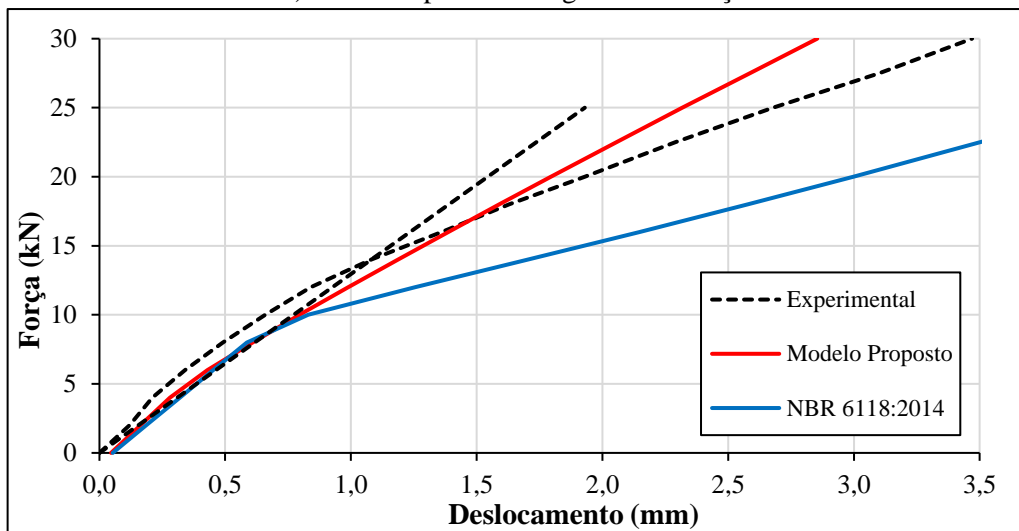
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 4.9 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V71 de Álvares (1993).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

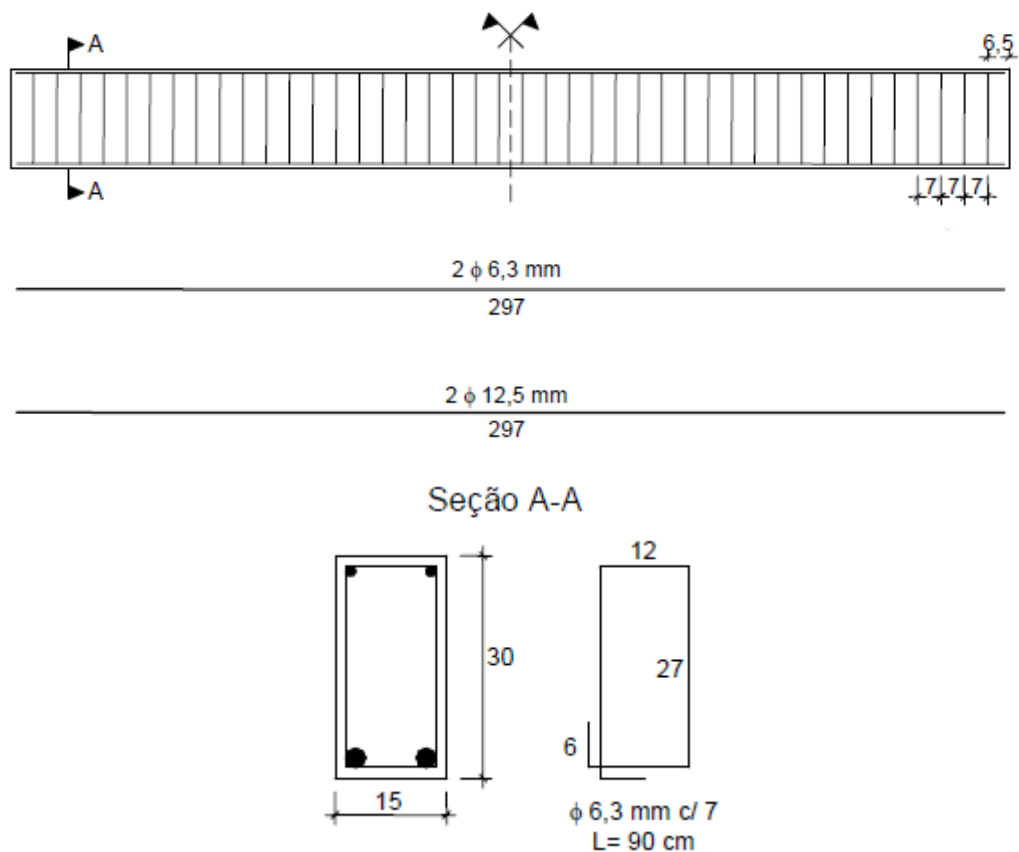
No primeiro exemplo, V31, nota-se deslocamentos do modelo relativamente próximos ao do experimental, porém apresentando menor rigidez quando comparado ao da norma, além da curva possuir comportamento muito similar ao do ensaio.

Já para as vigas V51 e V71, pode-se verificar a proximidade entre os resultados do modelo em estudo com os resultados experimentais, principalmente onde contemplam faixas de cargas decorrentes das verificações em serviço. Também tornando perceptível certo conservadorismo da norma em relação com os demais. Destaca-se ainda que nestas duas vigas, diferentemente da V31, as linhas neutras do estágio III, não foram constatadas como exatas, o que já pode-se fazer uma alusão com o aumento gradual da área de aço longitudinal.

4.2.1.2.2 Modelo Experimental de Beber (2003)

Beber (2003) fez um estudo experimental para estudar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. Seu programa experimental foi dividido em dois grupos, o primeiro, composto por quatorze vigas, reforçadas à flexão e o segundo, contemplado por trinta vigas, reforçadas ao cisalhamento. Para os dois grupos foram empregados dois tipos de sistema de reforço, sendo laminados pré-fabricados e mantas flexíveis pré-impregnadas. Dentre as vigas ensaiadas, a denominada V1_A não recebeu qualquer tipo de reforço e pode ser utilizada nesta análise. A Fig. (4.10) apresenta a geometria da viga:

FIGURA 4.10 - Geometria e detalhamento da viga V1_A de Beber (2003).

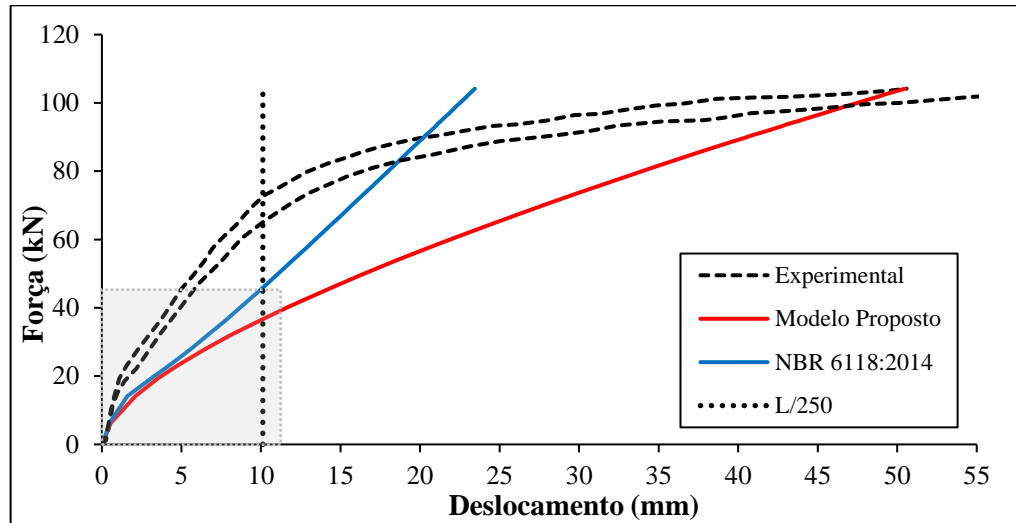


Fonte: Adaptado de Beber (2003). (dimensões em cm)

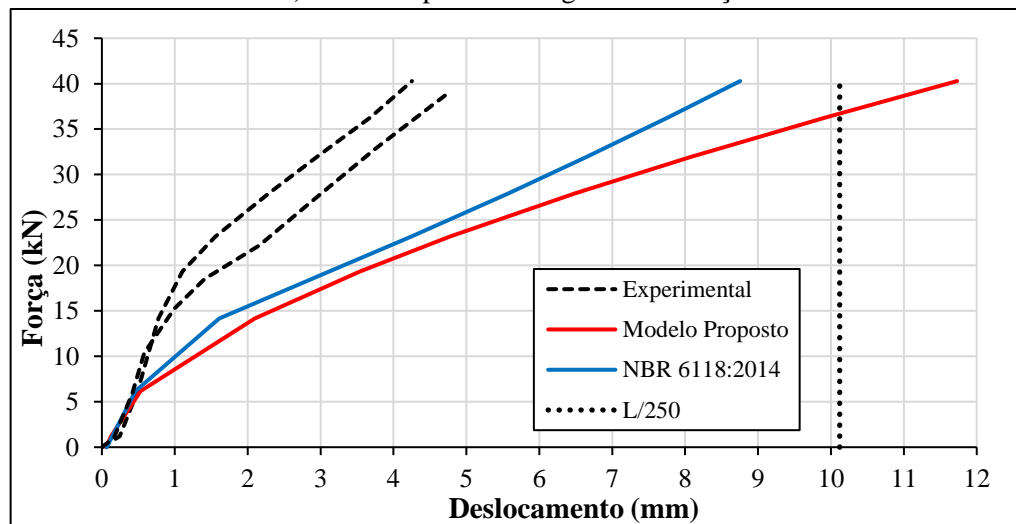
O ensaio foi realizado com ciclos de carregamento até a ruína das vigas, este caracterizado ainda por ensaio de quatro pontos, com cargas nos terços dos vãos. Isto posto, os resultados calculados das análises numéricas estão ilustrados nas figuras seguintes.

FIGURA 4.11 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V1_A de Beber (2003).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

Neste caso, nota-se que os deslocamentos do modelo tenderam a apresentar valores superiores quando comparados aos da NBR e experimental, desde o estágio I. O comportamento da resposta demonstrou menor rigidez, assim como no exemplo anterior (V31 de Álvares (1993)), nas quais se perfazem no domínio 2.

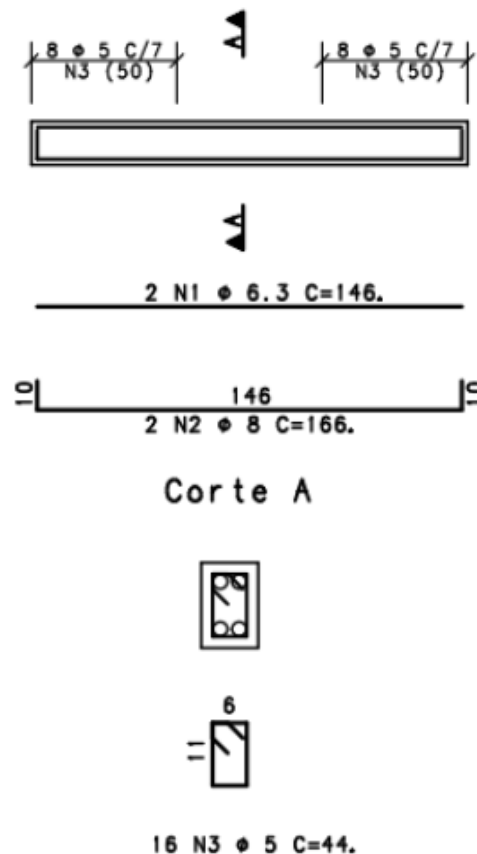
Ao aplicar a carga que alcance o deslocamento máximo permitido ($L/250$) pela NBR 6118 (ABNT, 2014), fica evidente a disparidade entre os valores de resistência apresentados nos gráficos acima, já que para o modelo atingir 10,12 mm é necessária uma carga por volta de 36,50 kN, quanto ao experimental aproximadamente 71,00 kN, tendo assim uma redução de 51,4%. Logo, em correspondência ao gráfico da Fig. (4.5), neste caso foi considerado como um resultado muito ruim.

4.2.1.2.3 Modelo Experimental de Vares (2019)

O trabalho de Vares (2019) trata do uso de barras de fibra de vidro como alternativa de reforço à flexão simples. Em seu programa experimental foram concretadas quatro vigas, nas quais, uma aplicou-se barras de aço convencionais, denominada então como viga testemunho. Esta, por sua vez, utilizada aqui nas análises e apresentada na Fig. (4.12).

Por questões tecnológicas, para a execução das vigas procurou-se utilizar dimensões próximas às utilizadas nos laboratórios de sua pesquisa, na tentativa de reaproveitar ou efetuar modificações mínimas nas formas que eram disponibilizadas no próprio. Logo, segundo a autora, as vigas de seu trabalho representam aproximadamente a metade das dimensões de vigas reais utilizadas em obras, onde a seção média é 15x30 cm².

FIGURA 4.12 - Geometria e detalhamento da viga VT de Vares (2019).

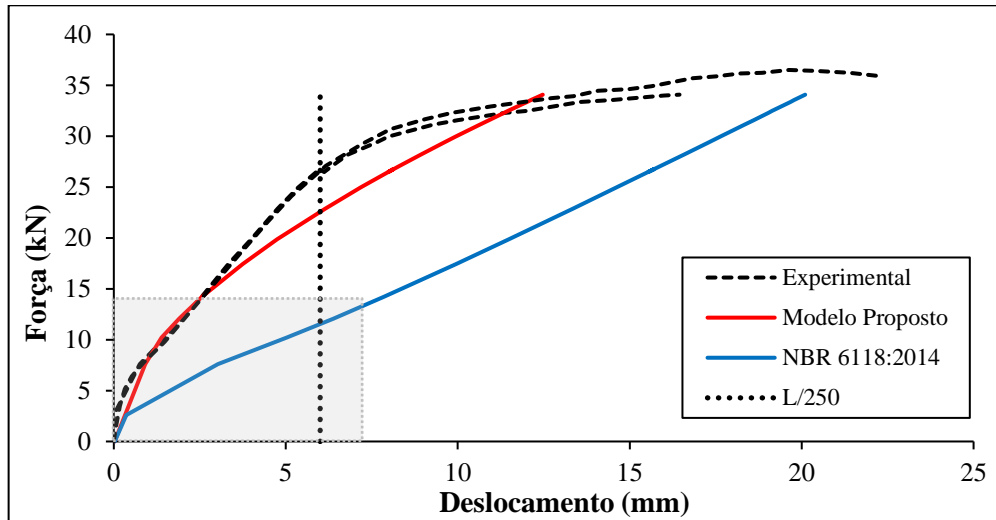


Fonte: Adaptado de Beber (2003). (dimensões em cm)

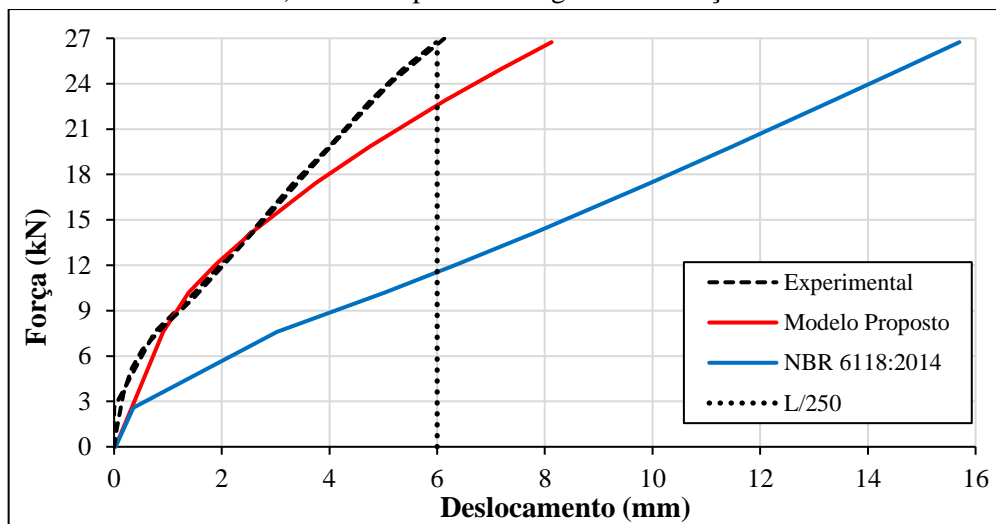
Assim como no exemplo anterior, o ensaio foi realizado a partir de carregamentos até que se alcance a ruptura das vigas, tendo as cargas aplicadas nos terços dos vãos. Os resultados numéricos calculados para as três séries foram:

FIGURA 4.13 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Vares (2019).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



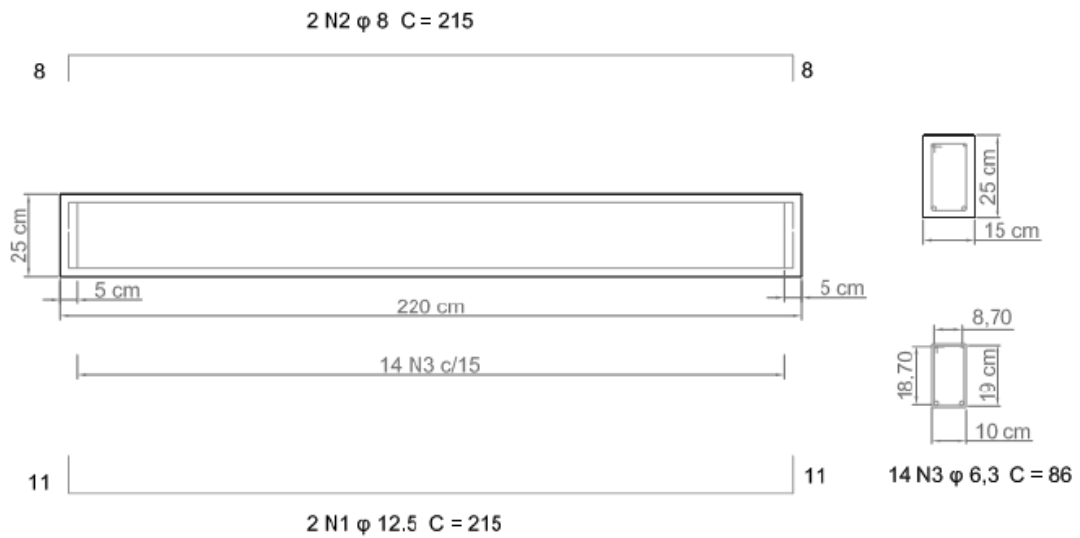
Fonte: Autoria própria (2022).

Percebe-se uma boa aproximação da resposta do modelo quando comparado ao resultado experimental, principalmente na região do carregamento de serviço. No início da fissuração, quando se inicia o estágio II os resultados se tornam ainda mais similares. Também é de se levar em conta a resposta da norma que se apresentou mais conservadora, tendo valores superiores de flechas para menores carregamentos em relação aos outros dois resultados. Para este exemplo, na faixa de serviço pode-se traçar um paralelo para as três curvas sobre o parâmetro de deslocamento máximo permitido ($L/250$). Assim sendo, e tendo como referência ($L/250 = 6$ mm), foram obtidos, aproximadamente, os valores 26,74 kN, 22,00 kN e 11,50 kN para o experimental, modelo e norma, respectivamente. Notando assim a grande diminuição do carregamento para que se alcance tal valor limite de flecha, redução essa equivalente a 52%. O bom resultado deste exemplo pode assimilar ao fato de ser uma viga com dimensões reduzidas, tendo um vão consideravelmente pequeno e sobretudo um F_{ck} alto.

4.2.1.2.4 Modelo Experimental de Pivatto (2020)

O trabalho de Pivatto (2020) teve como objetivo analisar a eficiência da aplicação de reforço estrutural utilizando compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC), tendo uma avaliação do aumento da resistência de vigas biapoiadas de concreto armado. Foram elaboradas quinze vigas ao todo, seguindo o detalhamento da Fig. (4.14).

FIGURA 4.14 - Geometria e detalhamento da viga VT de Pivatto (2020).

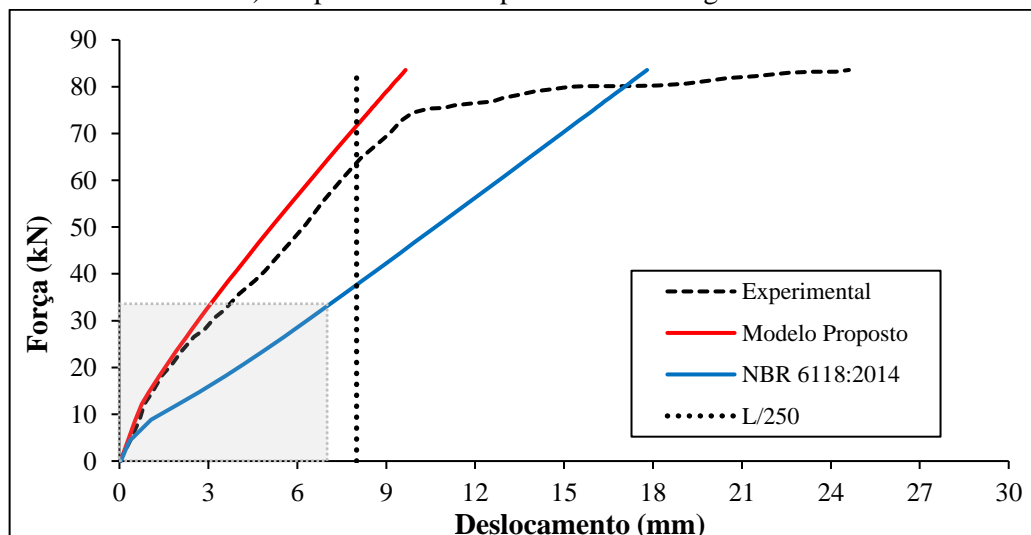


Fonte: Adaptado de Beber (2003).

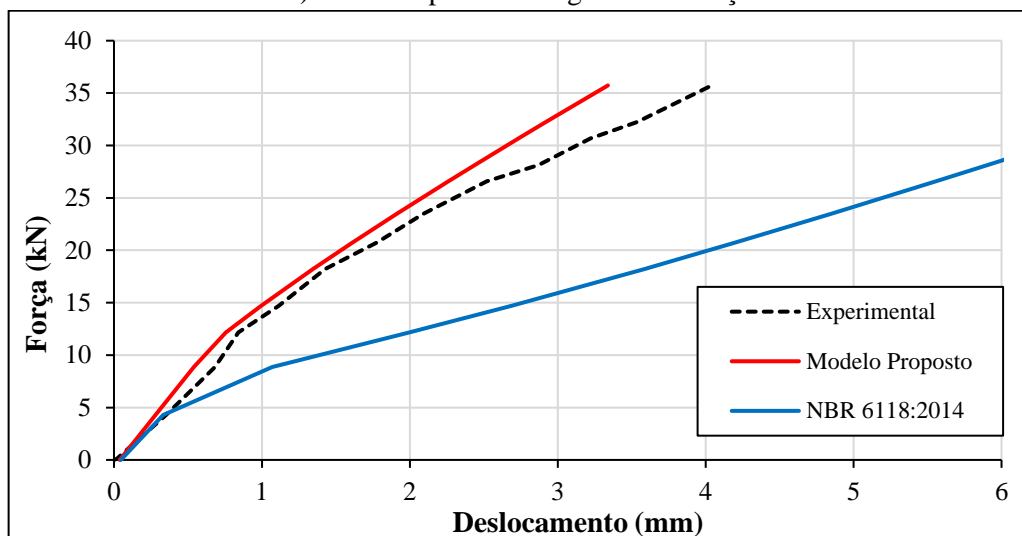
Realizou-se uma previsão de cargas de ruptura das vigas em laboratório pelo método de ensaio de flexão a quatro pontos, dessa forma chegou-se:

FIGURA 4.15 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Pivatto (2020).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.

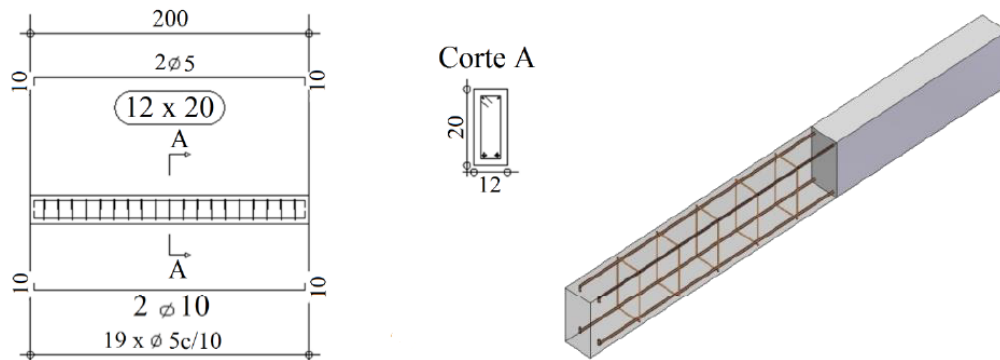


Fonte: Autoria própria (2022).

Bons resultados foram encontrados neste exemplo. Verifica-se que os deslocamentos calculados possuem valores próximos ao se comparar com os provenientes do modelo com o experimental. Também, assim como no exemplo anterior, valores estes sendo mais evidentes no regime de serviço. A viga se apresenta no domínio 3, tendo dessa forma uma resposta relativamente mais rígida com àquelas de domínio 2. Não se chegou em um valor correto quanto a linha neutra do estágio III, situação essa podendo ser avaliada em função do valor do F_{ck} ser baixo (C20). Observa-se ainda que as curvas apresentaram tendências similares, mesmo com a da norma indicando rigidez inferior.

4.2.1.2.5 Modelo Experimental de Deghenhard e Vargas (2013)

Deghenhard e Vargas (2013) elaboraram um estudo que pudesse avaliar experimentalmente a capacidade portante de vigas de concreto armado com reforço metálico, aplicando chapas de aço SAE 1020 de diferentes espessuras. Foram moldadas doze vigas em quatro grupos distintos (A, B, C e D), possuindo três vigas em cada. As vigas relativas ao grupo A são as de referência, não recebendo o reforço metálico, logo, podendo ser empregado aqui nas análises. A ilustração abaixo exhibe o detalhamento das armações empregadas:

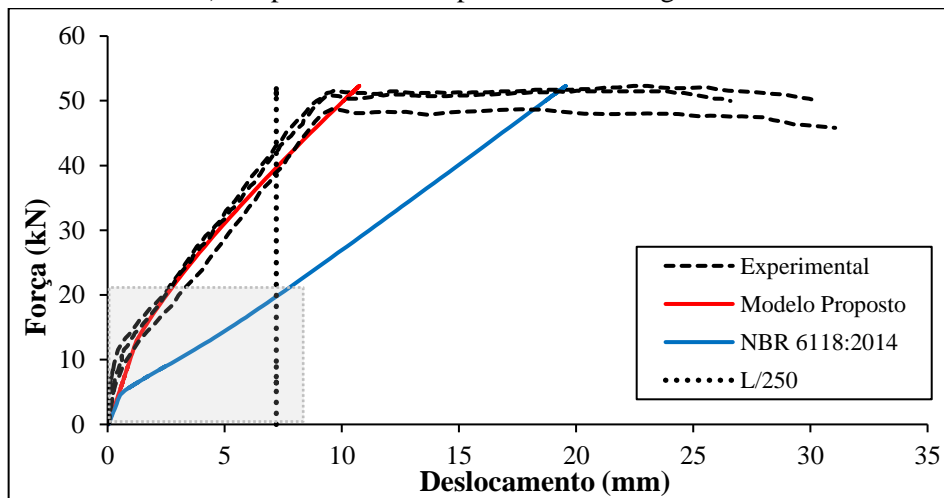
FIGURA 4.16 - Geometria e detalhamento da viga VT de Deghenhard e Vargas (2013).

Fonte: Adaptado de Beber (2003). (dimensões em cm)

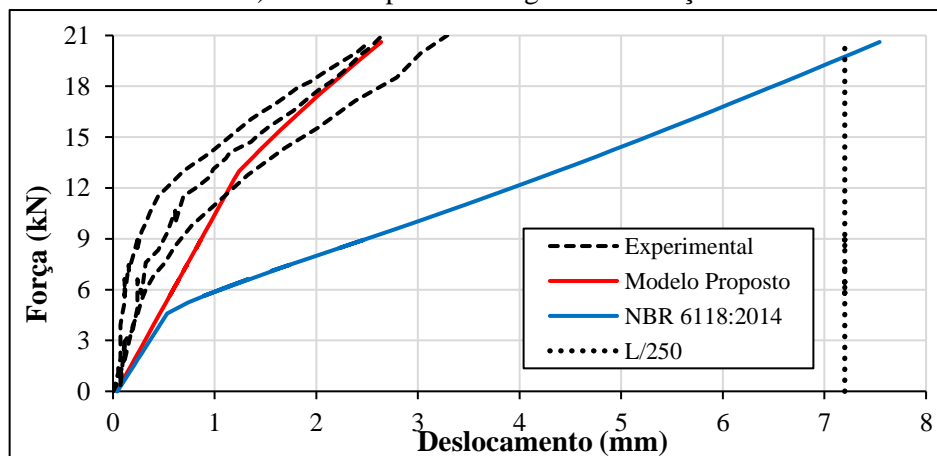
O ensaio caracterizado de flexão em quatro pontos, realizado sob um pórtico metálico tendo a aplicação da carga por meio de um cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN, transferidos para os terços médios da viga. Os resultados das análises foram:

FIGURA 4.17 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VT de Deghenhard e Vargas (2013).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



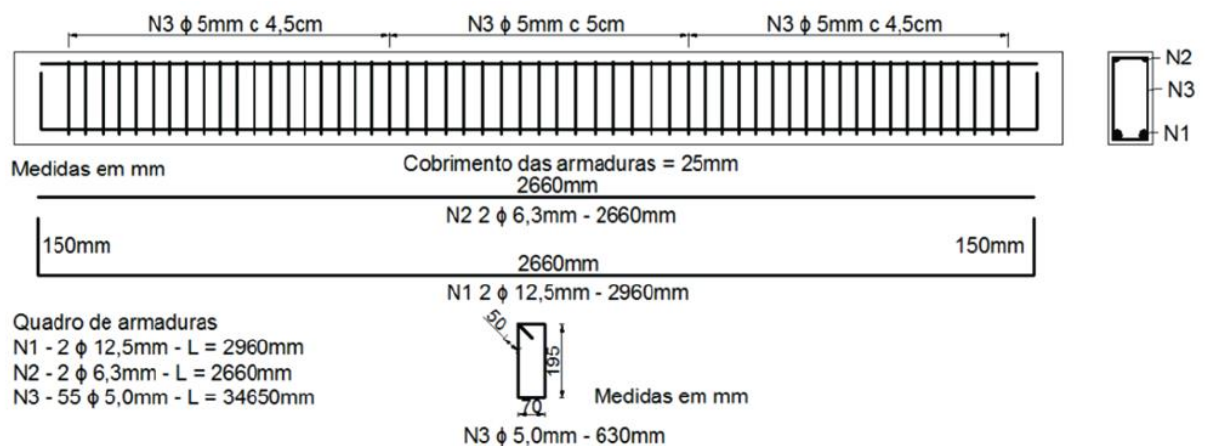
Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se nesse exemplo um resultado muito bom, visto que os deslocamentos do modelo proposto se perfazem entre a nuvem de resultados oriundos do experimental. Em justificativa dessa resposta, pode-se relacionar aos fatores em que a viga se comporta sob domínio 3, possuir uma área de aço relativamente pequena, e por fim, vão pequeno (inferior a 200 cm). Fatores esses observados por um padrão do comportamento das respostas do modelo.

4.2.1.2.6 Modelo Experimental de Vieira et al (2016)

O principal intuito da pesquisa era examinar, através de um programa experimental, o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono, variando-se a taxa de armadura e a quantidade de camadas de reforço, sendo ausente a utilização de sistemas de ancoragem. Os autores elaboraram dois grupos (A e B) de vigas de concreto armado, possuindo as mesmas características geométricas, porém com taxas de armaduras distintas. Para o grupo A, segue:

FIGURA 4.18 - Geometria e detalhamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).

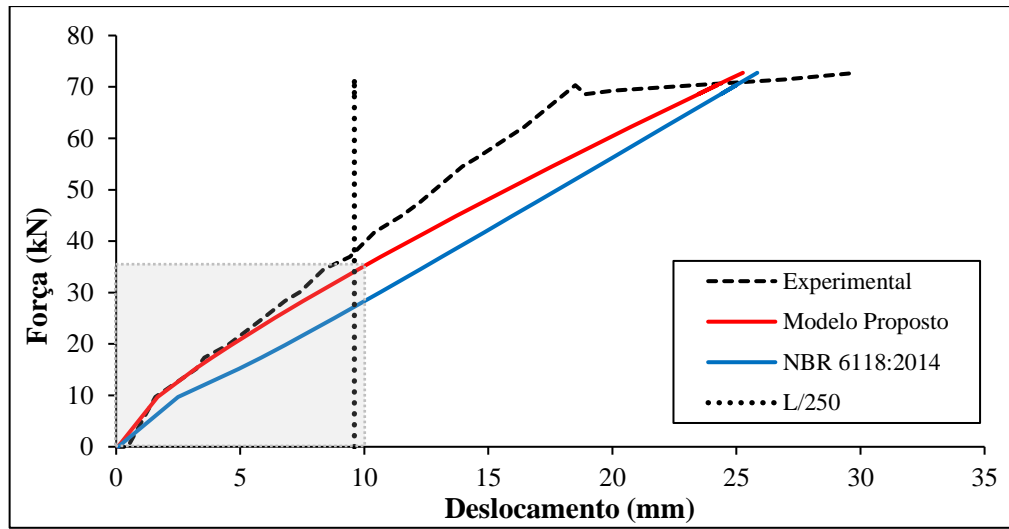


Fonte: Adaptado de Vieira et al (2016).

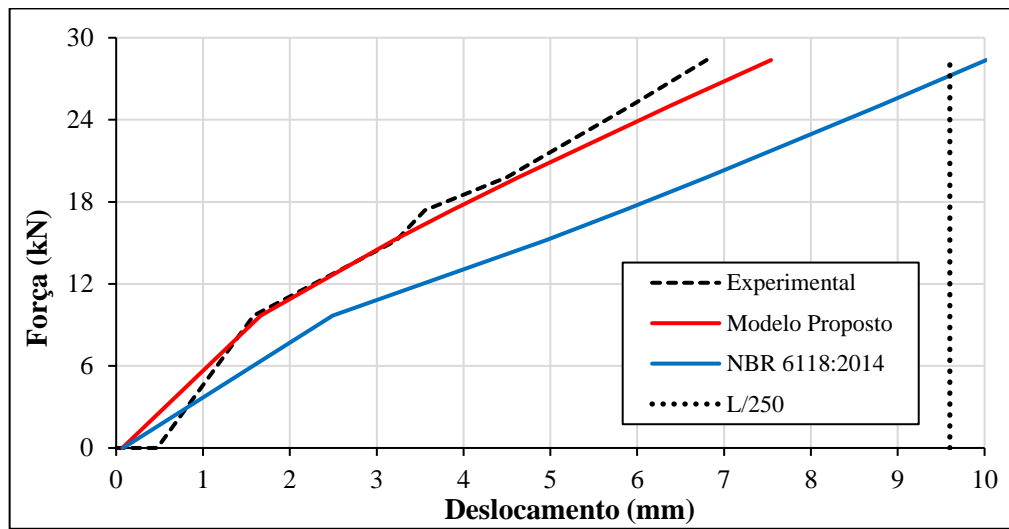
Salienta-se que as vigas do grupo B diferem-se somente pela armadura inferior, sendo que neste as vigas são armadas com duas barras de aço CA-50 com 10,0 mm de diâmetro, já para as do grupo A, 12,5 mm, como visto na Fig. (4.18). Em cada um dos grupos foram concretadas cinco vigas, uma que não foi reforçada (de referência) e as demais com duas a cinco camadas de fibra de carbono. O ensaio experimental foi o de flexão em quatro pontos até o seu colapso. Deste modo, aplicou-se a metodologia proposta nas vigas de referência VR-A e VR-B. Os resultados são ilustrados abaixo.

FIGURA 4.19 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).

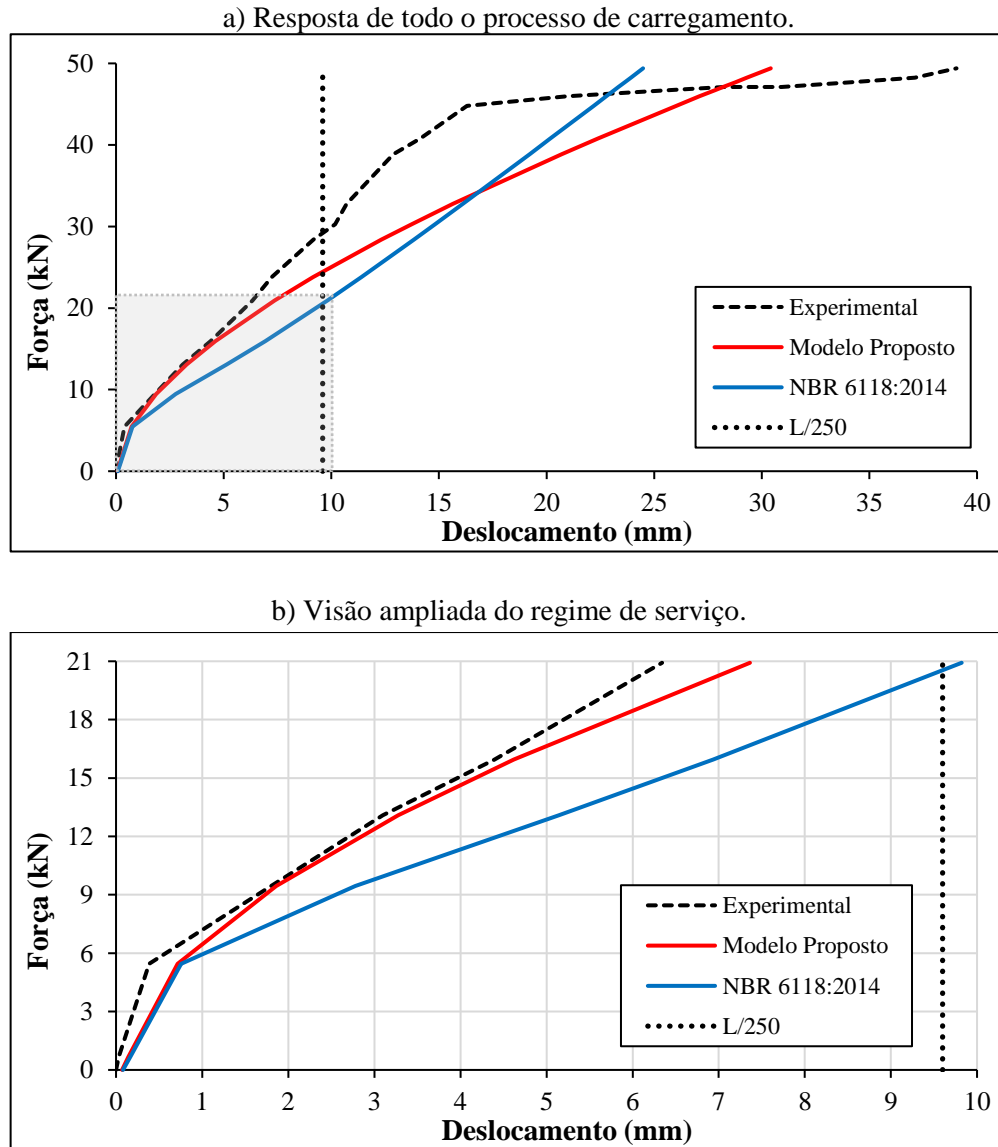
a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 4.20 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VB-R de Vieira et al (2016).

Fonte: Autoria própria (2022).

Como pode ser observado, em ambos os casos foram obtidas respostas consideravelmente próximas entre o modelo e o resultado experimental, em especial no regime de serviço. As curvas das vigas apresentaram a mesma tendência, sendo que a viga VA-R indicou um comportamento mais rígido que a VB-R, isso se justifica pela taxa de armadura da primeira ser superior, além de ser calculada para o domínio 3 e a segunda no domínio 2. Como houve pouco aumento da taxa de armadura entre as vigas, a profundidade da linha neutra no estágio III para ambas foi calculada corretamente.

Por uma comparação numérica, no carregamento necessário para levar a viga VA-R ao limite normativo de deslocamento ($L/250 = 9,6$ mm), constata-se para esse estágio uma carga experimental aproximada de 36,94 kN. No entanto, para o mesmo nível de carregamento o modelo calcula uma flecha de 10,66 mm, enquanto a norma chega-se no valor de 13,12 mm. Tendo assim um aumento de 23% no valor da estimativa da flecha entre modelo e norma.

4.2.1.3 Conclusões Gerais Sobre as Análises Realizadas

Após os cálculos em cada viga e feita uma rigorosa análise dos resultados, chegou-se em algumas conclusões gerais, nas quais foram levantadas a partir de critérios e padrões que foram observados nos resultados. Primeiro, buscou-se examinar o comportamento estrutural da resposta diante os domínios 2 e 3, no sentido em que se o resultado poderia se diferenciar entre os mesmos. Pois bem, como relatado nos exemplos anteriores, vigas com domínio 2 derivam em uma resposta com menor rigidez que as de domínio 3.

Quando se há um acréscimo gradual da área de aço nas vigas, evidentemente, o modelo demonstrou-se mais rígido, ou por outra, aumentando-se seu respectivo domínio, conseqüentemente os valores de deslocamentos serão menores, comportamento este podendo ser observado no conjunto de vigas dos trabalhos de Álvares (1993) e Vieira et al (2016). Similarmente, em relação ao cálculo da linha neutra, em uma ocasião de aumento da taxa de armadura, tem como consequência a não verificação do conceito físico de sua profundidade a partir do carregamento até a ruína. Essas evidências motivam o desenvolvimento do presente trabalho no sentido de verificar a contribuição da taxa de armadura atrelada a uma nova definição do parâmetro (A) do modelo proposto. Para tanto, os trabalhos de: Oh (1992), Álvares (1993), Santos (2006), Barros et al (2007) e Vieira et al (2016) servirão de base para a definição do parâmetro (A).

Para as vigas classificadas com resultados bons e muito bons, apresentaram-se praticamente a mesma resposta nos estádios I e II, sucedendo em flechas com boa aproximação ao modelo ensaiado experimentalmente. Por outro lado, o cálculo submetido pela metodologia da NBR, apesar de ser apontado aqui em outra ocasião como conservador, em todos os exemplos estudados foi verificado o mesmo padrão de comportamento ou tendência das curvas quando comparadas com aquelas experimentais, o que pode ser uma referência a se seguir para o modelo proposto.

Foi observado também que em situações onde se há uma proporcionalidade adotada aqui entre parâmetros, como por exemplo (área de aço (A_s) ≤ 5 cm², $F_{ck} \leq 30$ MPa, vão ≤ 3 m e seção bruta média de 15x30 cm²), manifestam-se ótimos resultados. Entretanto, quando algum desses parâmetros é discrepante, os resultados do modelo por sua vez já se tornam prejudicados. Nesse mesmo âmbito, para as vigas com vãos inferiores a 2,50 m, o modelo consegue capturar a resposta mais facilmente, inclusive as que perfazem o domínio 2.

Em um contexto geral, a proposta de estimativa de descolamentos apresenta algumas limitações, dentre elas: o modelo aplica-se apenas para vigas que são caracterizadas no ELU para domínios 2 ou 3; vigas com alta taxa de armadura apresentam respostas prejudicadas; a proposta não tem aplicabilidade para casos de armadura dupla, visto que a sua metodologia foi realizada apenas para armadura simples; valores de F_{ck} podem interferir na resposta, isto é, em alguns casos que há uma variação limítrofe para a utilização das equações de momento de fissuração, o resultado dos deslocamentos são afetados, isso é reflexo da forma de obtenção das equações via análise de variância das aplicações iniciais do modelo de dano apresentadas em Pituba et al. (2012) e Pituba e Delalibera (2014).

5 PROPOSTA ALTERNATIVA DO PARÂMETRO “A”

5.1 APERFEIÇOAMENTO DA PROPOSTA

Feita a aplicação e verificação das respostas dos cálculos de deslocamentos com o emprego das metodologias desenvolvidas até então, parte-se enfim para a proposta do aperfeiçoamento da expressão do parâmetro (A). Assim como na análise de deflexão vertical em vigas, a teoria de dano é válida para o regime de serviço, e perante ao estudado no Capítulo 4 observou-se uma lacuna a ser investigada que foi gerada pela forma na qual as expressões de dano (D) Eq. (4.3) e de (A) Eq. (4.6) e Eq. (4.7) foram desenvolvidas, posto que, é feita uma alusão ao Estado Limite Último, sendo fundamentada através dos domínios de deformação definidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Frente a esta problemática, faz-se necessária uma maior quantidade de aplicações em casos da prática da Engenharia Estrutural, levando em conta uma configuração correspondente ao regime de serviço, tendo assim a concepção de uma nova hipótese para (A).

À vista disso, propõe-se que a taxa de armadura (ρ) das vigas tenha relação com o cálculo de deslocamentos de forma mais evidente, assumindo desta maneira um outro viés distinto daquele prevalecido pelo ELU. Para este fim foram levantadas as vigas da Tab. (4.3) que possuem as mesmas propriedades físicas, geométricas e material, dispondo uma variação exclusiva da área de aço (A_s), as quais foram:

TABELA 5.1 - Vigas com variação exclusiva na área de aço.

Autores	Viga	Vão (cm)	Seção (cm)	fck (MPa)	Es (MPa)	As (cm²)
Álvares (1993)	V31	240,0	12x30	30,8	210000	2,355
	V51	240,0	12x30	30,8	210000	3,925
	V71	240,0	12x30	30,8	210000	5,495
Vieira et al (2016)	VA-R	240,0	12x24,5	30,0	217000	2,453
	VB-R	240,0	12x24,5	30,0	217000	1,570
Oh (1992)	S1V0	180,0	12x18	40,3	200000	2,534
	S2V0	180,0	12x18	40,3	200000	3,972
Barros et al (2007)	R1	90,0	12x17	37,6	200000	0,392
	R2	90,0	12x17	37,6	200000	0,663
	R3	90,0	12x17	37,6	200000	0,995
Santos (2006)	REF1	400,0	15x40	34,8	188000	6,029
	REF2	400,0	15x40	34,8	188000	12,300

Fonte: Autoria própria (2022).

A hipótese adotada para o cálculo de (A) foi fundamentada em uma relação linear a partir da variação da taxa de armadura das vigas estudadas, onde adotou-se a premissa de não levar em conta outros parâmetros além de (ρ) e (A), logo:

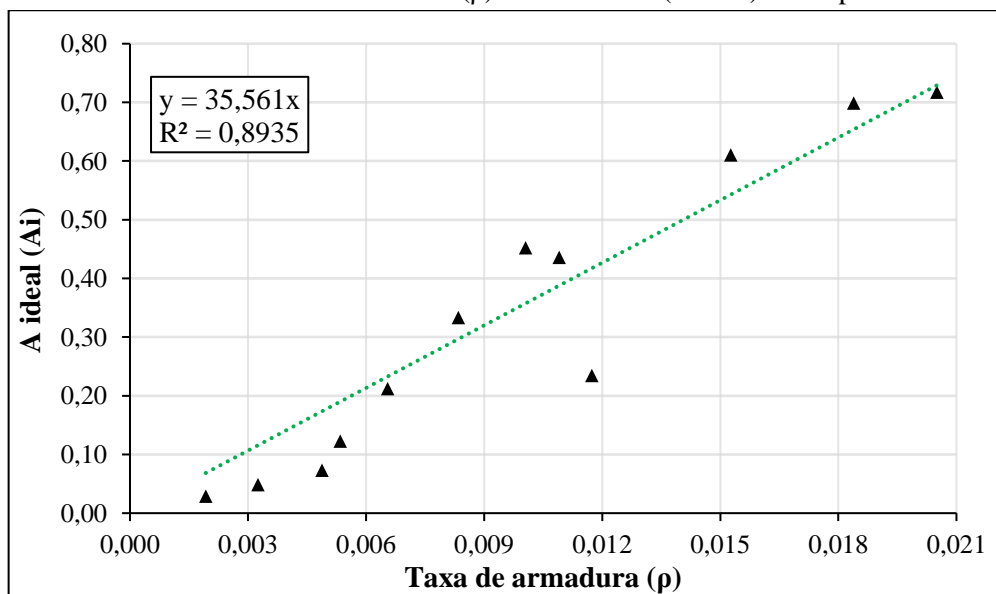
$$A = K \rho \quad (5.1)$$

Sendo a taxa de armadura (ρ) uma variável conhecida que pode ser definida com base no subitem 17.3.5.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} \quad (5.2)$$

Já o seu coeficiente (K), em particular, fez-se necessário uma investigação quanto a sua determinação, no intuito de se verificar quais valores seriam assumidos em relação a um determinado tipo de viga, configuração estrutural e material. Para tanto, os mesmos cálculos de estimativa de deslocamentos realizados no Capítulo 4 foram aplicados aqui, porém, definiu-se o parâmetro (A) pela Eq. (5.1). Isto posto, foi realizada uma investigação paramétrica de (K) na qual o comportamento de tendência das curvas do modelo em relação ao experimental fosse analisado, adotando valores ideais de coeficientes (K) que são capazes de capturar a resposta experimental para cada viga analisada individualmente. Em seguida, elaborou-se o gráfico da Fig. (5.1) onde são identificadas as taxas de armadura pelo (Aideal) correspondente:

FIGURA 5.1 - Taxa de Armadura (ρ) e Parâmetros (Aideal) correspondentes.



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir do resultado uma linha de tendência linear foi traçada, obtendo-se uma expressão cujo o coeficiente (K) assume o valor de 35,561. Após aplicação deste valor e feita a análise das respostas diante a identificação paramétrica, adotou-se $K = 35,5$. Valor este capaz de instituí-lo como constante, em virtude de um padrão estabelecido que foi encontrado nas respostas de (A) entre as vigas analisadas neste capítulo, apresentadas na Tab. (5.1).

Dessa forma, aplicando-se tal valor encontrado de (K) na Eq. (5.1), pode-se apresentar os valores vigentes de (A) em comparação com àqueles determinados pela metodologia de Costa (2020), assim:

TABELA 5.2 - Novos valores do parâmetro “A”.

Autores	Viga	Seção (cm)	As (cm²)	ρ	“A” Costa (2020)	“A”	Diferença (%)
Álvares (1993)	V31	12x30	2,355	0,0065	0,0785	0,232230	66,20%
	V51	12x30	3,925	0,0109	0,3820	0,387049	1,30%
	V71	12x30	5,495	0,0153	0,5777	0,541868	-6,61%
Vieira et al (2016)	VA-R	12x24,5	2,453	0,0083	0,2923	0,296196	1,32%
	VB-R	12x24,5	1,570	0,0053	0,0814	0,189575	57,06%
Oh (1992)	S1V0	12x18	2,534	0,0117	0,3352	0,416468	19,51%
	S2V0	12x18	3,972	0,0184	-	0,652806	-
Barros et al (2007)	R1	12x17	0,392	0,0019	0,0940	0,068303	-37,62%
	R2	12x17	0,663	0,0032	0,0903	0,115427	21,77%
	R3	12x17	0,995	0,0049	0,0818	0,173146	52,76%
Santos (2006)	REF1	15x40	6,029	0,0101	0,3060	0,356716	14,22%
	REF2	15x40	12,300	0,0205	0,6117	0,727750	15,95%

Fonte: Autoria própria (2022).

Como é perceptível, embora a metodologia proposta não ser fundamentada pela teoria de domínios no ELU, foram obtidos valores de (A) relativamente próximos quando comparados, tendo apenas alguns casos com uma diferença superior a 50%. Deve-se ressaltar que as diferenças ilustradas na Tab. (5.2) são em relação aos valores do parâmetro (A) dados pelos dois modelos propostos. Isso significa que a proposta pode ser utilizada independentemente da configuração da viga para a ruptura. Levando em consideração somente o produto da constante (K) pela taxa de armadura é possível analisar estruturalmente vigas no ELS.

5.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

De posse dos novos valores de (A) da Tab. (5.2) e aplicando-os no método de estimativa de deslocamentos aqui já discutido, é possível então apresentar as respostas numéricas por meio de uma análise comparativa de flechas imediatas, ilustradas graficamente por curvas carga-flecha. Igualmente feito no item 4.2 deste trabalho, salienta-se que todos os exemplos serão apresentados dois gráficos, um em regime de ruptura proveniente do próprio ensaio, e o segundo, uma visão ampliada do regime de serviço para aquele caso em específico.

Pelo critério que foi adotado para a hipótese de aperfeiçoamento de cálculo do parâmetro (A), os resultados adiante serão abordados para as vigas que possuem a individualidade de suas propriedades se distinguirem apenas pela taxa de armadura, isto é, aquelas disponibilizadas na Tab. (5.1). Além disso, para mais detalhes específicos dessas vigas, como detalhamentos das armaduras e método de ensaio aplicado, podem ser encontrados nas respectivas bibliografias. Para este momento, além das respostas da NBR 6118 (ABNT, 2014), ainda serão demonstrados os resultados numéricos provenientes da metodologia do ACI 318R (2014), diferentemente do apresentado na validação da proposta de Costa (2020), no item 4.2 do trabalho.

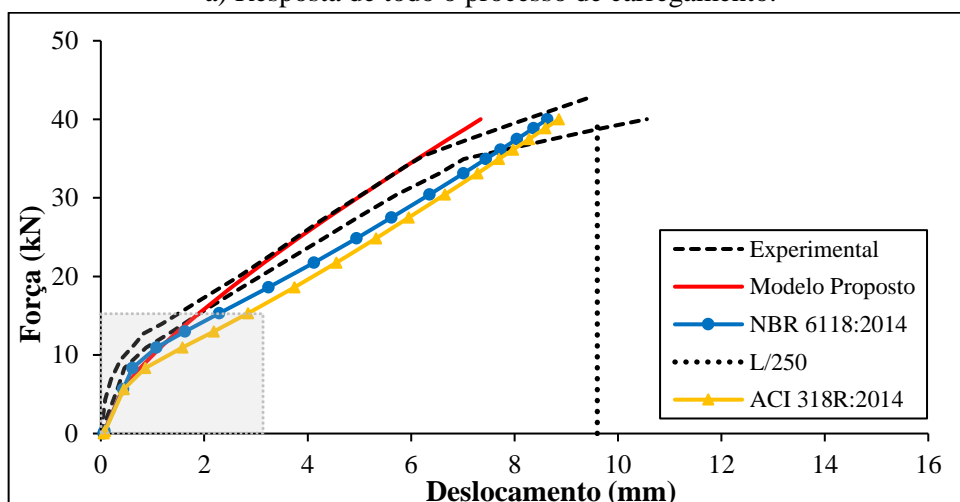
5.2.1 Modelo Experimental de Álvares (1993)

O trabalho de Álvares (1993) aborda três tipos de vigas, tendo um aumento gradual de duas barras de aço com mesmo diâmetro em cada grupo de viga. A geometria e detalhamento das vigas já foram descritos no subitem 4.2.1 deste trabalho.

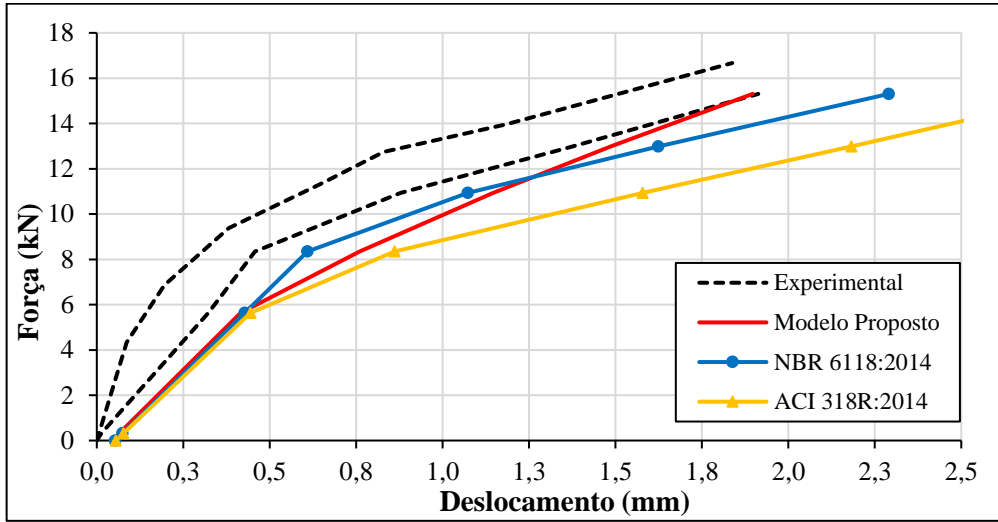
Os resultados numéricos obtidos quanto a estimativa de deslocamentos verticais empregando a proposta de (A) derivada da Eq. (5.1) foram:

FIGURA 5.2 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V31 de Álvares (1993):

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



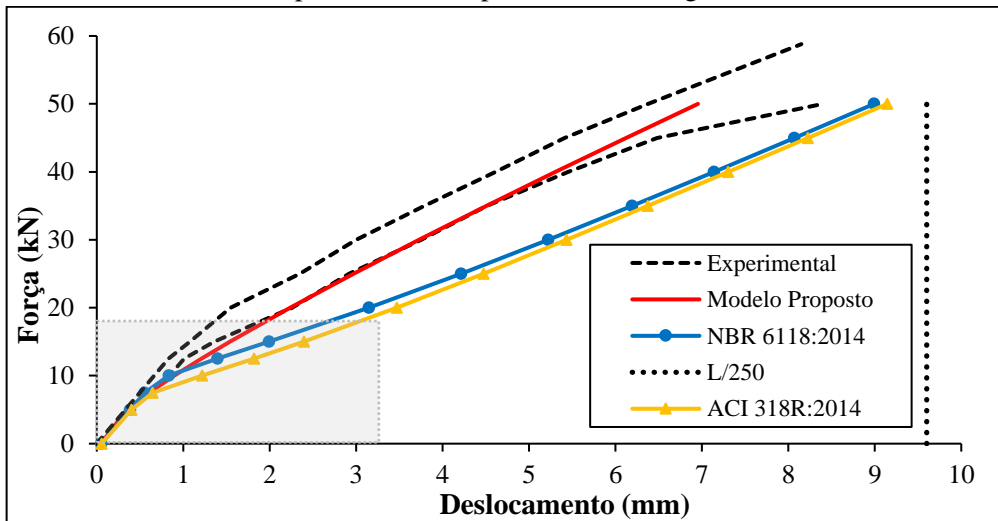
b) Visão ampliada do regime de serviço.



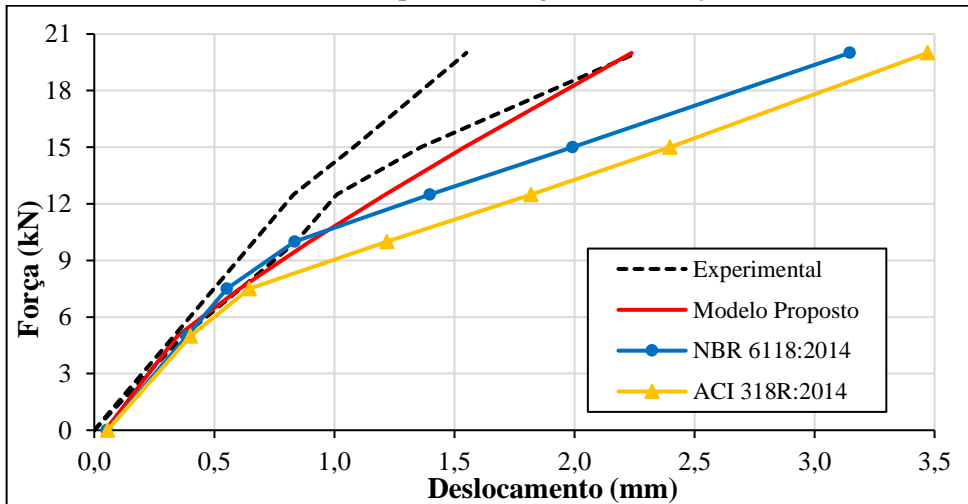
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.3 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V51 de Álvares (1993).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



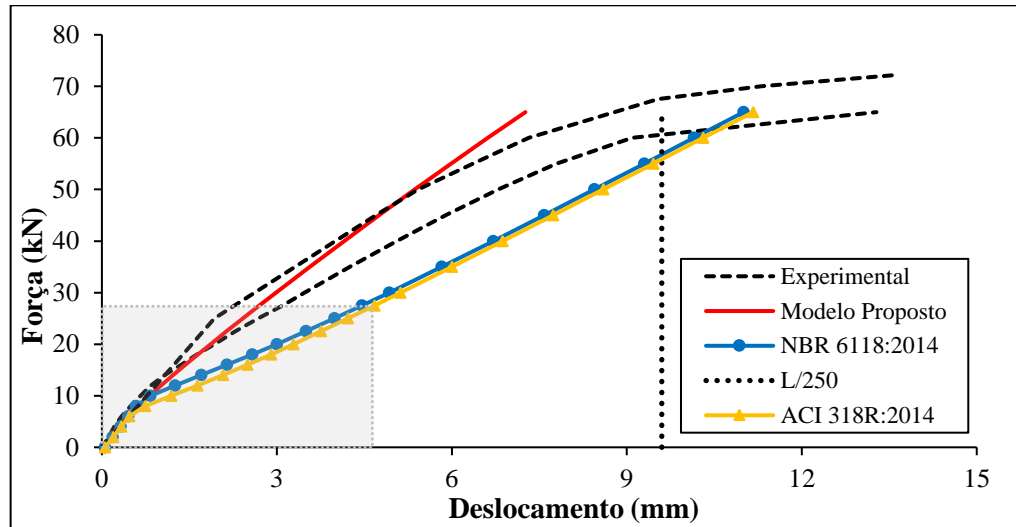
b) Visão ampliada do regime de serviço.



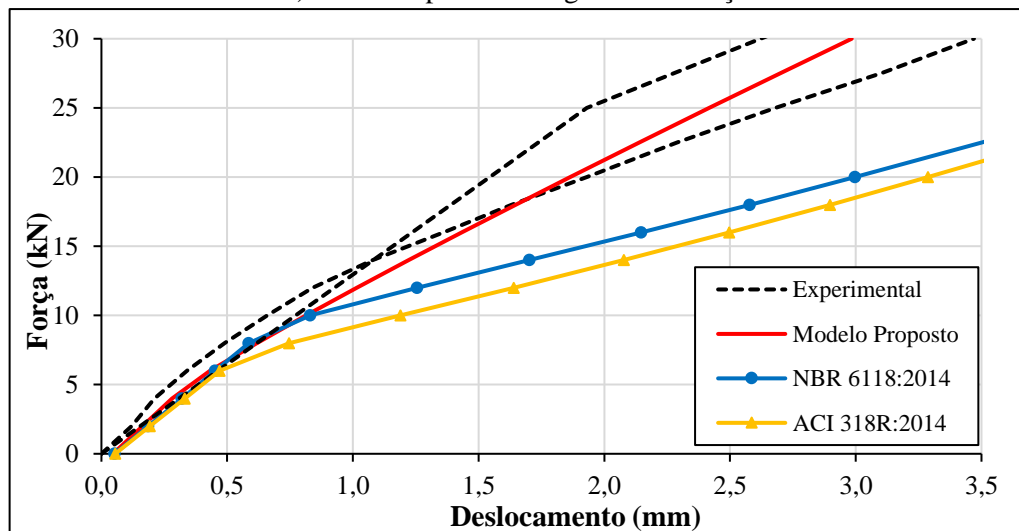
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.4 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga V71 de Álvares (1993).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

No geral, nota-se bons resultados numéricos quando comparados a nuvem de pontos dos ensaios experimentais, inclusive valores de deslocamentos inferiores aos das normas referentes. Na V31 uma menor rigidez inicial foi observada, processo esse devido ao caso de a viga ser pouco armada, gerando assim uma menor interação entre concreto e armadura, assumindo um panorama de fissuração localizada entre as cargas impostas. Além disso, associando os resultados com aqueles apresentados na Fig. (4.7) percebe-se uma maior rigidez em todos os estágios de carregamento do modelo proposto.

Destaca-se ainda que tanto para faixas de cargas decorrentes das verificações de serviço quanto de ruptura, as tendências das curvas apresentaram um comportamento próximo do experimental, diferentemente do apresentado no subitem 4.2.1.2.

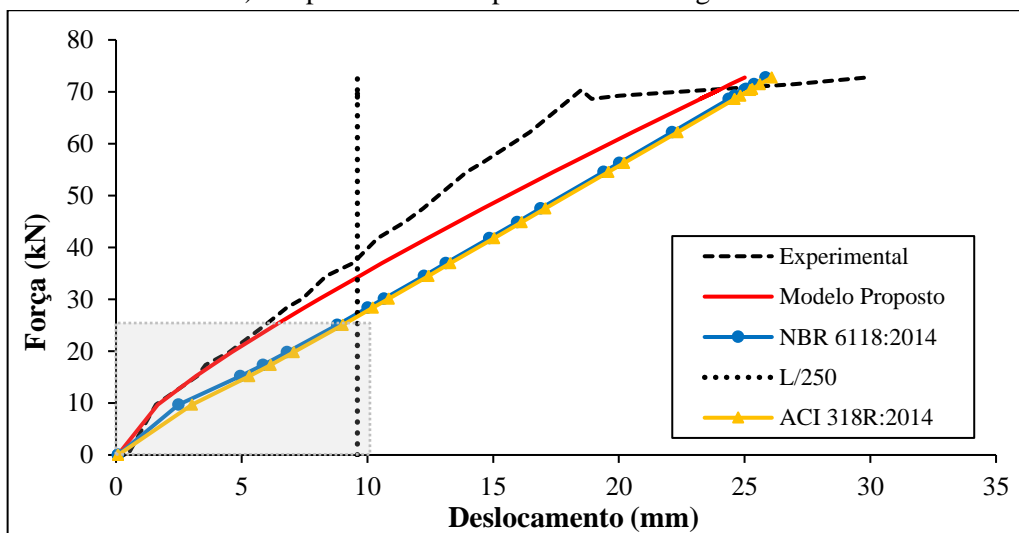
5.2.2 Modelo Experimental de Vieira et al (2016)

Segundo o subitem 4.2.1.2 deste trabalho, nessa pesquisa os autores confeccionaram dois grupos de vigas, denominados de A e B. As vigas do grupo A possuíam área de aço igual a $2,45 \text{ cm}^2$ enquanto as do grupo B, $1,57 \text{ cm}^2$, mantendo as mesmas propriedades mecânicas e geométricas.

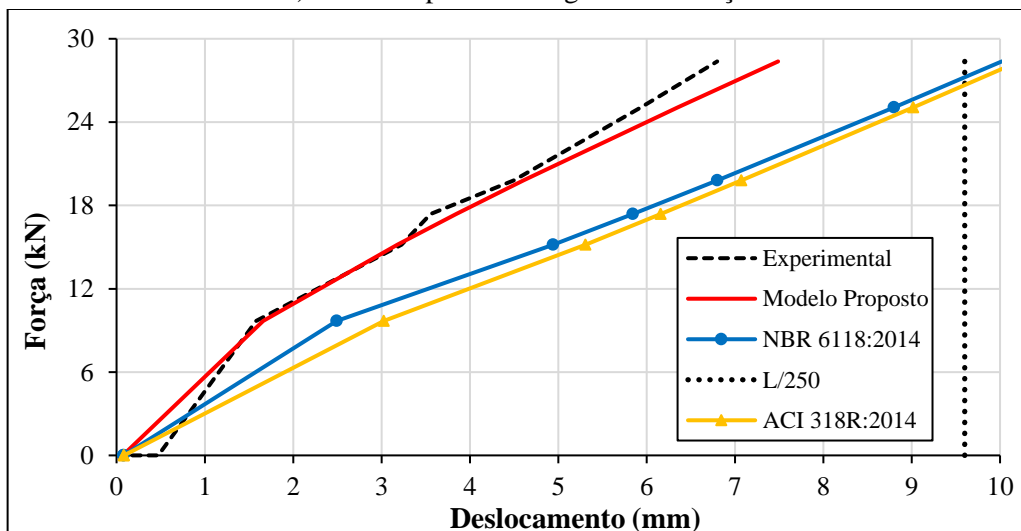
Aplicando a nova hipótese da proposta nos cálculos de estimativas de deslocamentos foi possível obter os seguintes resultados:

FIGURA 5.5 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VA-R de Vieira et al (2016).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



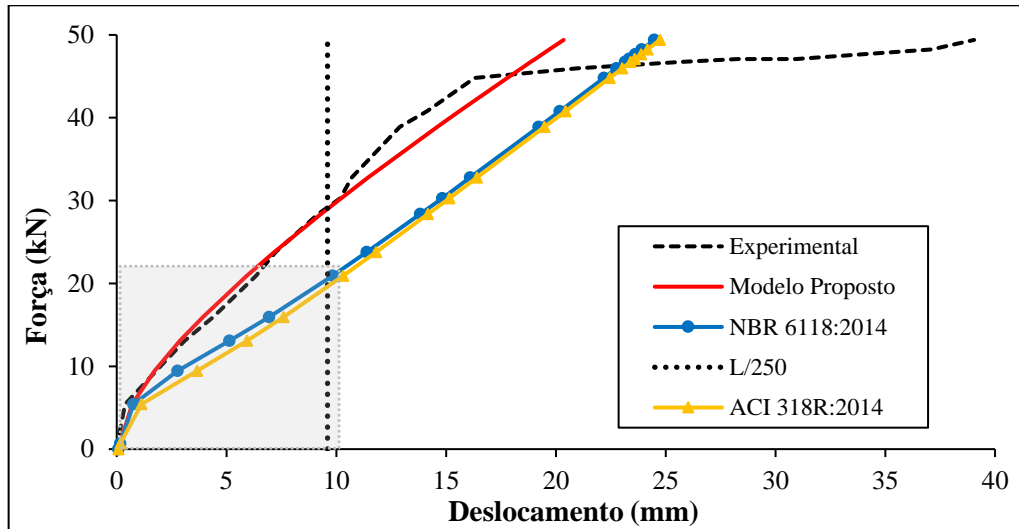
b) Visão ampliada do regime de serviço.



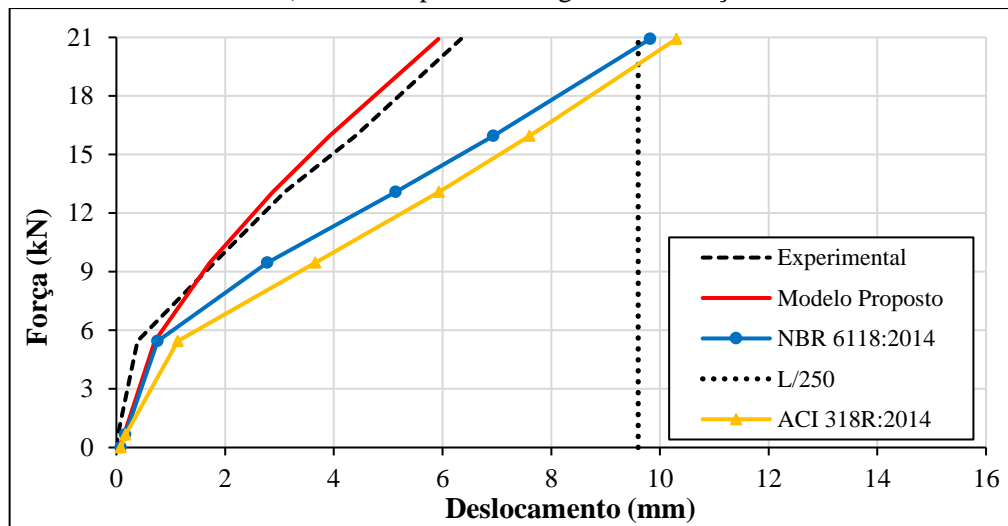
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.6 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga VB-R de Vieira et al (2016).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em relação ao regime de serviço, os resultados obtidos são julgados como satisfatórios, nos quais é possível observar que na região de serviço o modelo proposto consegue capturar o comportamento apresentado experimentalmente.

A viga VR-A indicou um comportamento mais rígido que a VR-B, justificado pela taxa de armadura ser maior na primeira, além de ser calculada no domínio 3 e a outra no domínio 2. Com essa perspectiva, constata-se que os resultados numéricos do modelo tendem a apresentar valores de deslocamentos melhores representados diante do experimental quando há uma configuração de taxa de armadura que prevaleça no domínio 3. Isto é, vigas que possuem uma melhor interação aço-concreto, detendo de uma característica de seção normalmente armada, onde a viga tem as deformações últimas de concreto e armadura alcançadas simultaneamente.

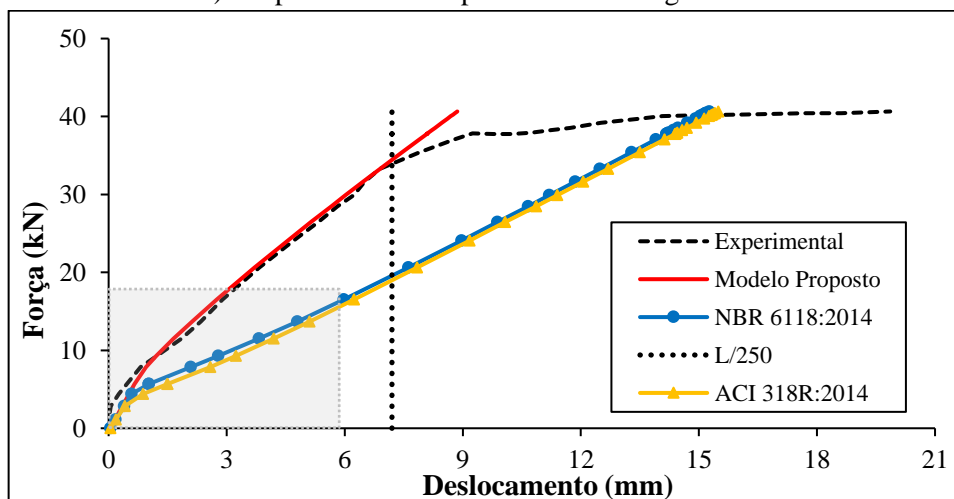
5.2.3 Modelo Experimental de Oh (1992)

O autor realizou um estudo experimental no intuito de se analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço. O programa experimental incluía duas séries individuais de vigas em concreto armado e uma outra reforçadas com fibras. O volume de fibras para cada série foram 0%, 1% e 2%.

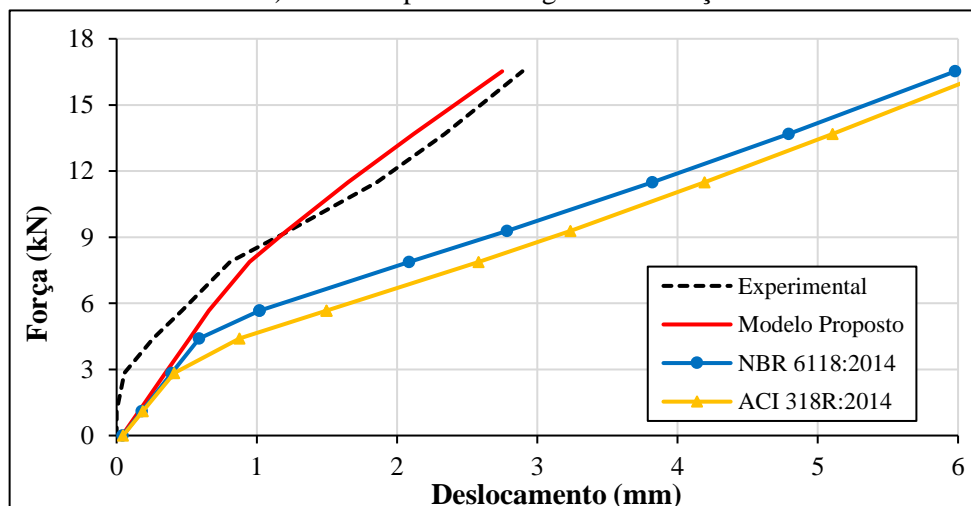
Dentre as séries ensaiadas, as vigas S1V0 e S2V0 não receberam reforço com fibras e podem ser utilizadas nesta análise. As vigas em questão são biapoiadas, com 180 cm de vão, seção transversal retangular (12 x 18 cm) e o ensaio foi caracterizado pelo aquele de quatro pontos, constituído por forças aplicadas nos terços dos vãos. Respectivamente, as vigas S1V0 e S2V0 possuíam taxa de armadura $\rho = 0,0117$ e $\rho = 0,0184$. Maiores detalhes podem ser encontrados na Tab. (4.3) e em Oh (1992). Já os resultados numéricos dos deslocamentos desta análise são expressos graficamente nas figuras seguintes:

FIGURA 5.7 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga S1V0 de Oh (1992).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



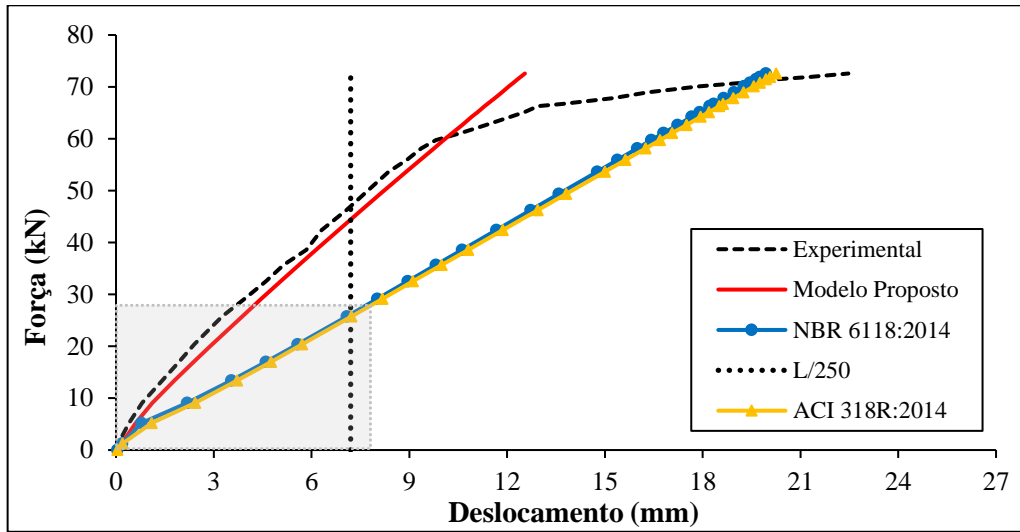
b) Visão ampliada do regime de serviço.



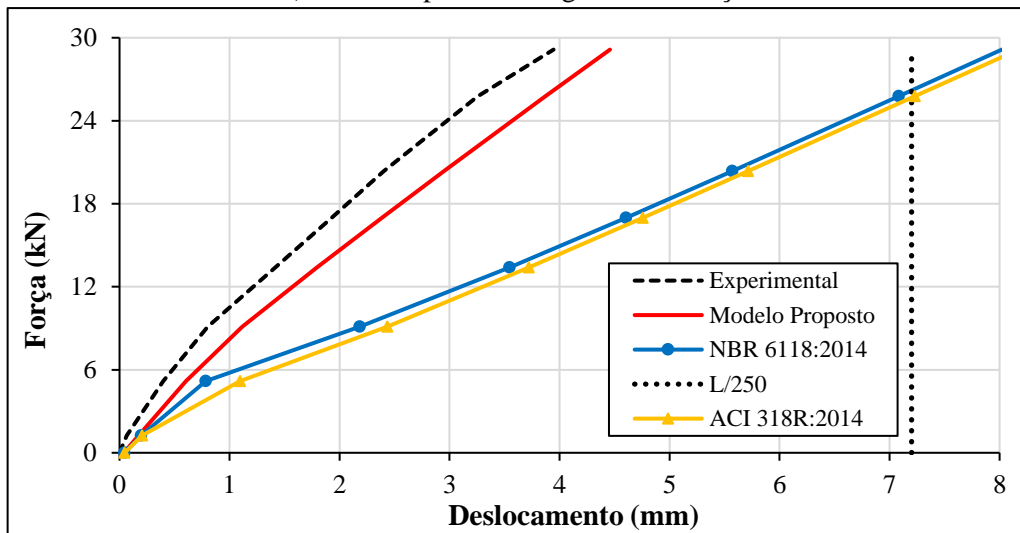
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.8 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga S2V0 de Oh (1992).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

Das Fig. (5.7) e Fig. (5.8) pode-se concluir que os resultados numéricos conseguem capturar os resultados experimentais com êxito. Levando-se em conta que a S2V0 detém de uma taxa de armadura superior e caracterizada no domínio 4, acomete-se em um panorama de fissuração menos localizado, uma vez que, tendo mais armadura o concreto apresenta menor danificação e deformações residuais. Além disso, através deste método do modelo proposto é possível realizar as estimativas de deslocamentos, diferentemente do que acontece com a metodologia de Costa (2020), dado que é válida somente para vigas de domínios 2 e 3.

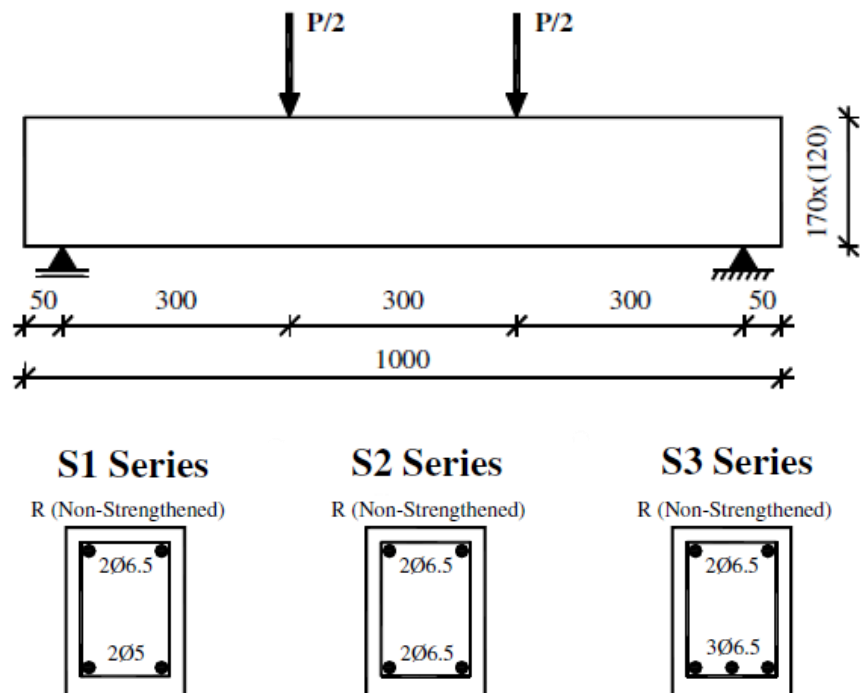
Em termos de comparação numérica, levando em consideração o alcance quanto ao limite da norma brasileira de deslocamento ($L/250 = 7,2$ mm), para a viga S2V0 foi necessário um carregamento experimental aproximado de 47,02 kN. Para esta mesma carga o modelo calcula uma flecha de 9,83 mm, já a NBR 16,10 mm e 16,36 mm para o ACI. Evidenciando dessa maneira um acréscimo percentual nos valores de deslocamentos do experimental para o modelo e normas, respectivamente, de 32,53%, 123,61% e 127,23%.

5.2.4 Modelo Experimental de Barros et al (2007)

No trabalho em questão foi estudado o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC). A eficácia do reforço foi analisada a partir da elaboração de um programa experimental, onde foram concretadas três séries de vigas, nas quais, cada uma possuía uma viga com armadura convencional. Com isso, foi possível levantar três vigas para aqui serem analisadas diante da metodologia proposta.

Assim como no trabalho de Vares (2019), estudada aqui no subitem 4.2.1.2, buscou-se na confecção utilizar dimensões proporcionais daquelas empregadas em laboratórios, por questões tecnológicas. Tendo assim protótipos de vigas que representam aproximadamente metade das dimensões de vigas reais. As propriedades geométricas e de detalhamento são apresentadas adiante:

FIGURA 5.9 - Geometria e detalhamento das vigas R1, R2 e R3 de Barros et al (2007).

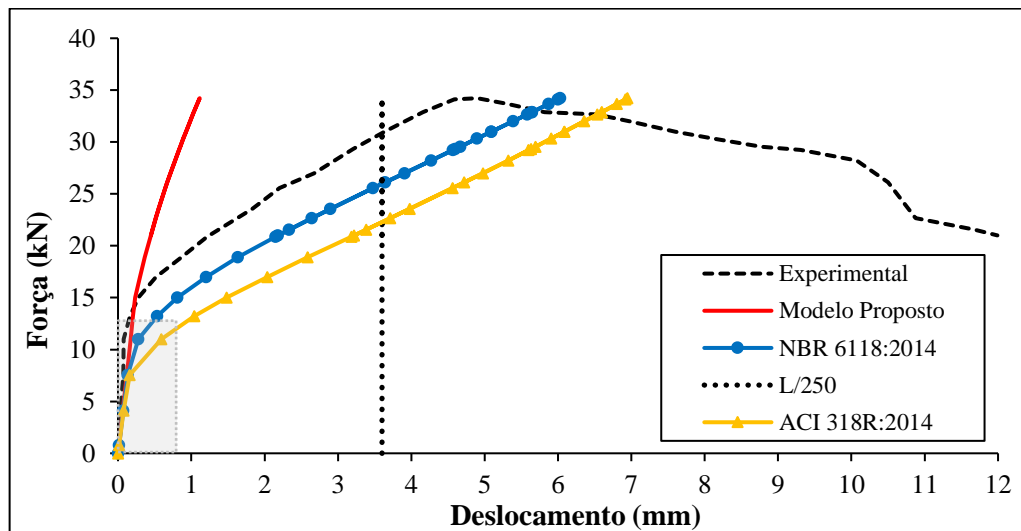


Fonte: Adaptado de Barros et al (2007). (dimensões em mm)

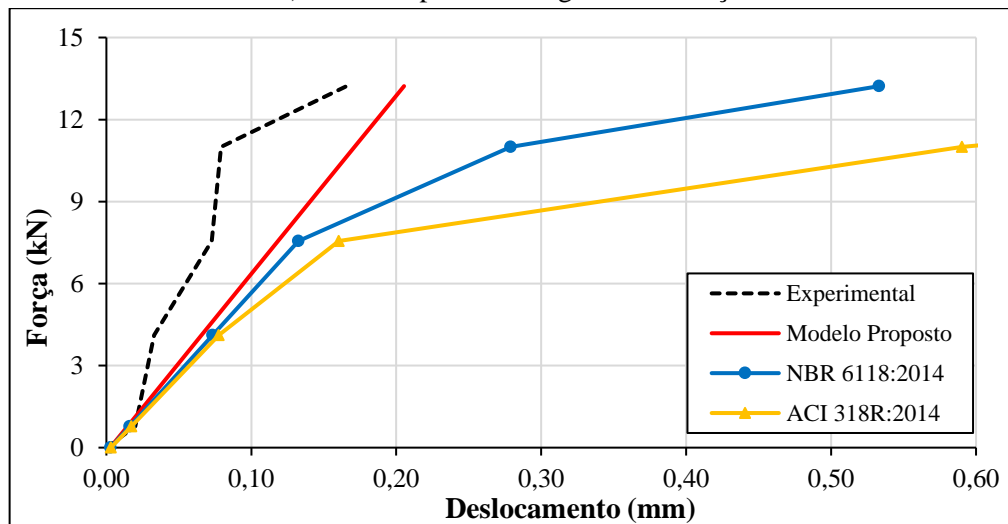
Vale destacar que o ensaio foi caracterizado pelo de quatro pontos, com cargas aplicadas nos terços médios do vão. Pela metodologia proposta calcula-se a estimativa de deslocamentos para as três vigas R1, R2 e R3, chegando-se aos seguintes resultados:

FIGURA 5.10 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R1 de Barros et al (2007).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



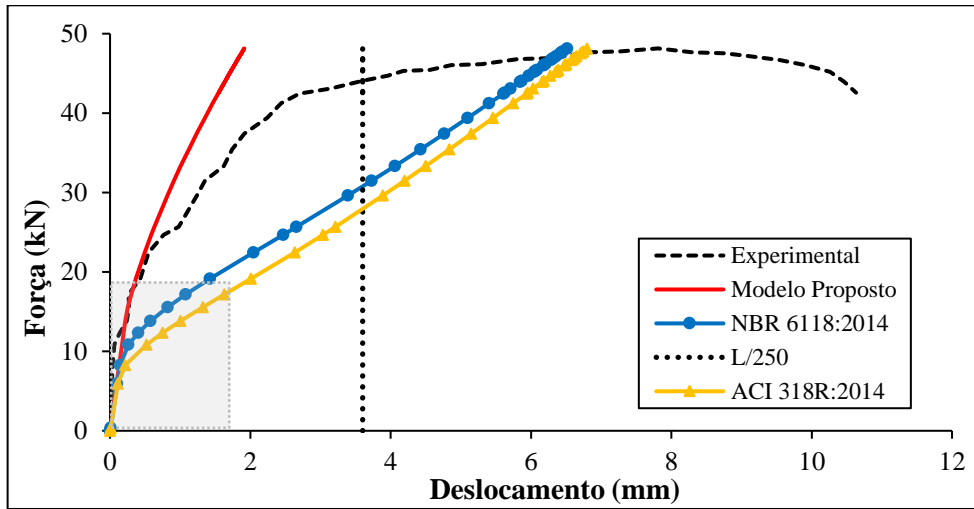
b) Visão ampliada do regime de serviço.



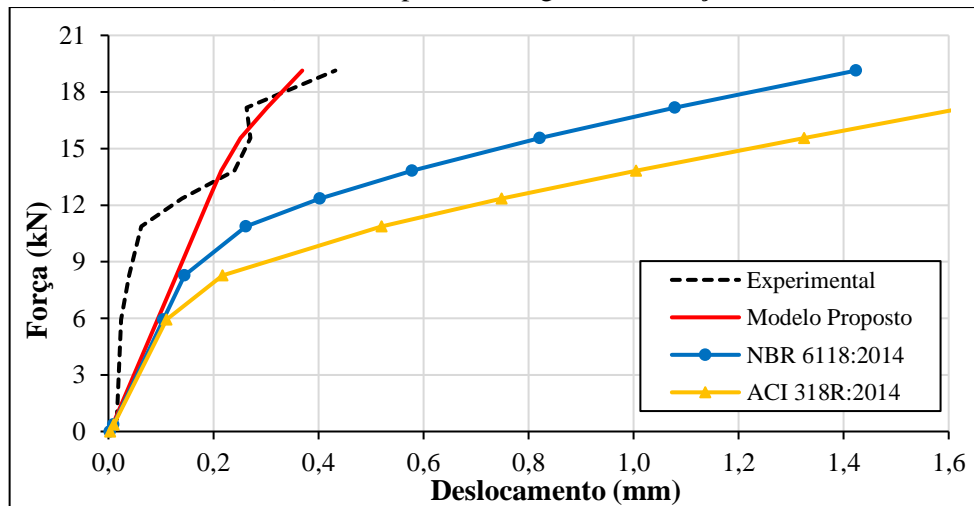
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.11 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R2 de Barros et al (2007).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



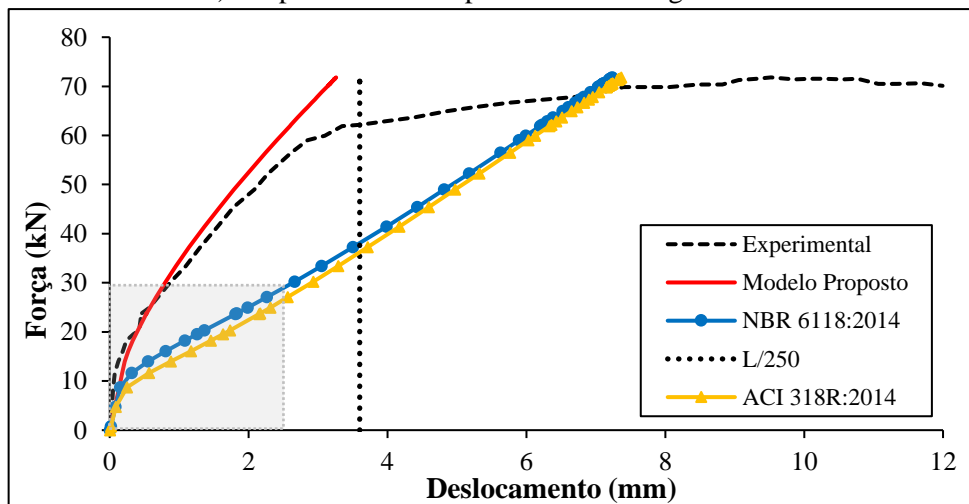
b) Visão ampliada do regime de serviço.



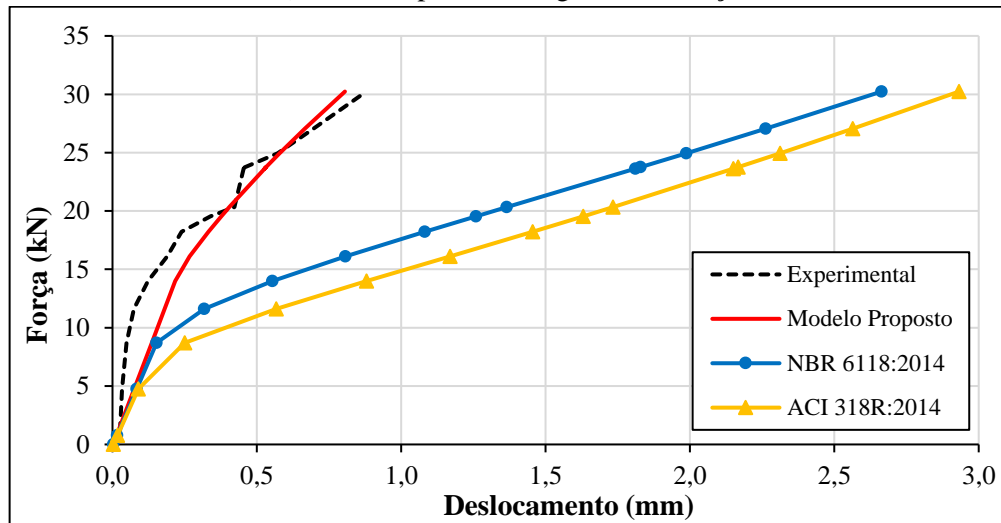
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.12 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga R3 de Barros et al (2007).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

De início, analisando-se a viga R1 percebe-se que houve um comportamento mais rígido do modelo quando comparado aos modelos experimental e das normas. Verificou-se ainda que na região de serviço, para esta viga em específico o modelo proposto comporta-se de maneira elástica, ou seja, os processos de danificação não se fazem presentes. Mesmo no estágio II, o modelo proposto não apresenta uma danificação evidente.

Para relacionar tal problemática com a taxa de armadura, na tabela 17.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014) são conhecidas as taxas mínimas de acordo com a forma da seção e f_{ck} adotado, conforme a tabela seguinte:

TABELA 5.3 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.

Forma da seção	Valores de ρ_{\min} ($A_s, \min/A_c$)														
	%														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,15	0,15	0,15	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

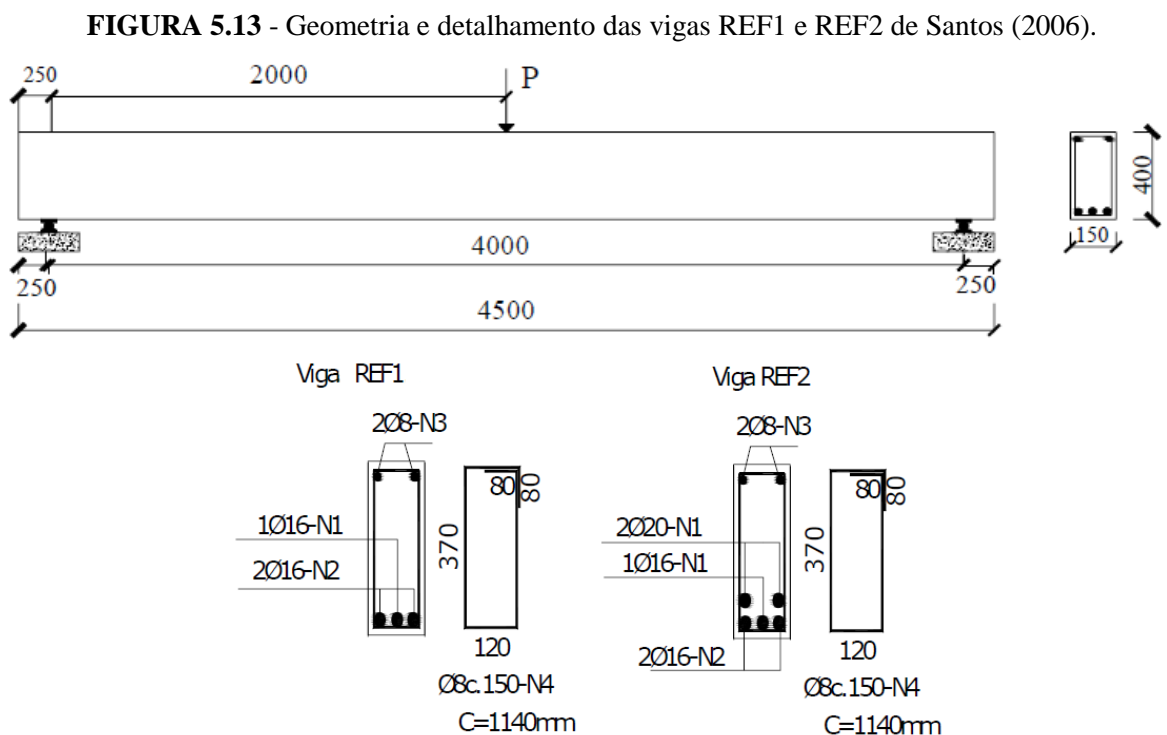
Tendo em vista um ($f_{ck} = 37,6$ MPa) e uma seção retangular de (12×17 cm²), é preconizado pela norma brasileira uma taxa mínima de 0,164%. E a taxa calculada para a viga R1 possui o valor de ($\rho = 0,19\%$), aproximando-se do valor mínimo imposto pela norma. Nesse âmbito, evidencia-se certa delimitação para a aplicação da proposta, pois em uma configuração estrutural onde há valores mínimos de armadura a metodologia não é capaz de capturar o processo real de danificação, por conta da pouca interação do aço com o concreto, por consequência, o módulo de elasticidade inicial é preservado.

Pode ser observado nos resultados das vigas R2 e R3 que, com o aumento da taxa de armadura, as tendências das curvas do modelo se aproximam com as do experimental. Dessa forma, sendo possível obter resultados julgados como satisfatórios, essencialmente no regime de serviço.

5.2.5 Modelo Experimental de Santos (2006)

A referente pesquisa foi elaborada para a investigação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pela adição de concreto e aço apenas na zona mais tracionada da viga, técnica denominada por encamisamento parcial. No programa experimental foram concretadas quatro vigas bi-apoiadas, consistindo de seção transversal (15 x 40 cm²) e vão de 450 cm. Duas das vigas não foram reforçadas, logo, sendo possível utilizá-las nas presentes análises. As duas vigas foram denominadas por REF1 e REF2, tendo taxas de armadura de flexão nos valores 1,08% e 2,33%, respectivamente.

Diferentemente dos exemplos estudados até então, neste as vigas foram submetidas a uma carga concentrada aplicada no centro do vão. Na figura abaixo são ilustrados o detalhamento das armaduras e a geometria das vigas:

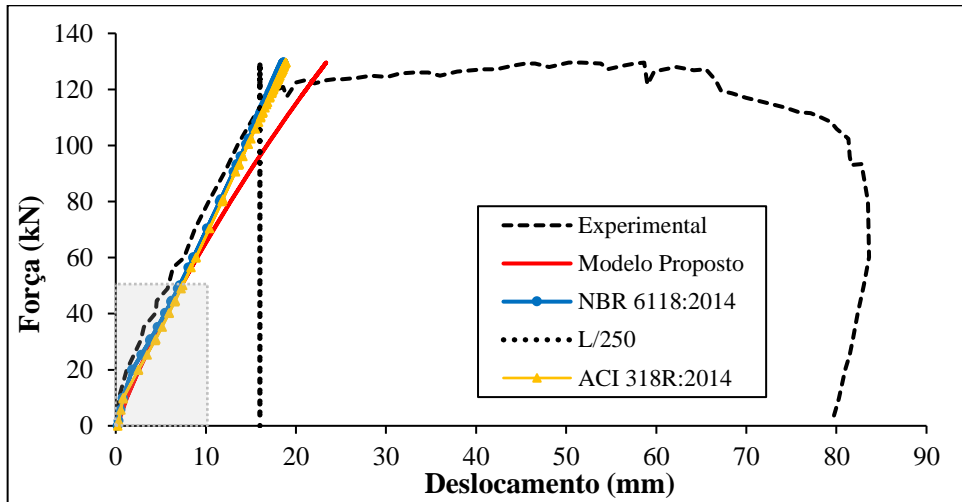


Fonte: Adaptado de Santos (2006). (dimensões em mm)

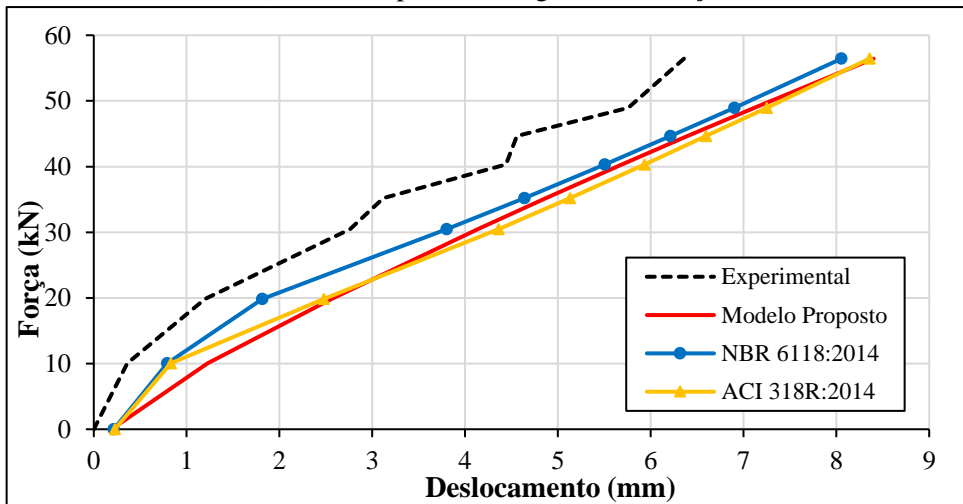
Aplicando a proposta do modelo que leva em conta a taxa de armadura das vigas, obteve-se os resultados numéricos de deslocamentos verticais, apresentados pelos gráficos:

FIGURA 5.14 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga REF1 de Santos (2006).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



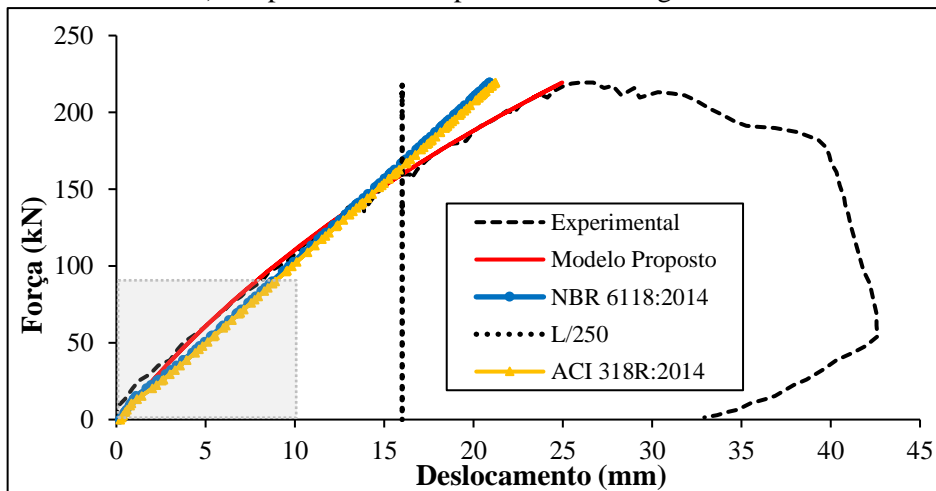
b) Visão ampliada do regime de serviço.



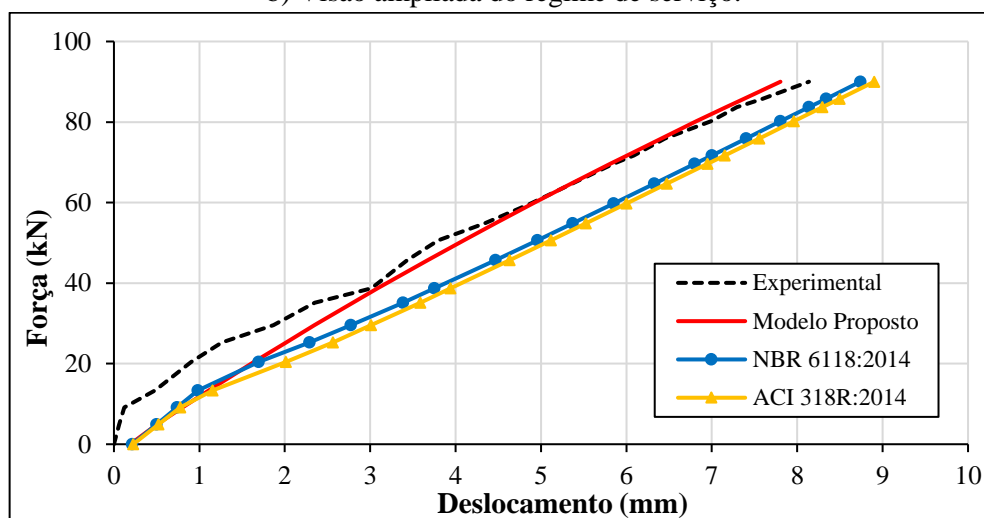
Fonte: Autoria própria (2022).

FIGURA 5.15 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga REF2 de Santos (2006).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

As vigas em questão possuem áreas de aço elevadas quando comparadas aos exemplos anteriores, sendo ($A_s = 6,029 \text{ cm}^2$) para REF1 e ($A_s = 12,30 \text{ cm}^2$) para REF2. Observou-se através dos resultados numéricos um comportamento mais rígido dos deslocamentos obtidos pelas normas, o que não tinha se verificado ainda nas análises anteriores. Levando a dizer que em vigas com altas taxas de armadura gera um comportamento rígido e mais próximo das respostas das normas diante ao experimental, porém em regime de serviço, ainda há uma segurança apresentada nas estimativas de deslocamentos. Já para o modelo proposto, identificou-se um bom comportamento da resposta, acompanhando e corroborando que em casos onde se há boa interação entre aço e concreto observa-se um comportamento próximo ao do experimental, como já explanado em outras aplicações.

5.2.6 Aplicação em Vigas de Domínios 4 e 5

Verificou-se no Capítulo 4 que a aplicação da metodologia de Costa (2020) é limitada para vigas caracterizadas nos domínios 2 e 3. Contudo, a nova proposta é capaz de estimar os deslocamentos de vigas independentemente de seu respectivo domínio.

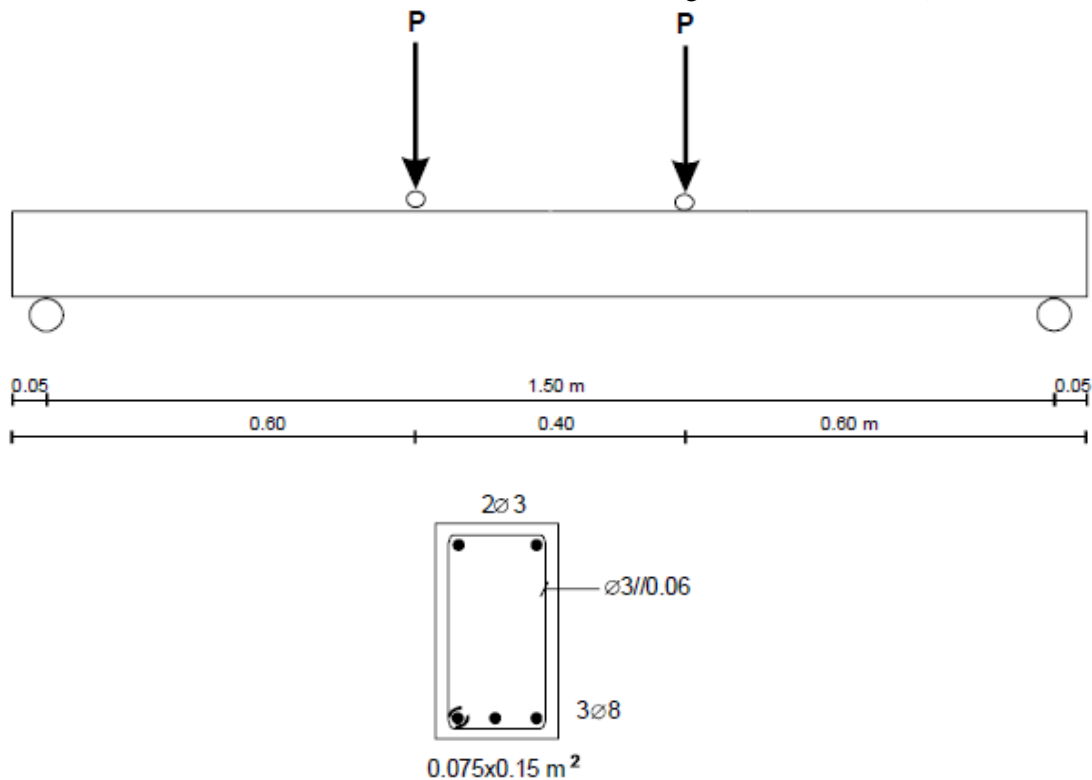
Neste intuito, foram analisadas duas vigas que se apresentam nos domínios 4 e 5. Vale destacar ainda que ambas as vigas são de Juvandes (1999) e suas propriedades estão disponíveis na Tab. (4.3).

5.2.6.1 Viga B.2 de Juvandes (1999)

O principal intuito da pesquisa era de se avaliar estruturalmente o reforço à flexão de elementos de concreto armado através da técnica de colagem de armaduras não metálicas do tipo CFRP unidirecionais (Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono).

Dentre a série de modelos reduzidos de vigas elaboradas em Juvandes (1999), foi possível analisar aqui as vigas denominadas de C.3 e B.2, nas quais foram concretadas sem qualquer tipo de reforço além do convencional, sendo utilizadas em seu trabalho como vigas testemunho ou de referência. As propriedades de detalhamento da viga B.2 são vistas na Fig. (5.16) e os resultados obtidos são apresentados em seguida.

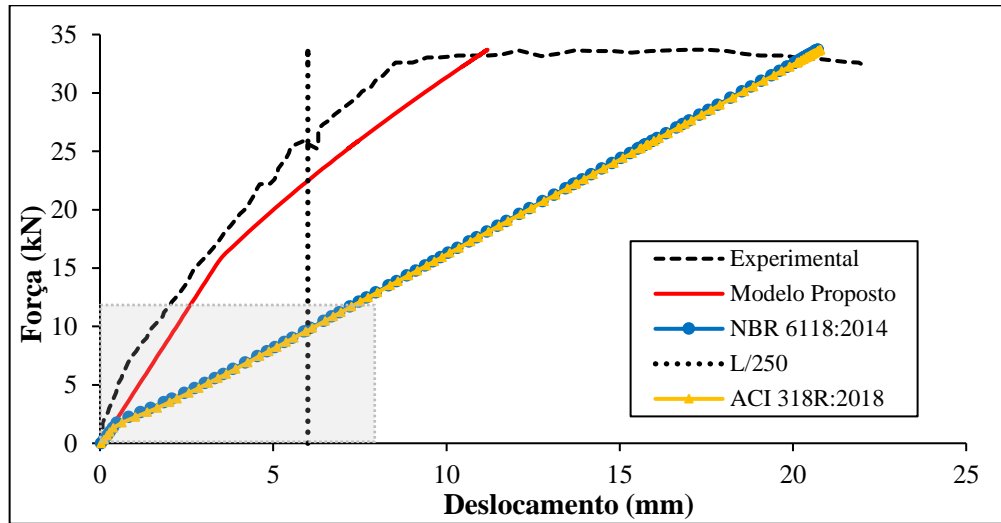
FIGURA 5.16 - Geometria e detalhamento da viga B.2 de Juvandes (1999).



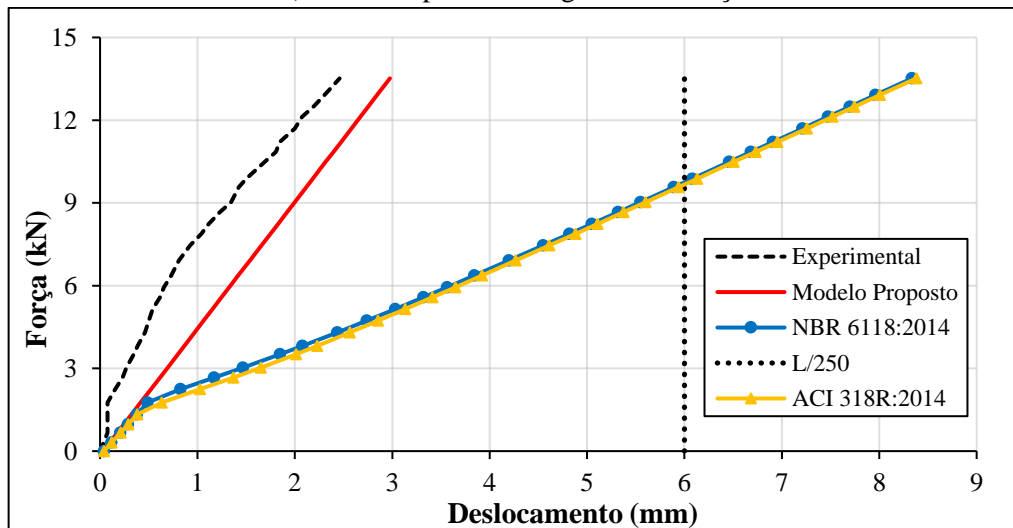
Fonte: Adaptado de Juvandes (1999). (dimensões em m)

FIGURA 5.17 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga B.2 de Juvandes (1999).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



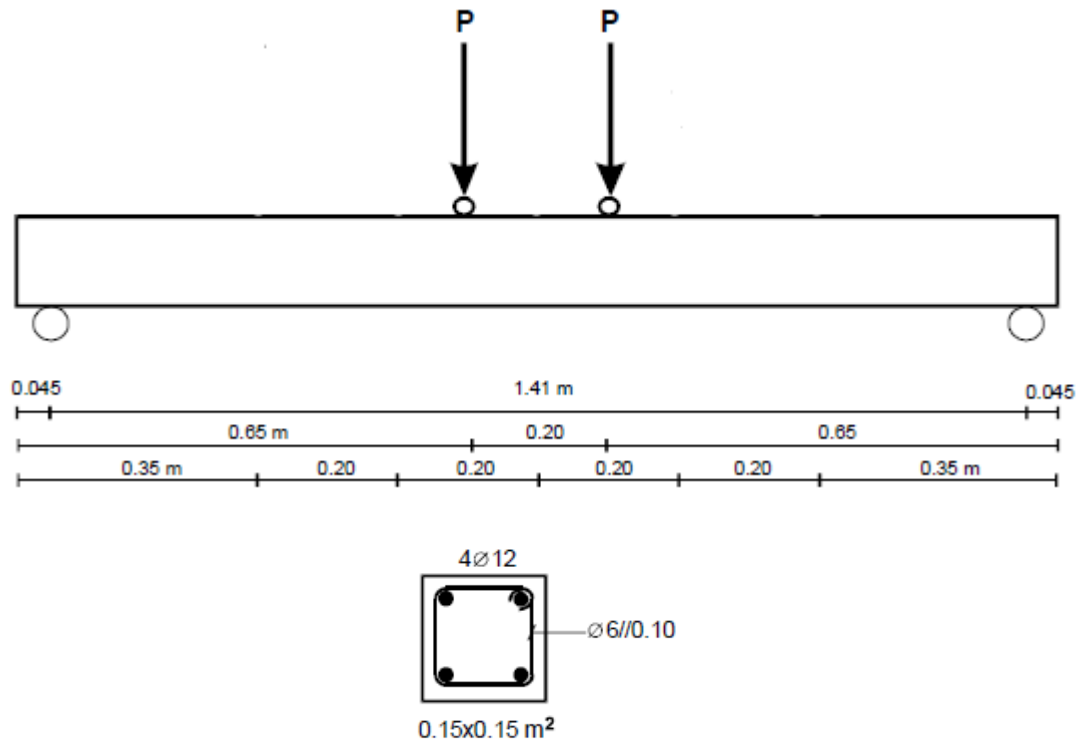
Fonte: Autoria própria (2022).

Interessante observar os bons resultados obtidos nesta viga de domínio 4. Com a aplicação do modelo foi possível então capturar a tendência do comportamento experimental, obtendo-se valores de deslocamento similares, em particular para as cargas de serviço.

5.2.6.2 Viga C.3 de Juvandes (1999)

Já para a viga C.3 são apresentadas suas propriedades geométricas e de detalhamento pela Fig. (5.18):

FIGURA 5.18 - Geometria e detalhamento da viga C.3 de Juvandes (1999).

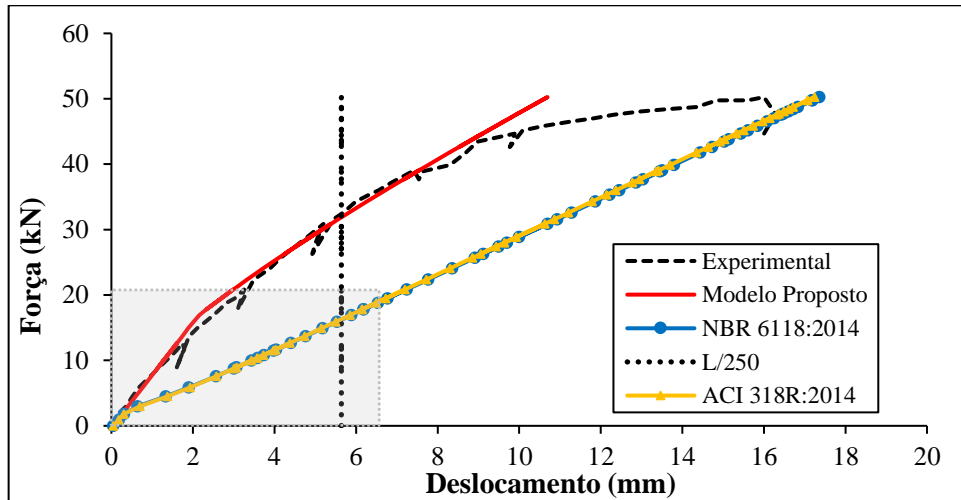


Fonte: Adaptado de Juvandes (1999). (dimensões em m)

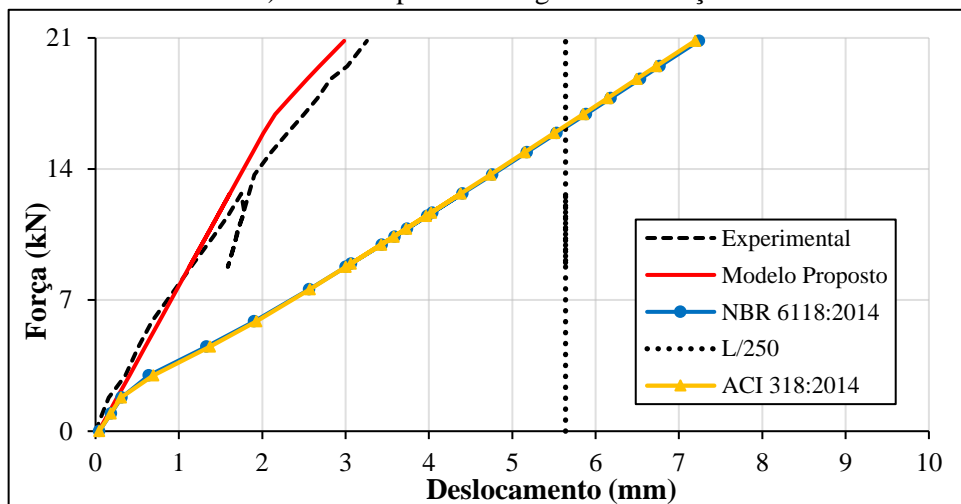
E os resultados das análises numéricas de deslocamentos verticais desta viga empregando a metodologia vigente foram:

FIGURA 5.19 - Diagrama Carga x Deslocamento da viga C.3 de Juvandes (1999).

a) Resposta de todo o processo de carregamento.



b) Visão ampliada do regime de serviço.



Fonte: Autoria própria (2022).

A viga em questão é caracterizada pelo domínio 5, entretanto, nota-se bons resultados que foram determinados a partir da aplicação da nova metodologia. O comportamento da resposta do modelo teve uma proximidade relevante ao do experimental, tendo até uma certa rigidez superior em alguns trechos ao longo do processo de carregamento.

Percebe-se ainda em relação ao comportamento das respostas das normas referentes, que para estas duas vigas onde há uma taxa de armadura relativamente baixa, conseqüentemente valores maiores de deslocamentos são encontrados, diferente do exposto no exemplo de Santos (2006), neste trabalho aqui analisado.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho trata de uma proposta alternativa para o cálculo de estimativas de deslocamentos verticais em vigas de concreto armado, sendo esta uma contribuição baseada a partir dos fundamentos da Mecânica do Dano no Contínuo. As formulações dos modelos de dano admitem que a degradação das características mecânicas do material é devida unicamente ao processo de microfissuração. Por isso, com a sua utilização é possível uma modelagem macroscópica do comportamento do concreto, principalmente em regime de serviço, onde o fenômeno de fissuração é preponderante para este material.

De início, em um panorama geral, foi discutido alguns conceitos e definições que são inerentes aos assuntos desenvolvidos ao longo do trabalho, que foram: estruturas e modelos estruturais, em particular as vigas; estudo do material concreto, levando em conta alguns aspectos do seu comportamento mecânico; observação geral teórica dos Estados-Limites, além de uma prévia abordagem sobre o cálculo de deslocamentos em vigas de concreto armado. Em seguida, através da elaboração do mapeamento sistêmico, foi possível encontrar diversas bibliografias aderentes ao tema proposto, relatando-se um número crescente de publicações nesta última década, dessa maneira evidenciando a potencialidade da pesquisa.

A ideia inicial da proposta trouxe uma discussão válida quanto a abordagem teórica do método sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), no qual não é levado em conta o comportamento não-linear do concreto. Com isso, a partir da aplicação do modelo de dano na penalização do módulo de elasticidade do concreto das vigas, além de novas expressões para o momento de fissuração, foi possível calcular assim valores de deslocamentos distintos daqueles preconizados pela norma. Nesse primeiro momento já foi possível ressaltar uma boa aplicabilidade do modelo em regime de serviço nas peças estudadas, demonstrando um comportamento com baixos erros em relação ao ensaio experimental. Porém, verificou-se que na formulação do modelo era necessária uma investigação paramétrica sobre uma variável denominada de “A”. Logo, pesquisas posteriores surgiram na avaliação desse parâmetro e as mesmas foram analisadas neste trabalho.

Neste cenário, aplicou-se metodologia desenvolvida por Costa (2020) em um número maior de exemplos, podendo assim avaliar o comportamento em determinadas variações em relação aos tipos de vigas analisadas. Dessa forma, é possível afirmar que, em um contexto geral, a proposta se comportou com concordância na maioria dos casos, tendo boa convergência dos resultados em relação aos experimentais, principalmente para as vigas de domínio 3. Entretanto, em peças nas quais são caracterizadas por armadura dupla ou com altas taxas de armadura, os resultados dos deslocamentos são prejudicados, além de não possuir funcionalidade para vigas distintas daquelas de domínios 2 e 3, evidenciando por consequência suas limitações.

Um fator preponderante para esta última metodologia foi em relacionar suas análises ao regime de ruptura das vigas, isto é, no Estado Limite Último. As respostas obtidas a partir de uma formulação constitutiva baseada em dano, e ainda sobre a avaliação de deslocamentos, evidentemente o critério a ser adotado deverá ser correspondente a cargas de serviço. Por esta razão, realizou-se neste trabalho uma nova avaliação quanto a abordagem teórica na concepção do parâmetro “A”, onde foi relacionada a taxa de armadura para o seu cálculo, não levando em consideração a forma na qual uma viga se comporta na ruptura, sendo esta a principal contribuição do presente trabalho, ressaltando ainda sua originalidade. Assumindo dessa maneira uma configuração distinta do que era proposto, em que, neste momento, as análises são fundamentadas no Estado Limite de Serviço.

Esta variável foi relacionada ainda a uma constante denominada aqui de “K”. Sua identificação paramétrica foi obtida a partir da aplicação do modelo em diferentes tipos de vigas em concreto armado, tendo uma variação exclusiva na área de aço entre as vigas de cada trabalho em específico. O que resultou em um valor constante de ($K = 35,5$).

Com as aplicações, notou-se que em casos particulares de vigas com baixa taxa de armadura, o modelo fornece respostas numéricas com menor rigidez inicial ou valores com pouca concordância com valores experimentais. A taxa de armadura tem influência nesse comportamento devido à interação correspondente entre concreto e aço, o que pode ser constatado um panorama de fissuração localizada entre as cargas aplicadas. Por consequência, o modelo não é capaz de capturar o processo real de danificação, sendo preservado o módulo de elasticidade inicial do concreto. Por outro lado, afirma-se que para vigas com taxas de armadura superiores às mínimas, é suficiente para que o modelo proposto seja capaz de produzir bons resultados, principalmente em regime de serviço ou em regiões precedentes ao pico de carregamento.

Logo, a partir das análises realizadas, verificou-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado, indicando relevância sobre a aplicação de uma formulação baseada na Mecânica do Dano no Contínuo para casos práticos da Engenharia Estrutural. A proposta alternativa para o cálculo de deslocamentos apresentou-se promissora sobre a perspectiva da metodologia vigente preconizada pelas normativas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318R (2014).

Ainda neste contexto, a norma americana apresentou um comportamento muito similar à brasileira, podendo observar valores pouco superiores de deflexão estimada, e que, vigas com domínios maiores que 3, a diferença se torna praticamente nula. Este comportamento semelhante entre normas pode ser entendido pela razão que ambas se baseiam nos mesmos critérios científicos, como a aplicação da fórmula de inércia equivalente de Branson (1968) em suas estimativas de deslocamentos. Vale ainda destacar que esta conclusão parte de análises realizadas em peças de concretos convencionais, isto é, uma outra análise em concretos de alta resistência em verificações no Estado Limite de Serviço, por exemplo, é necessária.

O modelo constitutivo de dano de Pituba (2006) foi utilizado nas análises, e tem como características gerais a anisotropia induzida e resposta elástica bimodular. Com sua aplicação, foi permitida a simulação do comportamento das vigas analisadas de maneira bastante satisfatória, fornecendo valores de deslocamentos com proximidade em relação àqueles obtidos experimentalmente, conforme esperado. Neste âmbito, como principal conclusão, é possível afirmar que em virtude de o procedimento prescrito pelas normas técnicas sugerirem uma penalização homogênea do momento de inércia da seção, valores altos de deslocamentos são determinados, enquanto que, o modelo proposto no presente trabalho é capaz de representar o processo de perda de rigidez pela redução do módulo de elasticidade do concreto, ou por outra, é considerado o comportamento não-linear do material, degradando a rigidez progressivamente. Dessa maneira, sendo possível levar em conta a contribuição do concreto tracionado entre fissuras, por consequência, implicando valores de deslocamentos mais próximos do que se configura em um comportamento real.

Por fim, através da convergência das respostas numéricas fornecidas pelo modelo proposto, verifica-se a potencialidade e validação de sua aplicabilidade para o cálculo de estimativas de deslocamentos verticais em vigas de concreto armado. É possível concluir que uma formulação baseada na Mecânica do Dano pode ser uma ferramenta eficiente na modelagem do concreto armado em casos práticos da engenharia de estruturas, como evidenciada sua viabilidade e contribuição.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pelo que foi elaborado ao longo deste trabalho, são citadas algumas sugestões de trabalhos futuros, dessa maneira, podendo progredir na contribuição da pesquisa:

- De início, importante destacar que todos os resultados numéricos foram analisados a partir das vigas levantadas neste trabalho, por consequência, para se ter uma validação mais ampla, faz-se necessário um maior número de aplicações em variados tipos de vigas;
- Desenvolvimento de um programa experimental específico para a comparação de respostas experimentais com o controle de todos os detalhes possíveis;
- Da mesma forma, analisar exemplos quanto à verificação no Estado Limite de Serviço em concretos de alta resistência para ambas as normas;
- Verificação de um modelo constitutivo em combinação com o de dano para que consiga capturar respostas além do regime de serviço, considerando todo o processo de carregamento até a ruptura;

- Em casos de vigas com armadura dupla, realizar uma nova investigação paramétrica da constante (K), a fim de identificar se há alternância no valor aqui determinado;
- Concluiu-se que o modelo proposto apresentou viabilidade, entretanto, para que seja uma metodologia alternativa às vigentes que são preconizadas pelas normativas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318R (2014), é necessário a existência de uma reserva de segurança, de modo que a proposta possa ser aplicada em casos práticos de estruturas reais. Para tanto, análises podem ser realizadas para identificar a proposição de coeficientes de segurança para a presente metodologia.

REFERÊNCIAS

- ABDUSSAMET A.; MUHAMMED G. A simple and robust approach for 2D-simulation of reinforced concrete member. **Structures**, vol. 32, p. 1701-1716, 2021.
- ALMEIDA, F. C. F. **Análise experimental de vigas de concreto armado com estribos plásticos**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, UFPR, Belém, 2016.
- ÁLVARES, M. S. **Estudo de um modelo de dano para o concreto**: formulação, identificação paramétrica e aplicação com emprego do método dos elementos finitos. 1993. 150 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1993.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Structural Concrete (**ACI 318-14**) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (**ACI 318R-14**). Farmington Hills, 2014.
- AMORIM, D. L. N. D. F.; PROENÇA, S. P. B.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. A model of fracture in reinforced concrete arches based on lumped damage mechanics. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 50, n. 24, p. 4070-4079, 2013.
- ANTONIO, L.; SOUZA, F.; MACHADO, R. D. Proposta de modelagem para o concreto fundamentada nas teorias da mecânica do dano contínuo e mecânica da fratura. **Cadernos de Engenharia de Estruturas de São Carlos**, vol. 13, n. 61, p. 33-46, 2011.
- ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BAI, Z. et al. A constitutive model for concrete subjected to extreme dynamic loadings. **International Journal of Impact Engineering**, vol. 138, 2020.
- BAILEY, J. et al. Evidence relating to object-oriented software design: A survey. In: IEEE. Empirical Software Engineering and Measurement, 2007. ESEM 2007. **First International Symposium on**. [S.l.], 2007. p. 482–484.
- BARBAT, A. H. et al. Viscous damage model for timoshenko beam structures. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 34, n. 30, p. 3953-3976, 1997.
- BARROS, J. A. O.; DIAS, S. J. E.; LIMA, J. L. T. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 3, p. 203–217, 2007.

- BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. 1999. 108 f. Dissertação (Mestrado). CPGECC, UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- BEHBAHANI, A. E.; BARROS, J. A. O.; VENTURA-GOUVEIA, A. Plastic-damage smeared crack model to simulate the behaviour of structures made by cement based materials. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 73, p. 20-40, 2015.
- BITENCOURT, L. A. G. et al. Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 159, p. 171–190, 2019.
- BORGES, D. C. **Estudo e avaliação de uma proposta de modelagem do comportamento micromecânico do concreto**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2015.
- BOTTA, A. S. **Cálculo de esforços e deslocamentos em estruturas reticuladas considerando-se a mecânica do dano para a modelagem do concreto armado**. 1998. 121 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1998.
- BRANCO, V. H. L. **Resistência ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado: verificação das longarinas da ponte sobre o Rio Sororó**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado). UFPR, Belém, 2011.
- BRANSON, D. E. Design procedures for computing deflections. **ACI Journal**, vol. 65, n. 9, p. 730-742, 1968.
- BRANSON, D.E. Deflections of reinforced concrete flexural members. **Journal of the American Concrete Institute**, n.6331, p.637-667, 1966.
- BRECCOLOTTI, M. Constitutive modeling of plain concrete subjected to cyclic uniaxial compressive loading. **Construction and Building Materials**, vol. 94, p. 172-180, 2015.
- BRESLER, B.; SCORDELIS, A. C. Shear strength reinforced concrete beams. **ACI Journal**, v. 60, n. 1, p. 51-72, 1963.
- BRIXNER, D. **Análise teórica e experimental de aberturas horizontais em vigas de concreto armado**. 2017. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). UNISC, Santa Cruz do Sul, 2017.
- BYUNG, B.; OH, H. Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel fibers. **Journal of Structural Engineering**, v. 118, n. 10, p. 2821–2835, 1992.
- CARELLI, J. A. **Cisalhamento em vigas de concreto armado com estribos autotravantes**. 2002. 144 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Santa Catarina, 2002.

- CERVERA, M.; OLIVER, J.; MANZOLI, O. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, vol. 25, n. April, p. 987–1010, 1996.
- CERVERA, M.; TESEI, C.; VENTURA, G. Cracking of quasi-brittle structures under monotonic and cyclic loadings: A $d + / d -$ damage model with stiffness recovery in shear. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 135, p. 148–171, 2018.
- CHABOCHE, J. L.; LESNE, M. A non-linear continuous fatigue damage model. **Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.** vol. I, n. 1, p. 1-17, 1988.
- CHANDRAKANTH, S.; PANDEYA, P.C. Damage coupled elasto-plastic finite element analysis of a Timoshenko layered beam. **Computers & Structures**, vol. 69, n. 3, p. 411-420, 1998.
- CHAVES, E.W.V. **Mecânica del daño continuo**: Modelos constitutivos. Universidad de Castilla – La Mancha. Ciudad Real. 2009.
- CIFUENTES, H. et al. A Finite Element-Based Methodology for the Thermo-mechanical Analysis of Early Age Behavior in Concrete Structures. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, vol. 13, n. 1, 2019.
- COELHO, K. O.; FLÓREZ-LÓPEZ, J.; LEONEL, E. D. Modelo de dano concentrado aplicado à modelagem mecânica de estruturas em concreto armado. **CILAMCE 2016**, Brasília, DF, 2016.
- COMI, C.; PEREGO, U. **A bi-dissipative damage model for concrete with applications to dam engineering**. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering – ECOMAS, 2000.
- COMI, C.; PEREGO, U. Fracture energy based bi-dissipative damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 38, p. 6427–6454, 2001.
- COSTA, C. H. A.; STAUT, S. L. S.; ILHA, M. S. O. Projeto de sistemas prediais hidráulicos sanitários com BIM: mapeamento de literatura. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Brasil, p. 2760-2769, 2014.
- COSTA, L. V. **Aperfeiçoamento de metodologia de cálculo dos deslocamentos em peças fissuradas de concreto armado**. 2020. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), UFG, Catalão, 2020.
- COSTA, N. C. D. S. Análise Experimental De Vigas De Concreto Armado Reforçadas a Flexão Com Compósito De Fibra De Carbono – Otimização Da Ancoragem. n. 1, p. 127, 2011.
- CURNIER, A.; HE; Q. ZYSSSET, P. Conewise linear elastic materials. **Journal of Elasticity**, vol. 37, p. 1-38, 1995.
- DEGHENHARD, C. C. et al. Análise experimental de distintas configurações de chapa metálica no reforço à flexão em vigas de concreto armado. **Alconpat**, v. 6, p. 190–201, 2016.
- DEGHENHARD, C. C.; VARGAS, A. Análise experimental da capacidade portante em vigas de concreto armado sujeitas à flexão com reforço metálico colado na face tracionada. **Revista Iniciação Científica**. V. 11, n. 1, 2013.

- DEMIN, W.; FUKANG, H. Investigation for plastic damage constitutive models of the concrete material. **Procedia Engineering**, vol. 210, p. 71–78, 2017.
- DOS SANTOS GOMES, L. D. et al. Experimental analysis of the efficiency of steel fibers on shear strength of beams. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 15, n. 7, 2018.
- FALEIRO, J.; OLLER, S.; BARBAT, A. H. Plastic-damage seismic model for reinforced concrete frames. **Computers and Structures**, vol. 86, n. 7-8, p. 581-597, 2008.
- FANTON, T. et al. Análise experimental de uma viga reforçada com manta de fibra de carbono. **CIRMARE 2020**. V Congresso International na “Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios”. January, 2021.
- FARIA, R.; OLIVER, J.; CERVERA, M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 35, n. 14, p. 1533-1558, 1998.
- FARON, A.; ROMBACH, G. A. Simulation of crack growth in reinforced concrete beams using extended finite element method. **Engineering Failure Analysis**, vol. 116, p. 104698, 2020.
- FEIST, C.; HOFSTETTER, G. An embedded strong discontinuity model for cracking of plain concrete. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 195, n. 52, p. 7115–7138, 2006.
- FERNANDES, M. C.; VARGAS, A. Análise Experimental De Vigas De Concreto Armado Reforçadas a Flexão Com Compósito De Fibra De Carbono. **UNESC**. n. 2, p.16, 2015.
- FERNANDES, S. A. **Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas à flexão**. 1996. 142 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1996.
- FICHANT, S. et al. Continuum damage modelling: Approximation of crack induced anisotropy. **Mechanics Research Communications**, vol. 24, n. 2, p. 109-114, 1997.
- FLÓREZ-LÓPEZ, J.; MARANTE, M. E.; PICÓN, R. **Fracture and damage mechanics for structural engineering of frames: state-of-the-art industrial applications**. [S.l.]: IGI Global, 2015.
- FUGIYAMA, M. M. et al. Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, 2021.
- GERNAY, T./ MILLARD, A.; FRANSSSEN, J. A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation: Theoretical formulation. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 50, n. 22-23, p. 3659-3673, 2013.
- GERNAY, T.; FRANSSSEN, J. M. A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering. **Fire Safety Journal**, vol. 71, p. 268–278, 2015.
- GERNAY, T.; MILLARD, A.; FRANSSSEN, J. M. A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation: Theoretical formulation. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 50, n. 22–23, p. 3659–3673, 2013.

- GUELLO, G. A. **Simulação computacional de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2002.
- HE, W. et al. A thermodynamically consistent nonlocal damage model for concrete materials with unilateral effects. **Computer Methods Applied Mechanics and Engineering**, vol. 297, p. 371–391, 2015.
- HIEN POH, L.; SWADDIWUDHIPONG, S. Over-nonlocal gradient enhanced plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 46, n. 25–26, p. 4369–4378, 2009.
- HORSTEMEYER, M. F.; BAMMANN, D. J. Historical review of internal state variable theory for inelasticity. **International Journal of Plasticity**, vol. 26, n. 9, p. 1310–1334, 2010.
- HUGUET, M. et al. Stress resultant nonlinear constitutive model for cracked reinforced concrete panels. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 176, p. 375-405, 2017.
- HWANG Y. K.; JIN S.; HONG J-W. Fracture simulations using edge-based smoothed finite element method for isotropic damage model via Delaunay/Voronoi dual tessellations. **International Journal of Damage Mechanics**. p. 105678952110405, 2021.
- IBRAHIMBEGOVIC, A. **Nonlinear Solid Mechanics: Theoretical Formulations and Finite Element Solution Methods**. Solid Mechanics and Its Applications. Springer Science & Business Media, vol. 160, 2009.
- JAMALI, S. et al. Reliability-based load-carrying capacity assessment of bridges using structural health monitoring and nonlinear analysis. **Structural Health Monitoring**, vol. 18, n. 1, p. 20-34, 2019.
- JASON, L. et al. An elastic plastic damage formulation for concrete: Application to elementary tests and comparison with an isotropic damage model. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 195, n. 52, p. 7077-7092, 2006.
- JAVANMARDI, M. R.; MAHERI, M. R. Anisotropic Damage Plasticity Model for Concrete and Its Use in Plastic Hinge Relocation in RC Frames with FRP. **Structures**, vol. 12, p. 212-226, 2017.
- JEFFERSON, A. D. et al. A plastic-damage-contact constitutive model for concrete with smoothed evolution functions. **Computers and Structures**, vol. 169, p. 40–56, 2016.
- JIANG, H. et al. Simulation and experimental verification of the non-uniform corrosion cracking process of reinforced mortar specimen. **Construction and Building Materials**, vol. 265, p. 120522, 2020.
- JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de " CFRP "**. 1999. 396 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Porto, 1999.
- KACHANOV, L. M. Time of the rupture process of non-linear solid mechanics. **Otd. Tech, Nauk.**, vol. 8, p. 28–31, 1958.
- KARIHALOO, B. L.; FU, D. An anisotropic damage model for plain concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 35, n. 1-3, p. 205-209, 1990.

- KÖKSAL, H.; KARAKOÇ, C. An isotropic damage model for concrete. **Materials and Structures**, vol. 32, pp. 611-617, 1999.
- KONG, X. et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings. **International Journal of Impact Engineering**, vol. 120, p. 60-78, 2018.
- KOVÁCS, I.; BALÁZS, G. L. Structural behaviour of steel fibre reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 4, n. 2, p. 57-63, 2003.
- Krajcinovic, D. **Damage Mechanics**. North Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. Vol. 41, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- LEMAITRE, J. (1984). How to use damage mechanics. **Nucl. Eng. Des.**, vol. 80, p. 233-245, 1984.
- LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mécanique des matériaux solides**. Paris, Dunod-Bordas, 1985.
- LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of solid materials**, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- LEONHARDT, F.; WALTHER, R. Wandartige Träger. **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton**, v. 178, p. 161-173, 1962.
- LIM, D. H.; OH, B. H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. **Engineering structures**, v. 21, n. 10, p. 937-944, 1999.
- LIMA, M. V. A. **Um modelo para a flexão de placas de concreto armado utilizando a mecânica do dano**. 2013. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental- PPECEA, Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 2013.
- LIU, J. et al. The use of visco-elastoplastic damage constitutive model to simulate nonlinear behavior of concrete. **Acta Mechanica Sinica**, vol. 24, n. 5, p. 411-428, 2011.
- LUBLINER, J. et al. A Plastic-Damage Model for Concrete. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 25, p. 299-329, 1989.
- LUCCIONI, B. M. **Formulación de un modelo constitutivo para materiales ortótropos**. 1993. 520 f. Tese (Doutorado), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel, 1993.
- LUCCIONI, B.; Oller, S.; DANESI, R. Coupled Plastic-Damage Model. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 129, No. 1-2, p. 81-90. 1996.
- MARANTE, M. E.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. Three-dimensional analysis of reinforced concrete frames based on lumped damage mechanics. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 40, n. 19, p. 5109-5123, 2003.
- MARTINELLI, E.; PEPE, M.; FRATERNALI, F. Meso-scale formulation of a cracked-hinge model for hybrid fiber-reinforced cement composites. **Fibers**, vol. 8, n. 9, p. 1-13, 2020.
- MATIAS, B. S. **Modelo constitutivos para análise dinâmica não linear de pórticos planos de concreto armado**. 2018. 137 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, UFC, Fortaleza, 2018.

- MAZARS, J. **Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure**. 1984. 283 f. Tese (Doutorado), Université Paris 6, 1984.
- MAZARS, J. et al. A Model to Forecast the Response of Concrete under Severe Loadings the μ Damage Model. **Procedia Materials Science**, vol. 3, p. 979-984, 2014.
- MAZARS, J.; PIJAUDIER-CABOT, G. Continuum damage theory – application to concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 115, n. 2, p. 345–365, 1989.
- MESCHKE, G.; LACKNER, R.; MANG, H.A. An anisotropic elastoplastic-damage model for plain concrete. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, vol. 42, p. 703-727, 1998.
- MIHAI, L. C.; JEFFERSON, A. D.; LYONS, P. A plastic-damage constitutive model for the finite element analysis of fibre reinforced concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 159, p. 35-62, 2016.
- MORAIS, M. C. **Reforço de vigas de concreto**. 1997. 239 f. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- MURAKAMI, S. **Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture**. 1 ed. New York, Springer, 2012.
- NAJJAR, Y. M. et al. Elasto-plastic constitutive modeling of plain concrete and an optimization procedure for parameter evaluation. **Computers and Geotechnics**, vol. 9, p. 185-208, 1990.
- NECHNECH W.; MEFTAH, F.; REYNOUARDA, J. M. An elasto-plastic damage model for plain concrete subjected to high temperatures. **Engineering Structures**, vol. 24, n. 5, p. 597-611, 2002.
- NOGUEIRA, C. G. Modelo Mecânico para Estruturas Lineares em Concreto Armado – uma Abordagem Acoplada entre a Mecânica do Dano e Algoritmos de Otimização. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, vol. 12, n. 2, p. 14-27, 2012.
- NOGUEIRA, C. G. **Um modelo de confiabilidade e otimização aplicado às estruturas de barras de concreto armado**. 2005. 166 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005.
- NORA, J. B. **Análise experimental do concreto têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2018. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). UFRGS, Porto Alegre, 2018.
- OLIVEIRA, H. R. S. **Estudo sobre a deformabilidade de vigas fissuradas de concreto armado**. 2017. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), UFG, Catalão, 2017.
- OLIVEIRA, J. M. J. **Mecânica do dano concentrado expandida para meios bidimensionais: elemento finito para problemas de localização de deformações em chapas**. 2020. 113 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.
- ORTIZ, M. A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete. **Mechanics of Materials**, vol. 4, pp. 67-93, 1985.

- PAPA, E.; TALIERCIO. Anisotropic damage model for the multiaxial static and fatigue behaviour of plain concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 55, n. 2, p. 163-179, 1996.
- PEREIRA JUNIOR, W. M. ; ARAUJO, D. L. ; PITUBA, J. J. C.. Numerical analysis of steel-fiber-reinforced concrete beams using damage mechanics. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, p. 153-191, 2016.
- PEREIRA JUNIOR, W. M. ; BORGES, A. R. ; ARAUJO, D. L. ; PITUBA, J. J. C.. A proposal to use the inverse problem for determining parameters in a constitutive model for concrete. **Soft Computing**, v. 25, p. 8797-8815, 2021.
- PEREIRA JUNIOR, W. M. **Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano**. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2014.
- PETERSEN, K. et al. Systematic mapping studies in software engineering. In: EASE. [S.l.: s.n.], 2008. vol. 8, p. 68–77.
- PIJAUDIER-CABOT, G.; BAZANT, Z. P. Nonlocal continuum damage, localization instability and convergence. **Journal of Applied Mechanics**, ASCE, vol. 55, p. 755-767, 1988.
- PIJAUDIER-CABOT, G.; MAZARS, J. **Damage Models for Concrete**, Handbook of Materials Behavior Models. vol. II, p. 500-512, 2001.
- PINTO, R. C. A. (2001). **Relatório de Ensaio Experimental enviado à empresa Fischer Inovações Ltda**. Florianópolis, SC.
- PITUBA, J. J. C. Damage-Based Approach for bimodular and anisotropic materials. **Revista chilena de ingeniería**, vol. 27, p. 69–82, 2019.
- PITUBA, J. J. C. **Estudo e aplicação de modelos para concreto fundamentados na mecânica do dano contínuo**. 1998. 151 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1998.
- PITUBA, J. J. C. Formulation of damage models for bimodular and anisotropic media. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, vol. 3, p. 7-29, 2006.
- PITUBA, J. J. C. **Sobre a formulação de um modelo de dano para concreto**. 2003. 189 f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2003.
- PITUBA, J. J. C., DELALIBERA, R. G. e RODRIGUES, F. S. Numerical and statistical analysis about displacements in reinforced concrete beams using damage mechanics. **Computers and Concrete, an International Journal**, vol. 10, n.3, p. 307-330, 2012.
- PITUBA, J. J. C.; DELALIBERA, R. G. Evaluation of deflection in reinforced concrete structures using damage mechanics. **Ibracon Structures and Materials Journal**, vol.7, n.1, p.68-99. 2014.
- PITUBA, J. J. C.; FERNANDES, G. R. An Anisotropic Damage Model for Concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 137, pp 610-624, 2011.

- PITUBA, J. J. C.; LACERDA, M. M. S. Simplified damage models applied in the numerical analysis of reinforced concrete structures. **Ibracon Structures and Materials Journal**, vol. 5, n. 1, p. 26–37, 2012.
- PITUBA, J. J. C.; PEREIRA JÚNIOR, W. M. A bi-dissipative damage model for concrete. **Ibracon Structures and Materials Journal**, vol. 8, n. 1, p. 49-65, 2015.
- PIVATTO, A. B. et al. Análise experimental de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas a flexão por CRFC. **Revista de Engenharia Civil IMED**. v. 7, n. 2, p. 1–19, 2020.
- PRÖCHTEL, P.; HÄUBLER-COMBE, U. On the dissipative zone in anisotropic damage models for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 45, n. 16, p. 4384-4406, 2008.
- PROENÇA, S. P. B. **Introdução à mecânica do dano e faturamento**: mecanismos de deformação e ruptura. 2000. 18 f. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.
- RABI, M.; CASHELL, K. A.; SHAMASS, R. Flexural analysis and design of stainless steel reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, vol. 198, p. 109432, 2019.
- RABOTNOV, Y. N. Creep problems in structural members. **Journal of applied mechanics**, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 37(1), 249, 1969.
- RAMTANI, S. (1990). **Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilatéral**. 1990. Tese (Doutorado), Université Paris 6, 1990.
- RESENDE, L. **Constitutive modelling and finite element analysis in geomechanics**. 1984. Tese (Doutorado), University of Cape Town, 1984.
- ROCHA, M. J. M. A. **Efeito da resistência ao cisalhamento do concreto na flexão de lajes de concreto armado**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGCEA/UEFS, Feira de Santana, 2017.
- RODRIGUES, E. A.; MANZOLI, O. L. **Um modelo constitutivo de dano combinado para simular o comportamento de materiais quase-frágeis**. In: Iv Seminário Da Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica – Unesp, 2011, Bauru, p. 1-16.
- SANTOS, E. W. F. **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- SARIKAYA, A.; ERKMEN, R. E. A plastic-damage model for concrete under compression. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 150, p. 584–593, 2019.
- SCOTTA, R. et al. A scalar damage model with a shear retention factor for the analysis of reinforced concrete structures: theory and validation. **Computers & Structures**, vol. 79, n. 7, p. 737-755, 2001.
- SOUZA, L. A. F. Modelagem numérica computacional de viga de concreto armado com acoplamento de teorias. **VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, vol. 22, p. 43-58, 2012.
- TANG, X. S. et al. Damage analysis and numerical simulation for failure process of a reinforced concrete arch structure. **Computers & Structures**, vol. 83, n. 31-32, p. 2609-2631, 2005.

- TAO, X.; PHILLIPS, D. V. A simplified isotropic damage model for concrete under bi-axial stress states. **Cement and Concrete Composites**, vol. 27, n. 6, p. 716-726, 2005.
- TELES, D. V. C.; OLIVEIRA, M. C.; AMORIM, D. L. N. F. A simplified lumped damage model for reinforced concrete beams under impact loads. **Engineering Structures**, vol. 205, p. 110070, 2020.
- TRONG N. et al. A novel approach to the complete stress strain curve for plastically damaged concrete under monotonic and cyclic loads. **Computers and Concrete**, vol. 28, n. 1, p. 39–53, 2021.
- UCHOA, B. C. L. **Estimativa da rigidez à flexão em vigas de concreto simples por meio da teoria do dano concentrado**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia Programa De Pós-Graduação Em Recursos Hídricos E Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2017.
- VARES, R. S. **Estudo do reforço à flexão de vigas biapoiadas em concreto armado com barras de fibra de vidro**. 2019. 168 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). UFRGS, Porto Alegre, 2019.
- VARGAS, A.; DE OLIVEIRA, B. B. Análise experimental da influência da alternância na inclinação de estribos na capacidade portante em vigas de concreto armado. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc - CIVILTEC**, v. 6, n. 3, p. 16, 2021.
- VIEIRA, M. M. et al. Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 123–152, 2016.
- VILPPO, J. Anisotropic damage model for concrete and other quasi-brittle materials. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 225, 2021.
- WARDEH, M. A.; TOUTANJI, H. A. Parameter estimation of an anisotropic damage model for concrete using genetic algorithms. **International Journal of Damage Mechanics**, vol. 26, n. 6, p. 801–825, 2017.
- WU, J.; CERVERA, M. A novel positive/negative projection in energy norm for the damage modeling of quasi-brittle solids. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 139-140, p. 250-269, 2018.
- WU, J.; CERVERA, M. A thermodynamically consistent plastic-damage framework for localized failure in quasi-brittle solids: Material model and strain localization analysis. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 88-89, p. 227-247, 2016.
- WU, J.; XU, S. An augmented multicroack elastoplastic damage model for tensile cracking. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 48, N. 18, p. 2511-2528, 2011.
- YAZDANI, S.; SCHREYER, H. L.; An anisotropic damage model with dilatation for concrete. **Mechanics of Materials**, vol. 7, n. 3, p. 231-244. 1988.
- ZHENG, Q. et al. Failure mechanism of different types of shotcrete based on modified Weibull distribution model. **Construction and Building Materials**, vol. 224, p. 306-316, 2019.

ANEXO A - RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS: PROPOSTA DE COSTA (2020)

A.1 INTRODUÇÃO

Por meio de tabelas e gráficos serão apresentados os cálculos e resultados das estimativas de deslocamentos perante as vigas experimentalmente ensaiadas, que foram encontradas em bibliografias e apresentadas na Tab. (4.3).

A.2 JUVANDES (1999) – VIGA B4

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
150	7,5	15	2109,3750	4,496	7,214	755,9881	3,57	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
1,507	11,47	200000	7,5	31,7	0,28125	3	0,494923059	7,805

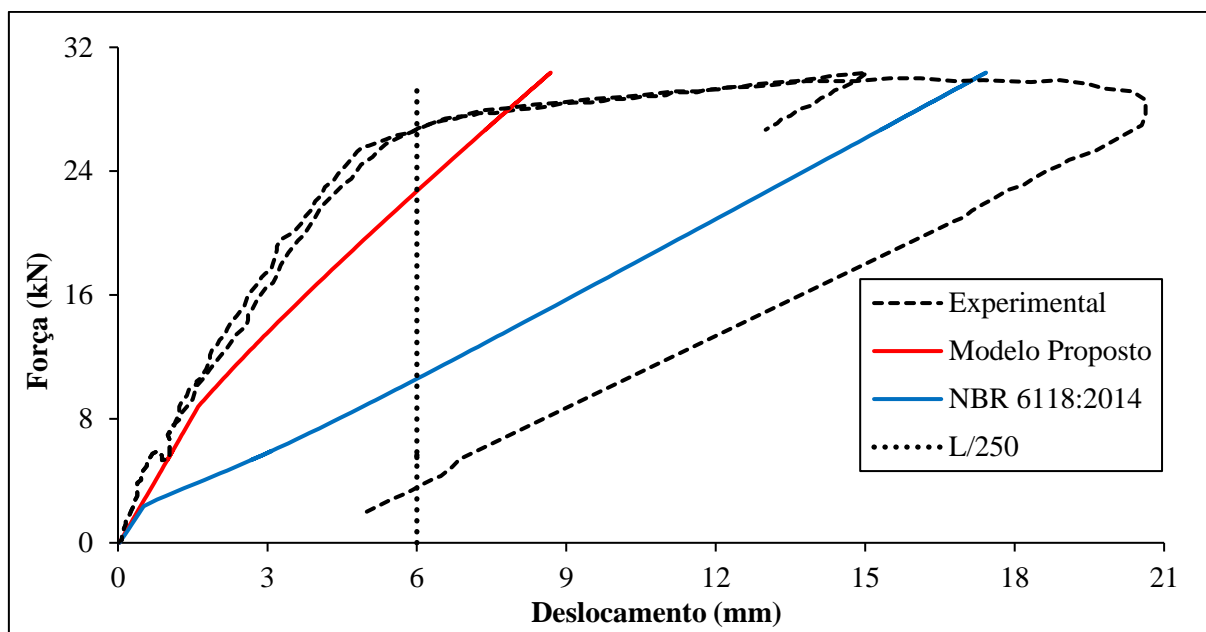
<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,2643
4,5000	27722,34954	<i>X3 (cm)</i>	5,677
1,2677	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,494923059
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,879	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,300488205
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		31530	2,103417436

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,07910156	-28,2328128	31529,5417	0,027875643	2,11E+07	0,031703887	0,00	0,00
0,17001065	-12,8682972	31529,5417	0,060624222	2,11E+07	0,068949926	0,07672787	0,18181818
0,35182884	-5,95935116	31529,5417	0,126121381	2,11E+07	0,143442003	0,076926905	0,54545455
0,47304096	-4,30388876	31529,5417	0,169786154	2,11E+07	0,193103388	0,115373771	0,78787879
0,53364702	-3,75815111	31529,5417	0,19161854	2,11E+07	0,21793408	0,115440115	0,90909091
0,68516217	-2,81614877	31529,5417	0,246199506	2,11E+07	0,280010811	0,153920154	1,21212121
0,77607126	-2,42747163	31529,5417	0,278948085	2,11E+07	0,31725685	0,154019671	1,39393939
0,86698035	-2,12028566	31529,5417	0,311696664	2,11E+07	0,354502888	0,192433365	1,57575758
0,98819247	-1,79859608	31529,5417	0,355361437	2,11E+07	0,404164273	0,230880231	1,81818182
1,13970762	-1,49266985	31529,5417	0,409942402	2,11E+07	0,466241004	0,269360269	2,12121212
1,26091974	-1,300837	31529,5417	0,453607175	2,11E+07	0,515902388	0,307807135	2,36363636
1,47304096	-1,04104628	31529,5417	0,530020527	1,62E+07	0,785591648	0,346353519	2,78787879
1,59425308	-0,92360687	31529,5417	0,573685299	1,44E+07	0,958151303	0,384800385	3,03030303
1,7154652	-0,82274573	31529,5417	0,617350072	1,30E+07	1,137409209	0,384933075	3,27272727
1,83667732	-0,7351806	31529,5417	0,661014844	1,20E+07	1,320428947	0,385065764	3,51515152
2,0184955	-0,62352319	31529,5417	0,726512003	1,09E+07	1,597215926	0,385264799	3,87878788
2,10940459	-0,57490037	31529,5417	0,759260582	1,05E+07	1,735209265	0,461992669	4,06060606
2,23061671	-0,51622297	31529,5417	0,802925355	1,00E+07	1,917819932	0,462125359	4,3030303
2,3215258	-0,47622734	31529,5417	0,835673934	9,76E+06	2,053397739	0,462224876	4,48484848
2,4124349	-0,43923891	31529,5417	0,868422514	9,52E+06	2,187607508	0,50063857	4,66666667
2,56395005	-0,38340541	31529,5417	0,923003479	9,20E+06	2,408027562	0,577432784	4,96969697

2,7154652	-0,33378499	31529,5417	0,977584445	8,94E+06	2,624287683	0,577598647	5,27272727
2,86698035	-0,28939259	31529,5417	1,032165411	8,73E+06	2,836501383	0,654392861	5,57575758
2,95788944	-0,2649324	31529,5417	1,06491399	8,63E+06	2,961986469	0,692806555	5,75757576
3,04879853	-0,24192526	31529,5417	1,097662569	8,53E+06	3,086167896	0,807848601	5,93939394
2,89728338	-0,2810693	31529,5417	1,043081604	8,69E+06	2,878478766	0,884311091	5,63636364
2,74576823	-0,32451596	31529,5417	0,988500638	8,89E+06	2,66704763	0,884145229	5,33333333
2,77607126	-0,31544861	31529,5417	0,999416831	8,85E+06	2,709647018	0,99912093	5,39393939
2,83667732	-0,29789304	31529,5417	1,021249218	8,77E+06	2,794371795	1,037501451	5,51515152
2,89728338	-0,2810693	31529,5417	1,043081604	8,69E+06	2,878478766	1,037567796	5,63636364
3,0184955	-0,24944096	31529,5417	1,086746376	8,56E+06	3,044914685	1,037700486	5,87878788
3,13970762	-0,22024498	31529,5417	1,130411149	8,45E+06	3,209115424	1,037833176	6,12121212
3,29122277	-0,18676109	31529,5417	1,184992114	8,33E+06	3,411479463	1,037999038	6,42424242
3,4124349	-0,16210478	31529,5417	1,228656887	8,25E+06	3,571264403	1,038131728	6,66666667
3,56395005	-0,13363082	31529,5417	1,283237853	8,17E+06	3,768623789	0,999983414	6,96969697
3,62455611	-0,12290411	31529,5417	1,305070239	8,14E+06	3,846889655	1,038363935	7,09090909
3,77607126	-0,09758493	31529,5417	1,359651204	8,07E+06	4,041011322	1,11515815	7,39393939
3,98819247	-0,06534997	31529,5417	1,436064556	7,99E+06	4,309462276	1,153704533	7,81818182
4,10940459	-0,04841392	31529,5417	1,479729329	7,96E+06	4,461331191	1,192151399	8,06060606
4,29122277	-0,02479047	31529,5417	1,545226488	7,91E+06	4,687308369	1,23066461	8,42424242
4,47304096	-0,00307217	31529,5417	1,610723646	7,87E+06	4,911350401	1,230863645	8,78787879
4,59425308	0,010459981	31199,7433	1,671876212	7,84E+06	5,059761894	1,269310511	9,03030303
4,68516217	0,020153854	30894,09993	1,721838683	7,83E+06	5,170619037	1,307724204	9,21212121
4,83667732	0,035508377	30409,97885	1,805840426	7,80E+06	5,354594835	1,384518419	9,51515152
5,0184955	0,052722469	29867,22642	1,907798996	7,78E+06	5,574195386	1,42303163	9,87878788
5,10940459	0,060875112	29610,17731	1,959232181	7,77E+06	5,68356334	1,4997595	10,06060601
5,20031368	0,068746002	29362,01176	2,010957575	7,76E+06	5,792666909	1,57648737	10,2424242
5,29122277	0,07634966	29122,27191	2,062967747	7,75E+06	5,901522345	1,576586887	10,4242424
5,38213187	0,083699627	28890,53083	2,11525554	7,74E+06	6,01014473	1,653314757	10,6060606
5,50334399	0,093126679	28593,30018	2,185392566	7,73E+06	6,154636108	1,691761623	10,8484848
5,68516217	0,106523546	28170,9031	2,291466511	7,71E+06	6,370708702	1,76858901	11,2121212
5,83667732	0,117058954	27838,72653	2,380625917	7,70E+06	6,550217828	1,807069048	11,5151515
5,95788944	0,125107191	27584,9693	2,452434273	7,69E+06	6,69349798	1,807201738	11,7575758
6,04879853	0,130934979	27401,22183	2,506562381	7,68E+06	6,800781422	1,845615432	11,9393939
6,13970762	0,136592961	27222,82826	2,560917583	7,68E+06	6,907922704	1,845714949	12,1212121
6,29122277	0,145665576	26936,77284	2,6520004	7,67E+06	7,086196409	1,884194988	12,4242424
6,4124349	0,152620286	26717,49402	2,725295365	7,66E+06	7,228568575	1,96095603	12,6666667
6,50334399	0,15766924	26558,30283	2,780509387	7,66E+06	7,335213816	1,999369724	12,8484848
6,62455611	0,164189614	26352,71841	2,854443304	7,65E+06	7,477240248	2,03781659	13,0909091
6,74576823	0,170480148	26154,38077	2,928728136	7,65E+06	7,619087464	2,114577632	13,3333333
6,83667732	0,175054568	26010,15141	2,984666153	7,65E+06	7,725362512	2,152991325	13,5151515
6,98819247	0,182419524	25777,9377	3,078311861	7,64E+06	7,902291214	2,191471364	13,8181818
7,20031368	0,192220744	25468,90975	3,210259495	7,63E+06	8,149611956	2,268331924	14,2424242
7,4124349	0,201473473	25177,17543	3,343150527	7,63E+06	8,396533587	2,383506659	14,6666667
7,74576823	0,215013669	24750,25927	3,553784815	7,62E+06	8,783846856	2,537128261	15,3333333
8,07910156	0,22746477	24357,68175	3,766495709	7,61E+06	9,170415906	2,614121511	16

8,44273793	0,239957228	23963,80026	4,000755036	7,61E+06	9,591410575	2,806090461	16,7272727
8,65485914	0,246774158	23748,8656	4,138411249	7,60E+06	9,836691758	2,882951021	17,1515152
8,77607126	0,2505263	23630,56229	4,217390242	7,60E+06	9,976763639	2,959712063	17,3939394
8,89728338	0,254179583	23515,37595	4,29659442	7,60E+06	10,11677522	3,074787282	17,6363636
9,10940459	0,260346816	23320,92593	4,435729154	7,60E+06	10,36165976	3,113333665	18,0606061
9,29122277	0,265416757	23161,073	4,555505975	7,59E+06	10,5714332	3,151846876	18,4242424
9,53364702	0,271886874	22957,07317	4,715926379	7,59E+06	10,85096374	3,190426432	18,9090909
9,65485914	0,275004745	22858,76814	4,796435073	7,59E+06	10,99066255	3,190559122	19,1515152
9,86698035	0,280283995	22692,31581	4,937789345	7,59E+06	11,23503695	3,267419681	19,5757576
10,0487985	0,284638932	22555,00662	5,059407543	7,59E+06	11,44440757	3,459189597	19,9393939
10,2003137	0,288154493	22444,16259	5,161069519	7,59E+06	11,618822	3,574297988	20,2424242
10,4124349	0,292911931	22294,16275	5,303861945	7,58E+06	11,86291526	3,689472724	20,6666667
10,56395	0,296198432	22190,54088	5,406180718	7,58E+06	12,03720945	3,727952762	20,969697
10,8366773	0,301893392	22010,98139	5,591014554	7,58E+06	12,35082624	3,881508019	21,5151515
10,9881925	0,304941047	21914,89024	5,694056817	7,58E+06	12,52499945	3,919988058	21,8181818
11,1094046	0,307322338	21839,80925	5,776669521	7,58E+06	12,66430995	3,958434924	22,0606061
11,2912228	0,310803361	21730,05416	5,900880636	7,58E+06	12,87323137	4,073576487	22,4242424
11,56395	0,315830523	21571,55004	6,087837854	7,58E+06	13,18652026	4,150503392	22,969697
11,8063743	0,32011485	21436,46718	6,254648135	7,58E+06	13,46491261	4,342339653	23,4545455
11,9881925	0,323220899	21338,5349	6,380131321	7,58E+06	13,67365742	4,41916704	23,8181818
12,2609197	0,327717476	21196,75987	6,568942556	7,57E+06	13,98670107	4,572722297	24,3636364
12,473041	0,331087203	21090,51392	6,716269526	7,57E+06	14,23012271	4,687897033	24,7878788
12,7154652	0,334809407	20973,15453	6,885136721	7,57E+06	14,50826263	4,803104941	25,2727273
12,8669804	0,337069243	20901,90295	6,990939995	7,57E+06	14,6820715	4,918213332	25,5757576
12,8972834	0,33751527	20887,83993	7,012124391	7,57E+06	14,71683075	5,033189033	25,6363636
13,0184955	0,339280036	20832,19767	7,096940247	7,57E+06	14,8558596	5,224892604	25,8787879
13,1094046	0,340583677	20791,09446	7,160633612	7,57E+06	14,96012289	5,378248827	26,0606061
13,2306167	0,342295957	20737,10705	7,245665449	7,57E+06	15,09912983	5,569952398	26,3030303
13,3215258	0,343561177	20697,21523	7,309518989	7,57E+06	15,20337721	5,876565325	26,4848485
13,473041	0,345634682	20631,83857	7,416091399	7,57E+06	15,37710845	6,029987892	26,7878788
13,6245561	0,347665463	20567,80898	7,52284862	7,57E+06	15,5508224	6,298352988	27,0909091
13,7760713	0,349654928	20505,08207	7,629787862	7,57E+06	15,72451979	6,566718084	27,3939394
13,8366773	0,350439449	20480,34647	7,672613918	7,57E+06	15,79399428	6,834983663	27,5151515
13,8669804	0,350829338	20468,05346	7,694037652	7,57E+06	15,82873059	7,103216069	27,5757576
13,9578894	0,351989641	20431,46963	7,758351431	7,57E+06	15,93293583	7,256572291	27,7575758
13,9578894	0,351989641	20431,46963	7,758351431	7,57E+06	15,93293583	7,563085701	27,7575758
14,0184955	0,352755475	20407,32325	7,801262558	7,57E+06	16,00240298	7,793037103	27,8787879
14,0791016	0,353515239	20383,36822	7,844201715	7,57E+06	16,07186777	8,061302682	28
14,1094046	0,35389287	20371,46169	7,865681755	7,57E+06	16,10659929	8,367849264	28,0606061
14,1700107	0,354643678	20347,78908	7,908662658	7,57E+06	16,1760606	8,636114843	28,1818182
14,2609197	0,355758894	20312,62682	7,973185779	7,57E+06	16,28024834	8,904413594	28,3636364
14,2912228	0,356127738	20300,99734	7,994707213	7,57E+06	16,31497648	9,172646	28,4242424
14,2912228	0,356127738	20300,99734	7,994707213	7,57E+06	16,31497648	9,47915941	28,4242424
14,3518288	0,356861139	20277,87355	8,037770559	7,57E+06	16,38443112	9,747424989	28,5454545
14,4124349	0,357588883	20254,9281	8,080861081	7,57E+06	16,45388361	9,900748039	28,6666667

14,4124349	0,357588883	20254,9281	8,080861081	7,57E+06	16,45388361	10,1306331	28,6666667
14,4427379	0,357950657	20243,52155	8,102416487	7,57E+06	16,48860905	10,36055133	28,7272727
14,503344	0,35867005	20220,83941	8,145547496	7,57E+06	16,55805838	10,55218855	28,8484848
14,503344	0,35867005	20220,83941	8,145547496	7,57E+06	16,55805838	10,82038779	28,8484848
14,533647	0,359027687	20209,56329	8,167123063	7,57E+06	16,59278226	11,01199184	28,9090909
14,6245561	0,360092461	20175,99145	8,231889797	7,57E+06	16,69695087	11,12703389	29,0909091
14,6245561	0,360092461	20175,99145	8,231889797	7,57E+06	16,69695087	11,35691894	29,0909091
14,6245561	0,360092461	20175,99145	8,231889797	7,57E+06	16,69695087	11,62511818	29,0909091
14,7154652	0,361145206	20142,79887	8,296716208	7,57E+06	16,80111498	11,81678858	29,2727273
14,7154652	0,361145206	20142,79887	8,296716208	7,57E+06	16,80111498	12,04667363	29,2727273
14,7760713	0,361840463	20120,87773	8,339966736	7,57E+06	16,87055528	12,23831086	29,3939394
14,8063743	0,362186144	20109,97857	8,361601824	7,57E+06	16,90527471	12,39160074	29,4545455
14,8063743	0,362186144	20109,97857	8,361601824	7,57E+06	16,90527471	12,50654327	29,4545455
14,8669804	0,362873649	20088,30184	8,404891564	7,57E+06	16,97471215	12,69818049	29,5757576
14,8972834	0,36321549	20077,52376	8,426546182	7,57E+06	17,00943017	12,85147037	29,6363636
14,9275864	0,363556066	20066,78556	8,448207276	7,57E+06	17,04414772	13,0813886	29,6969697
14,9578894	0,363895385	20056,08699	8,469874831	7,57E+06	17,07886481	13,31130683	29,7575758
14,9881925	0,364233455	20045,4278	8,491548828	7,57E+06	17,11358145	13,61785341	29,8181818
15,0487985	0,364905877	20024,22664	8,534916087	7,57E+06	17,18301336	13,88611899	29,9393939
15,0791016	0,365240244	20013,68419	8,556609317	7,57E+06	17,21772865	14,07772304	30
15,1397076	0,365905328	19992,71442	8,600014894	7,57E+06	17,28715791	14,26936027	30,1212121
15,1700107	0,366236058	19982,28662	8,621727211	7,57E+06	17,32187188	14,42265015	30,1818182
15,2003137	0,366565592	19971,89659	8,643445858	7,57E+06	17,35658543	14,69088255	30,2424242
15,2609197	0,367221094	19951,22892	8,686902081	7,57E+06	17,42601123	15,03577648	30,3636364
15,0791016	0,365240244	20013,68419	8,556609317	7,57E+06	17,21772865	14,88232074	30
14,9578894	0,363895385	20056,08699	8,469874831	7,57E+06	17,07886481	14,76724553	29,7575758
14,8063743	0,362186144	20109,97857	8,361601824	7,57E+06	16,90527471	14,57550878	29,4545455
14,6851622	0,360795614	20153,82135	8,275100803	7,57E+06	16,7663941	14,38380521	29,2121212
14,533647	0,359027687	20209,56329	8,167123063	7,57E+06	16,59278226	14,26869682	28,9090909
14,4427379	0,357950657	20243,52155	8,102416487	7,57E+06	16,48860905	14,1153406	28,7272727
14,2003137	0,355016873	20336,0224	7,930163482	7,57E+06	16,21079041	13,92350434	28,2424242
14,1094046	0,35389287	20371,46169	7,865681755	7,57E+06	16,10659929	13,73183394	28,0606061
14,0184955	0,352755475	20407,32325	7,801262558	7,57E+06	16,00240298	13,61679189	27,8787879
13,8669804	0,350829338	20468,05346	7,694037652	7,57E+06	15,82873059	13,5016835	27,5757576
13,7457682	0,349260275	20517,5253	7,608385583	7,57E+06	15,6897816	13,30997993	27,3333333
13,6245561	0,347665463	20567,80898	7,52284862	7,57E+06	15,5508224	13,23321889	27,0909091
13,533647	0,346452041	20606,06762	7,458772268	7,57E+06	15,44659606	13,11817684	26,9090909
13,4124349	0,344810488	20657,82504	7,373440098	7,57E+06	15,30761807	13,00310162	26,6666667



A.3 JUVANDES (1999) – VIGA B6

L (cm)	b_w (cm)	h (cm)	I_c (cm ⁴)	X_2 (cm)	αe	I_2 (cm ⁴)	ϵ_{st} (‰)	ϵ_{cc} (‰)
150	7,5	15	2109,3750	4,596	7,647	787,2603	2,90	3,50
A_s (cm ²)	d (cm)	E_s (MPa)	Y_t (cm)	F_{ck} (MPa)	g (kN/m)	Domínio	β_x	X_1 (cm)
1,507	11,47	200000	7,5	28,7	0,28125	3	0,546657177	7,825

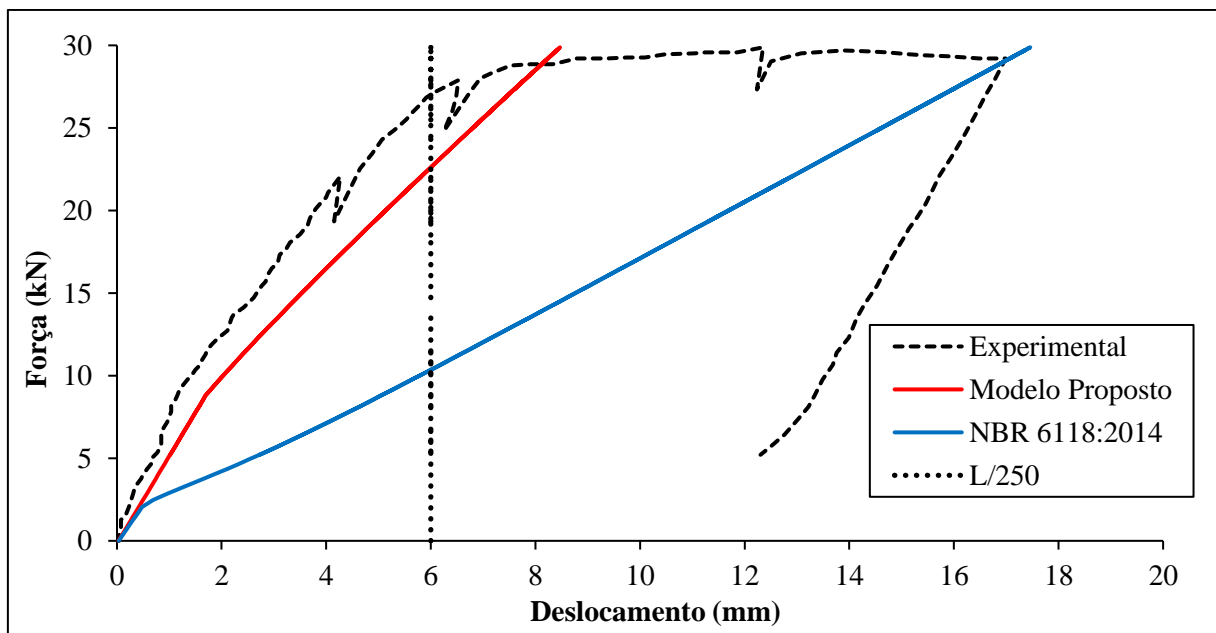
Mr Modelo (kN.m)	Ecs (MPa)	Fcd (kN/cm²)	2,0500
4,5000	26152,96493	X3 (cm)	6,270
1,1864	ai	A	0,546657177
Mr NBR (kN.m)	0,872	Fct,m (kN/cm²)	0,281217614
csd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)	43,5	Eci (Mpa)	Fct,inf (MPa)
		30001	1,968523298

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
Ma (kN.m)	Dano	E (MPa)	δ (mm)	I_{eq} (mm ⁴)	δ (mm)	δ (mm)	Carga (kN)
0,07910156	-25,3416048	30000,53333	0,029296354	2,11E+07	0,033606371	0	0
0,07910156	-25,3416048	30000,53333	0,029296354	2,11E+07	0,033606371	0,038314176	0,00
0,23061671	-8,3973023	30000,53333	0,086659095	2,11E+07	0,099408197	0,038480038	0,3030303
0,50334399	-3,60395416	30000,53333	0,18991203	2,11E+07	0,217851482	0,077092767	0,84848485
0,7154652	-2,40209636	30000,53333	0,270219868	2,11E+07	0,309974038	0,077324974	1,27272727
0,80637429	-2,08054192	30000,53333	0,304637512	2,11E+07	0,349455133	0,154052844	1,45454545
0,95788944	-1,68020887	30000,53333	0,362000254	2,11E+07	0,415256959	0,192532882	1,75757576
1,10940459	-1,38918071	30000,53333	0,419362995	2,11E+07	0,481058784	0,231012921	2,06060606
1,3215258	-1,09379079	30000,53333	0,499670833	1,74E+07	0,693328778	0,269559304	2,48484848
1,50334399	-0,9068947	30000,53333	0,568506122	1,44E+07	0,957249269	0,308072515	2,84848485
1,7154652	-0,73886856	30000,53333	0,64881396	1,22E+07	1,282016736	0,346618898	3,27272727
1,95788944	-0,59135973	30000,53333	0,740594346	1,08E+07	1,657096245	0,461826807	3,75757576
2,07910156	-0,53048213	30000,53333	0,786484539	1,03E+07	1,842419129	0,500273673	4
2,26091974	-0,45137854	30000,53333	0,855319829	9,78E+06	2,115555331	0,57710106	4,36363636

2,4124349	-0,39454462	30000,53333	0,91268257	9,45E+06	2,338172083	0,653895275	4,66666667
2,56395005	-0,34440853	30000,53333	0,970045311	9,18E+06	2,556203742	0,654061137	4,96969697
2,74576823	-0,29152521	30000,53333	1,038880601	8,94E+06	2,812121443	0,7692027	5,33333333
2,95788944	-0,23801456	30000,53333	1,119188439	8,73E+06	3,103590487	0,84606326	5,75757576
3,17001065	-0,1916347	30000,53333	1,199496277	8,57E+06	3,388442883	0,846295467	6,18181818
3,38213187	-0,15104393	30000,53333	1,279804114	8,44E+06	3,66771094	0,846527674	6,60606061
3,68516217	-0,10111762	30000,53333	1,394529597	8,31E+06	4,058755544	0,961801927	7,21212121
3,98819247	-0,05872884	30000,53333	1,50925508	8,22E+06	4,442414799	1,038762004	7,81818182
4,17001065	-0,03623002	30000,53333	1,578090369	8,18E+06	4,669776987	1,038961039	8,18181818
4,35182884	-0,0155949	30000,53333	1,646925659	8,14E+06	4,895374533	1,115788426	8,54545455
4,47304096	-0,00276131	30000,53333	1,692815852	8,12E+06	5,044913469	1,154235292	8,78787879
4,65485914	0,015248553	29543,06859	1,788929732	8,09E+06	5,268088104	1,192748503	9,15151515
4,80637429	0,029227172	29123,70258	1,873779148	8,07E+06	5,453143024	1,269542718	9,45454545
4,95788944	0,042361318	28729,67119	1,959378479	8,05E+06	5,637455495	1,346336933	9,75757576
5,07910156	0,052311398	28431,16349	2,028373891	8,04E+06	5,784424506	1,423097975	10
5,26091974	0,066388028	28008,8571	2,132686989	8,02E+06	6,004160174	1,499925362	10,3636364
5,38213187	0,075251371	27742,95205	2,202752442	8,01E+06	6,150218054	1,576686404	10,6060606
5,53364702	0,08579249	27426,71287	2,29089678	8,00E+06	6,332352817	1,615166443	10,9090909
5,7154652	0,097715432	27069,01826	2,39745908	7,99E+06	6,550335709	1,69199383	11,2727273
5,86698035	0,107095903	26787,59911	2,486888659	7,98E+06	6,731555212	1,730473868	11,5757576
6,0184955	0,116012209	26520,10517	2,576863433	7,97E+06	6,912420706	1,807268083	11,8787879
6,20031368	0,126146985	26216,0565	2,685521549	7,97E+06	7,129037771	1,922409647	12,2424242
6,44273793	0,138787226	25836,84253	2,831508731	7,96E+06	7,417225436	2,114245907	12,7272727
6,62455611	0,147672692	25570,27383	2,941788622	7,95E+06	7,632944811	2,152759118	13,0909091
6,83667732	0,157454754	25276,80673	3,071258937	7,94E+06	7,884214706	2,191305502	13,5151515
6,92758641	0,161467916	25156,40974	3,127002902	7,94E+06	7,991780887	2,229719195	13,6969697
7,13970762	0,170444097	24887,11951	3,257646759	7,93E+06	8,242512484	2,421522284	14,1212121
7,3215258	0,177734393	24668,40676	3,370243584	7,93E+06	8,45716403	2,536663847	14,4848485
7,44273793	0,182401951	24528,37753	3,445611916	7,93E+06	8,600142985	2,613424889	14,7272727
7,62455611	0,189132701	24326,45143	3,559103783	7,92E+06	8,814443278	2,690252276	15,0909091
7,80637429	0,19555891	24133,66173	3,673104466	7,92E+06	9,028557936	2,767079664	15,4545455
7,92758641	0,199684205	24009,90069	3,749377897	7,92E+06	9,171206054	2,843840706	15,6969697
8,13970762	0,206617042	23801,91187	3,883363212	7,91E+06	9,420672355	2,882387089	16,1212121
8,3215258	0,212287284	23631,8016	3,998703354	7,91E+06	9,63434414	2,959214476	16,4848485
8,50334399	0,21772328	23468,71882	4,114483643	7,91E+06	9,847884149	3,07435604	16,8484848
8,74576823	0,224632136	23261,44945	4,269515554	7,91E+06	10,13241757	3,112935596	17,3333333
8,89728338	0,228766082	23137,42886	4,366778767	7,90E+06	10,31015176	3,228043987	17,6363636
9,10940459	0,23433153	22970,46247	4,503405675	7,90E+06	10,55886253	3,304904546	18,0606061
9,35182884	0,240395341	22788,5449	4,660182212	7,90E+06	10,84295019	3,496740807	18,5454545
9,50334399	0,244034755	22679,36052	4,758497679	7,90E+06	11,02042889	3,573535022	18,8484848
9,65485914	0,247564962	22573,45244	4,857059307	7,90E+06	11,19785338	3,650329237	19,1515152
9,83667732	0,251664158	22450,47437	4,975649546	7,90E+06	11,4106958	3,688842447	19,5151515
9,95788944	0,254317683	22370,86721	5,054896704	7,89E+06	11,5525526	3,727289313	19,7575758
10,1397076	0,258184745	22254,85327	5,174040777	7,89E+06	11,76528414	3,804116701	20,1212121
10,3518288	0,262533135	22124,39927	5,313445796	7,89E+06	12,01339486	3,919291437	20,5454545

10,473041	0,264942906	22052,10485	5,393295894	7,89E+06	12,155138	3,996052479	20,7878788
10,6245561	0,267881891	21963,93372	5,493298282	7,89E+06	12,33228384	4,034532517	21,0909091
11,1094046	0,276777136	21697,07163	5,814672255	7,89E+06	12,89892542	4,264948334	22,0606061
9,74576823	0,249632784	22511,41667	4,916311868	7,90E+06	11,30428342	4,148513045	19,3333333
11,3518288	0,280956136	21571,69942	5,976108717	7,89E+06	13,18213058	4,648355476	22,5454545
11,8063743	0,288357361	21349,65872	6,280079753	7,89E+06	13,71295954	4,87873812	23,4545455
12,2306167	0,294800794	21156,35229	6,565220386	7,88E+06	14,20821265	5,070773416	24,3030303
12,56395	0,29957927	21012,99545	6,790184863	7,88E+06	14,59722922	5,339337546	24,969697
12,8366773	0,303317816	20900,83709	6,974829097	7,88E+06	14,91545057	5,531206979	25,5151515
13,0487985	0,306125769	20816,59698	7,118792989	7,88E+06	15,16291898	5,646381715	25,9393939
13,2306167	0,308466579	20746,37144	7,242429864	7,88E+06	15,37501066	5,761523279	26,3030303
13,2306167	0,308466579	20746,37144	7,242429864	7,88E+06	15,37501066	5,761523279	26,3030303
13,503344	0,311869184	20644,29148	7,428289963	7,88E+06	15,69310915	5,915078536	26,8484848
13,6548591	0,313705701	20589,19501	7,531751288	7,88E+06	15,86981148	6,068501103	27,1515152
14,0184955	0,317965298	20461,4048	7,780643038	7,88E+06	16,29384568	6,528669287	27,8787879
13,56395	0,312608291	20622,11789	7,469657051	7,88E+06	15,76379166	6,489857524	26,969697
13,3215258	0,309614966	20711,91922	7,304329751	7,88E+06	15,48104855	6,451277969	26,4848485
13,1094046	0,306912669	20792,98959	7,159980973	7,88E+06	15,23361861	6,412731585	26,0606061
12,503344	0,298728024	21038,53329	6,74922327	7,88E+06	14,52650566	6,258811431	24,8484848
13,6851622	0,314068544	20578,30952	7,552460927	7,88E+06	15,90515039	6,758189448	27,2121212
14,0791016	0,318655742	20440,69113	7,822203806	7,88E+06	16,36451137	6,950191571	28
14,2306167	0,320358473	20389,60829	7,926202527	7,88E+06	16,54116769	7,141928314	28,3030303
14,473041	0,323015556	20309,89438	8,092884296	7,88E+06	16,82379532	7,525335456	28,7878788
14,503344	0,323342038	20300,09973	8,113743778	7,88E+06	16,8591219	7,908510391	28,8484848
14,503344	0,323342038	20300,09973	8,113743778	7,88E+06	16,8591219	8,32996633	28,8484848
14,6851622	0,32527537	20242,09876	8,239012429	7,88E+06	17,07107302	8,78993548	29,2121212
14,6851622	0,32527537	20242,09876	8,239012429	7,88E+06	17,07107302	9,364648123	29,2121212
14,7154652	0,325593401	20232,55765	8,259909038	7,88E+06	17,10639684	9,747823058	29,2727273
14,7154652	0,325593401	20232,55765	8,259909038	7,88E+06	17,10639684	10,09265064	29,2727273
14,8063743	0,326540457	20204,14545	8,32263032	7,88E+06	17,21236602	10,47589192	29,4545455
14,8366773	0,326853821	20194,74437	8,343547855	7,88E+06	17,24768833	11,05063774	29,5151515
14,8669804	0,327166036	20185,37777	8,364470589	7,88E+06	17,28301028	11,24224179	29,5757576
14,8669804	0,327166036	20185,37777	8,364470589	7,88E+06	17,28301028	11,85526861	29,5757576
15,0184955	0,328710116	20139,05455	8,4691618	7,88E+06	17,45961455	12,35351877	29,8787879
13,7457682	0,314789849	20556,66998	7,593897446	7,88E+06	15,97582668	12,237183	27,3333333
14,5942531	0,324314137	20270,93626	8,176354236	7,88E+06	16,96509923	12,50631106	29,030303
14,8366773	0,326853821	20194,74437	8,343547855	7,88E+06	17,24768833	13,08128908	29,5151515
14,9275864	0,327787046	20166,74714	8,406331602	7,88E+06	17,35365306	13,8859863	29,6969697
14,8972834	0,327477108	20176,04543	8,385398509	7,88E+06	17,31833185	14,38403742	29,6363636
14,8669804	0,327166036	20185,37777	8,364470589	7,88E+06	17,28301028	14,72883183	29,5757576
14,8063743	0,326540457	20204,14545	8,32263032	7,88E+06	17,21236602	15,15022143	29,4545455
14,7760713	0,326225938	20213,58121	8,301717997	7,88E+06	17,17704334	15,41838749	29,3939394
14,7457682	0,325910254	20223,05188	8,280810899	7,88E+06	17,14172028	15,87812443	29,3333333
14,6851622	0,32527537	20242,09876	8,239012429	7,88E+06	17,07107302	16,4910849	29,2121212
14,6851622	0,32527537	20242,09876	8,239012429	7,88E+06	17,07107302	16,9891692	29,2121212

14,0791016	0,318655742	20440,69113	7,822203806	7,88E+06	16,36451137	16,79693487	28
13,56395	0,312608291	20622,11789	7,469657051	7,88E+06	15,76379166	16,60480005	26,969697
12,9881925	0,305332117	20840,40697	7,077629517	7,88E+06	15,09221689	16,4125989	25,8181818
12,4124349	0,297436729	21077,27283	6,687829678	7,88E+06	14,42041482	16,22039774	24,6666667
11,6851622	0,286436374	21407,28933	6,198861852	7,89E+06	13,5714267	15,95140237	23,2121212
11,1397076	0,277308852	21681,11987	5,834825127	7,89E+06	12,93433003	15,7209202	22,1212121
10,7457682	0,270176643	21895,08993	5,573449115	7,89E+06	12,47397531	15,60554643	21,3333333
10,2609197	0,260690423	22179,68161	5,25364839	7,89E+06	11,90707133	15,45175897	20,3636364
9,86698035	0,252333357	22430,39805	4,995447471	7,90E+06	11,44616278	15,29807102	19,5757576
9,53364702	0,244749367	22657,9218	4,778190513	7,90E+06	11,05591802	15,14444942	18,9090909
9,23061671	0,237401567	22878,3597	4,581711393	7,90E+06	10,70092582	15,02917517	18,3030303
8,80637429	0,226302123	23211,34896	4,308387485	7,90E+06	10,20351999	14,87545405	17,4545455
8,38213187	0,214124557	23576,68242	4,037248658	7,91E+06	9,705538231	14,72173293	16,6060606
7,80637429	0,19555891	24133,66173	3,673104466	7,92E+06	9,028557936	14,52953177	15,4545455
7,26091974	0,175343786	24740,12622	3,332649711	7,93E+06	8,385638723	14,29904961	14,3636364
6,83667732	0,157454754	25276,80673	3,071258937	7,94E+06	7,884214706	14,14532849	13,5151515
6,23061671	0,127779708	26167,07394	2,703701888	7,96E+06	7,1650992	13,99140834	12,3030303
5,77607126	0,101525658	26954,70945	2,433164003	7,99E+06	6,622868249	13,76102569	11,3939394
5,4124349	0,077406084	27678,30952	2,220332058	8,01E+06	6,186682551	13,68399927	10,6666667
4,95788944	0,042361318	28729,67119	1,959378479	8,05E+06	5,637455495	13,4919308	9,75757576
4,47304096	-0,00276131	30000,53333	1,692815852	8,12E+06	5,044913469	13,33814334	8,78787879
4,13970762	-0,03984377	30000,53333	1,566617821	8,18E+06	4,632012969	13,22283591	8,12121212
3,77607126	-0,08769211	30000,53333	1,428947242	8,28E+06	4,174543952	13,03086696	7,39393939
3,29122277	-0,1678029	30000,53333	1,24538647	8,49E+06	3,548646841	12,76213697	6,42424242
2,92758641	-0,24518621	30000,53333	1,107715891	8,75E+06	3,062382376	12,49353967	5,6969697
2,68516217	-0,30836018	30000,53333	1,015935504	9,01E+06	2,727476962	12,30170341	5,21212121



A.4 BRIXNER (2017) – VIGA V01

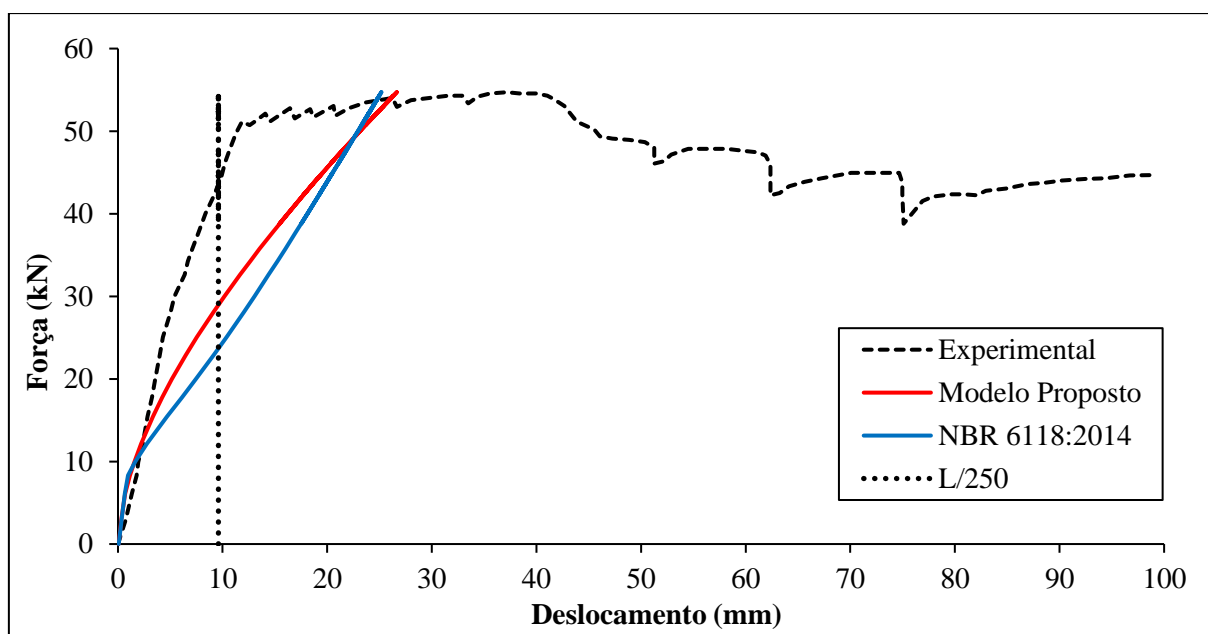
<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
240	14	25	18229,1667	5,161	7,267	3687,3015	10,00	1,59
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
1,57	21,5	210000	12,5	34	0,875	2	0,137392371	12,746

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,4286
4,5000	28898,19759	<i>X3 (cm)</i>	2,954
6,8874	<i>ai</i>	A	0,086260763
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,885	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,314852539
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		32653	2,203967771

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,63	-5,61370853	32653,33061	0,063503476	1,82292E+08	0,07175534	0	0
2,99155606	-0,46102555	32653,33061	0,306836205	1,82292E+08	0,346707577	0,740740741	2,95194508
5,51787185	0,168749119	27143,10985	0,682279742	1,82292E+08	0,640842528	1,333333333	6,109839817
7,27530892	0,349089725	21254,3884	1,149513977	1,60249E+08	0,961751498	1,777777778	8,306663156
8,59338673	0,436026634	18415,60876	1,567528059	1,11740E+08	1,62962295	1,925925926	9,95423341
10,3508238	0,517598118	15752,02815	2,207970027	7,97142E+07	2,752264666	2,37037037	12,15102975
12,9869794	0,598726284	13102,92331	3,331282556	5,85631E+07	4,70166413	2,814814815	15,44622426
14,8542563	0,638874115	11791,96292	4,234420228	5,13685E+07	6,131674893	3,259259259	17,78032037
16,6116934	0,668485367	10825,05692	5,158878083	4,72374E+07	7,457536458	3,555555556	19,9771167
18,9183295	0,699091119	9825,677182	6,473446033	4,38898E+07	9,141776108	4	22,8604119
20,6757666	0,717888552	9211,878393	7,546670784	4,22483E+07	10,37983571	4,296296296	25,05720824
23,0922426	0,739141531	8517,897844	9,116030853	4,07312E+07	12,02559681	5,037037037	28,0778032
24,63	0,750538785	8145,739513	10,1676851	4,00528E+07	13,04416207	5,407407407	30
26,7169565	0,763958036	7707,556279	11,65674636	3,93643E+07	14,39751301	6,37037037	32,60869565
28,0350343	0,771432123	7463,502449	12,63211155	3,90292E+07	15,23790384	6,666666667	34,25629291
29,2432723	0,777709754	7258,516893	13,54891088	3,87728E+07	16,00003741	7,111111111	35,76659039
30,7810297	0,785010591	7020,120255	14,74602848	3,85021E+07	16,96022342	7,703703704	37,68878719
32,6483066	0,792985035	6759,728096	16,24347579	3,82382E+07	18,11366651	8,37037037	40,0228833
34,4057437	0,799731586	6539,430742	17,69488918	3,80395E+07	19,1888357	9,185185185	42,21967963
36,3828604	0,80657713	6315,900935	19,37437808	3,78595E+07	20,38844654	9,925925926	44,69107551
37,5910984	0,810423461	6190,305394	20,42417096	3,77674E+07	21,11715134	10,22222222	46,201373
38,7993364	0,814042987	6072,115813	21,49120054	3,76864E+07	21,84297378	10,66666667	47,71167048
40,0075744	0,817456207	5960,662839	22,57505	3,76149E+07	22,56622833	11,11111111	49,22196796
40,6666133	0,819237565	5902,495541	23,17318906	3,75794E+07	22,95974802	11,40740741	50,04576659
41,5453318	0,821530249	5827,63177	23,97820622	3,75356E+07	23,48344915	11,85185185	51,14416476
41,2158124	0,820681214	5855,355604	23,67532803	3,75516E+07	23,28718925	12,59259259	50,73226545
41,6551716	0,82181047	5818,481639	24,07942982	3,75303E+07	23,54883599	13,18518519	51,28146453
42,3142105	0,823463242	5764,513124	24,68952723	3,75001E+07	23,94082026	14,07407407	52,10526316
41,5453318	0,821530249	5827,63177	23,97820622	3,75356E+07	23,48344915	14,51851852	51,14416476
42,8634096	0,82480431	5720,72278	25,20152241	3,74763E+07	24,26704969	16,44444444	52,79176201
41,8748513	0,822366789	5800,315951	24,28227175	3,75200E+07	23,67956092	16,88888889	51,55606407
42,7535698	0,824538665	5729,396985	25,09886464	3,74810E+07	24,20183366	18,37037037	52,65446224
41,9846911	0,82264291	5791,299692	24,38388955	3,75150E+07	23,74489934	18,66666667	51,69336384
43,0830892	0,825331817	5703,497926	25,40722431	3,74671E+07	24,39743795	20,59259259	53,06636156

42,0945309	0,822917685	5782,327362	24,48563823	3,75100E+07	23,81022193	20,74074074	51,83066362
42,8634096	0,82480431	5720,72278	25,20152241	3,74763E+07	24,26704969	22,07407407	52,79176201
43,4126087	0,826113761	5677,964867	25,71673941	3,74537E+07	24,59291295	23,7037037	53,47826087
43,851968	0,827139351	5644,475912	26,13121232	3,74364E+07	24,85335145	26,22222222	54,02745995
42,9732494	0,825068691	5712,089865	25,30430904	3,74717E+07	24,33225107	26,66666667	52,92906178
43,6322883	0,826628954	5661,14208	25,9237215	3,74450E+07	24,72315959	28	53,75286041
43,851968	0,827139351	5644,475912	26,13121232	3,74364E+07	24,85335145	29,77777778	54,02745995
44,0716476	0,827645024	5627,964029	26,33920998	3,74280E+07	24,98348954	31,55555556	54,3020595
44,0716476	0,827645024	5627,964029	26,33920998	3,74280E+07	24,98348954	32,88888889	54,3020595
43,3027689	0,825854342	5686,435733	25,61343973	3,74581E+07	24,52776876	33,48148148	53,3409611
43,9618078	0,827392774	5636,200829	26,23514791	3,74322E+07	24,91842715	34,37037037	54,16475973
44,2913272	0,828146041	5611,604143	26,54771262	3,74198E+07	25,11357487	35,55555556	54,57665904
44,401167	0,828394826	5603,480497	26,65215273	3,74158E+07	25,17859806	37,18518519	54,71395881
44,2913272	0,828146041	5611,604143	26,54771262	3,74198E+07	25,11357487	38,37037037	54,57665904
44,2913272	0,828146041	5611,604143	26,54771262	3,74198E+07	25,11357487	40	54,57665904
44,0716476	0,827645024	5627,964029	26,33920998	3,74280E+07	24,98348954	41,03703704	54,3020595
43,7421281	0,826884748	5652,789566	26,02740344	3,74407E+07	24,7882623	41,62962963	53,89016018
43,0830892	0,825331817	5703,497926	25,40722431	3,74671E+07	24,39743795	42,66666667	53,06636156
42,3142105	0,823463242	5764,513124	24,68952723	3,75001E+07	23,94082026	43,25925926	52,10526316
41,5453318	0,821530249	5827,63177	23,97820622	3,75356E+07	23,48344915	43,85185185	51,14416476
40,7764531	0,819529208	5892,972444	23,27334979	3,75738E+07	23,02527121	45,55555556	50,18306636
40,1174142	0,817756912	5950,843818	22,6744021	3,76089E+07	22,63186118	46,07407407	49,35926773
39,8977346	0,817153947	5970,532607	22,47583366	3,76211E+07	22,50057655	47,25925926	49,08466819
39,7878947	0,816850121	5980,453538	22,37675337	3,76273E+07	22,43490565	48,88888889	48,94736842
39,5682151	0,816237717	6000,450594	22,17900205	3,76399E+07	22,30350568	50,37037037	48,67276888
39,019016	0,814678358	6051,368854	21,68702481	3,76728E+07	21,97465707	51,25925926	47,98627002
37,4812586	0,810083496	6201,406403	20,32801651	3,77753E+07	21,05102962	51,25925926	46,06407323
37,7009382	0,810761554	6179,265529	20,52046784	3,77596E+07	21,18324926	52,14814815	46,33867277
38,3599771	0,812751689	6114,281012	21,10122233	3,77147E+07	21,57935106	52,88888889	47,1624714
38,9091762	0,814361517	6061,714757	21,58904333	3,76796E+07	21,90882591	54,51851852	47,84897025
38,9091762	0,814361517	6061,714757	21,58904333	3,76796E+07	21,90882591	56,2962963	47,84897025
38,9091762	0,814361517	6061,714757	21,58904333	3,76796E+07	21,90882591	58,22222222	47,84897025
38,6894966	0,813722754	6082,57249	21,39349674	3,76934E+07	21,77710045	60	47,57437071
38,5796568	0,813400803	6093,085262	21,29593223	3,77004E+07	21,7112057	61,18518519	47,43707094
38,2501373	0,812424495	6124,964966	21,00407755	3,77220E+07	21,51339071	61,92592593	47,02517162
37,3714188	0,809741641	6212,569094	20,23200481	3,77833E+07	20,98488387	62,37037037	45,92677346
36,7123799	0,807649898	6280,87148	19,65895095	3,78332E+07	20,58748978	62,37037037	45,10297483
34,4057437	0,799731586	6539,430742	17,69488918	3,80395E+07	19,1888357	62,37037037	42,21967963
34,6254233	0,800528903	6513,39569	17,8790965	3,80175E+07	19,32261141	63,25925926	42,49427918
35,2844622	0,802864092	6437,143989	18,43535172	3,79545E+07	19,72318331	64,14814815	43,3180778
35,7238215	0,804375325	6387,797194	18,80918657	3,79151E+07	19,9896292	65,62962963	43,86727689
36,053341	0,805485776	6351,537254	19,09112016	3,78868E+07	20,18916235	67,25925926	44,2791762
36,60254	0,807294342	6292,481545	19,56394779	3,78419E+07	20,52116833	70,07407407	44,96567506
36,60254	0,807294342	6292,481545	19,56394779	3,78419E+07	20,52116833	73,03703704	44,96567506
36,60254	0,807294342	6292,481545	19,56394779	3,78419E+07	20,52116833	74,66666667	44,96567506

35,6139817	0,804000839	6400,025408	18,71550465	3,79248E+07	19,9230614	74,96296296	43,72997712
34,5155835	0,800131453	6526,373744	17,78691671	3,80284E+07	19,2557397	74,96296296	42,35697941
31,6597483	0,788875705	6893,911419	15,44484662	3,83702E+07	17,50458263	75,11111111	38,78718535
32,7581465	0,793426952	6745,298018	16,3330135	3,82246E+07	18,18114028	76	40,16018307
33,8565446	0,797695163	6605,926742	17,23704896	3,80972E+07	18,8538183	76,88888889	41,53318078
34,2959039	0,799329278	6552,567442	17,60301429	3,80508E+07	19,12189903	77,92592593	42,08237986
34,5155835	0,800131453	6526,373744	17,78691671	3,80284E+07	19,2557397	79,7037037	42,35697941
34,5155835	0,800131453	6526,373744	17,78691671	3,80284E+07	19,2557397	80,88888889	42,35697941
34,4057437	0,799731586	6539,430742	17,69488918	3,80395E+07	19,1888357	82,07407407	42,21967963
34,845103	0,80131664	6487,673434	18,06391137	3,79960E+07	19,45625939	82,96296296	42,76887872
35,0647826	0,802094978	6462,258108	18,24933077	3,79750E+07	19,58978243	84,88888889	43,04347826
35,5041419	0,803624152	6412,325499	18,62197129	3,79346E+07	19,8564647	86,96296296	43,59267735
35,6139817	0,804000839	6400,025408	18,71550465	3,79248E+07	19,9230614	88,59259259	43,72997712
35,8336613	0,80474763	6375,640197	18,9030167	3,79056E+07	20,05616842	90,22222222	44,00457666
35,9984211	0,805302041	6357,536809	19,044039	3,78915E+07	20,15592433	92,44444444	44,21052632
36,053341	0,805485776	6351,537254	19,09112016	3,78868E+07	20,18916235	94,37037037	44,2791762
36,3279405	0,806396542	6321,797733	19,32707686	3,78640E+07	20,35524946	96,74074074	44,62242563
36,3828604	0,80657713	6315,900935	19,37437808	3,78595E+07	20,38844654	98,81481481	44,69107551



A.5 ARAÚJO (2002) – VIGA VC-1R

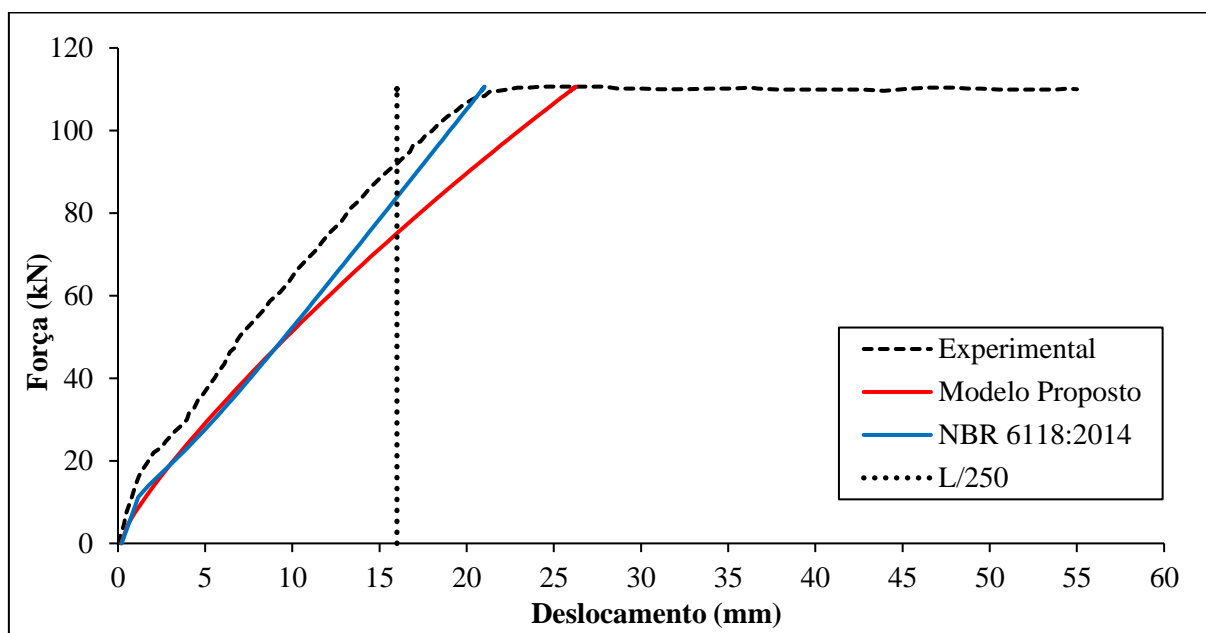
<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
400	15	45	113906,2500	13,578	8,049	51910,3865	6,24	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
6,029	42,07	189000	22,5	23,8	1,6875	3	0,359511623	23,659

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,7000
8,0000	23481,31348	<i>X3 (cm)</i>	15,125
18,8493	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,359511623
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,860	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,248221403
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		27320	1,737549821

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
3,375	-0,88060703	27319,73646	0,180758391	1,13906E+09	0,210306447	0	0
9,368189557	0,094394615	24740,90046	0,561916772	1,13906E+09	0,592059167	0,334957369	4,494892168
13,03069429	0,250398934	20478,90356	0,94635734	1,13906E+09	0,825352497	0,468940317	7,241770715
18,35797389	0,367790103	17271,80776	1,583413285	1,13906E+09	1,164688248	0,803897686	11,23723042
22,02047862	0,416452453	15942,3652	2,059069859	9,07942E+08	1,753843455	1,004872107	13,98410897
25,0170734	0,446146399	15131,13442	2,465675757	7,84283E+08	2,307595477	1,205846529	16,23155505
26,68184828	0,459933795	14754,46639	2,697385703	7,37679E+08	2,617122623	1,339829476	17,48013621
29,34548808	0,478971711	14234,35555	3,075833754	6,83399E+08	3,10778783	1,674786845	19,47786606
32,67503784	0,498762252	13693,68318	3,560951523	6,38119E+08	3,706893044	2,043239951	21,97502838
34,33981271	0,507359362	13458,81239	3,808104005	6,21635E+08	3,999496226	2,478684531	23,22360953
36,33754257	0,516752614	13202,19124	4,108452513	6,05637E+08	4,344472312	2,746650426	24,72190692
39,66709232	0,530562725	12824,90265	4,617626203	5,85625E+08	4,905446887	3,282582217	27,21906924
40,99891222	0,535545304	12688,77988	4,824153257	5,79350E+08	5,125364961	3,550548112	28,21793417
43,32959705	0,543639756	12467,6416	5,189324682	5,70142E+08	5,504745424	3,952496955	29,96594779
45,66028188	0,55104238	12265,40386	5,5591045	5,62719E+08	5,877877987	4,086479903	31,71396141
46,99210178	0,55500114	12157,25157	5,772412762	5,59114E+08	6,088597285	4,354445798	32,71282633
49,98869656	0,563282164	11931,01619	6,257530838	5,52342E+08	6,556887046	4,622411693	34,96027242
51,65347143	0,567551116	11814,38954	6,530063769	5,49231E+08	6,813954415	4,890377588	36,20885358
54,31711124	0,573954434	11639,45259	6,970494626	5,45012E+08	7,221295325	5,225334957	38,20658343
56,98075104	0,579895849	11477,13469	7,416203487	5,41546E+08	7,624386544	5,560292326	40,20431328
58,31257094	0,58271283	11400,17552	7,641003281	5,40043E+08	7,824536065	5,694275274	41,20317821
61,30916572	0,588718348	11236,10634	8,151472004	5,37120E+08	8,271901271	6,096224117	43,45062429
62,9739406	0,591874293	11149,88676	8,437827545	5,35729E+08	8,518851873	6,230207065	44,69920545
65,30462543	0,596098781	11034,47487	8,842001477	5,34012E+08	8,862914673	6,431181486	46,44721907
66,63644533	0,598419173	10971,08236	9,074661195	5,33136E+08	9,058729991	6,699147381	47,446084
68,96713016	0,602329943	10864,24116	9,484774442	5,31761E+08	9,400163117	6,833130329	49,19409762
70,63190503	0,605015107	10790,88319	9,780005063	5,30887E+08	9,643162077	7,03410475	50,44267877
72,29667991	0,607616927	10719,80215	10,07713632	5,30091E+08	9,885495399	7,302070646	51,69125993
74,62736474	0,611129749	10623,83278	10,49629935	5,29094E+08	10,22374656	7,704019488	53,43927355
78,95577942	0,617292952	10455,4557	11,28453627	5,27539E+08	10,84918692	8,373934227	56,68558456
81,61941922	0,620878319	10357,50441	11,77590555	5,26740E+08	11,23255047	8,708891596	58,68331442
84,616014	0,624744379	10251,88467	12,33441707	5,25957E+08	11,66264992	9,31181486	60,9307605
87,61260878	0,628449827	10150,65282	12,89897816	5,25278E+08	12,09164952	9,780755177	63,17820658

91,60806848	0,633166453	10021,79582	13,66113302	5,24505E+08	12,66217134	10,24969549	66,17480136
93,60579834	0,635437484	9959,751856	14,04624395	5,24166E+08	12,9468756	10,58465286	67,67309875
95,93648316	0,638019469	9889,212708	14,49894243	5,23806E+08	13,27861312	10,98660171	69,42111237
98,26716799	0,640533312	9820,535188	14,95530992	5,23479E+08	13,60993983	11,38855055	71,16912599
100,4313753	0,642810436	9758,324758	15,38237054	5,23203E+08	13,91726443	11,65651644	72,7922815
103,5944476	0,646046306	9669,921627	16,01224937	5,22838E+08	14,36590421	12,12545676	75,1645857
107,2569523	0,649666831	9571,009846	16,75008519	5,22469E+08	14,88468382	12,7953715	77,91146425
111,585367	0,6537869	9458,450636	17,63388916	5,22092E+08	15,49694462	13,33130329	81,15777526
114,2490068	0,656244087	9391,320959	18,18416126	5,21888E+08	15,87332122	13,86723508	83,15550511
118,2444665	0,659827434	9293,424864	19,01875081	5,21615E+08	16,43738393	14,47015834	86,15209989
121,9069712	0,663012335	9206,414197	19,79352238	5,21396E+08	16,95396981	15,14007308	88,89897843
124,2376561	0,664992901	9152,30565	20,29143191	5,21269E+08	17,28249585	15,6090134	90,64699205
125,4029985	0,665970385	9125,60104	20,54181383	5,21209E+08	17,44670205	15,91047503	91,52099886
127,4007283	0,667626965	9080,343716	20,97326071	5,21112E+08	17,72811523	16,2454324	93,01929625
129,8978907	0,669665028	9024,664376	21,51652749	5,20998E+08	18,07974236	16,74786845	94,89216799
132,2285755	0,671535931	8973,551796	22,02756112	5,20900E+08	18,40779739	16,94884287	96,64018161
133,2274404	0,672328844	8951,889617	22,24775756	5,20860E+08	18,5483561	17,35079172	97,38933031
134,8922153	0,67363887	8916,100073	22,61633266	5,20795E+08	18,78257454	17,61875761	98,63791146
136,5569902	0,674934909	8880,692621	22,98688957	5,20734E+08	19,01673779	18,02070646	99,88649262
138,55472	0,676472292	8838,691728	23,43418296	5,20665E+08	19,2976645	18,35566382	101,38479
141,2183598	0,678492957	8783,487695	24,03504746	5,20578E+08	19,67212291	18,89159562	103,3825199
143,2160897	0,679987417	8742,659432	24,4890658	5,20517E+08	19,95288887	19,42752741	104,8808173
145,2138195	0,681464527	8702,305175	24,9459857	5,20460E+08	20,2335921	19,82947625	106,3791146
147,2115494	0,682924865	8662,409112	25,40581911	5,20405E+08	20,51423595	20,49939099	107,877412
147,8774593	0,683408014	8649,209633	25,55974643	5,20388E+08	20,60777125	21,03532278	108,3768445
149,2092792	0,684368981	8622,956261	25,86857809	5,20354E+08	20,79482355	21,30328867	109,3757094
149,5422342	0,684608126	8616,422867	25,94598987	5,20345E+08	20,84158289	21,83922046	109,6254257
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	22,30816078	109,8751419
150,5410991	0,685322969	8596,893543	26,17871543	5,20321E+08	20,98185215	22,91108404	110,3745743
150,5410991	0,685322969	8596,893543	26,17871543	5,20321E+08	20,98185215	23,58099878	110,3745743
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	24,25091352	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	24,65286236	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	25,05481121	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	25,72472594	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	26,32764921	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	27,06455542	110,6242906
150,8740541	0,685560394	8590,407178	26,25645421	5,20313E+08	21,0286057	27,93544458	110,6242906
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	28,67235079	110,1248581
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	29,34226553	110,1248581
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	30,07917174	110,1248581
150,0416667	0,684966032	8606,644979	26,06226068	5,20333E+08	20,91171915	31,01705238	110
150,0416667	0,684966032	8606,644979	26,06226068	5,20333E+08	20,91171915	32,55785627	110
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	33,96467722	110,1248581
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	34,43361754	110,1248581
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	35,17052375	110,1248581

150,5410991	0,685322969	8596,893543	26,17871543	5,20321E+08	20,98185215	36,30937881	110,3745743
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	36,71132765	110,1248581
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	37,8501827	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	39,19001218	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	40,39585871	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	41,86967113	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	42,74056029	109,8751419
149,5422342	0,684608126	8616,422867	25,94598987	5,20345E+08	20,84158289	43,94640682	109,6254257
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	45,42021924	110,1248581
150,5410991	0,685322969	8596,893543	26,17871543	5,20321E+08	20,98185215	46,49208283	110,3745743
150,5410991	0,685322969	8596,893543	26,17871543	5,20321E+08	20,98185215	47,96589525	110,3745743
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	48,76979294	110,1248581
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	49,50669915	110,1248581
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	50,51157125	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	52,32034105	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	53,12423873	109,8751419
149,8751892	0,684846838	8609,901325	26,02348332	5,20337E+08	20,88834076	53,79415347	109,8751419
150,2081442	0,685085118	8603,391571	26,10105849	5,20329E+08	20,93509718	54,46406821	110,1248581
150,0416667	0,684966032	8606,644979	26,06226068	5,20333E+08	20,91171915	55	110



A.6 SANTOS (2006) – VIGAS VREF1, VREF2

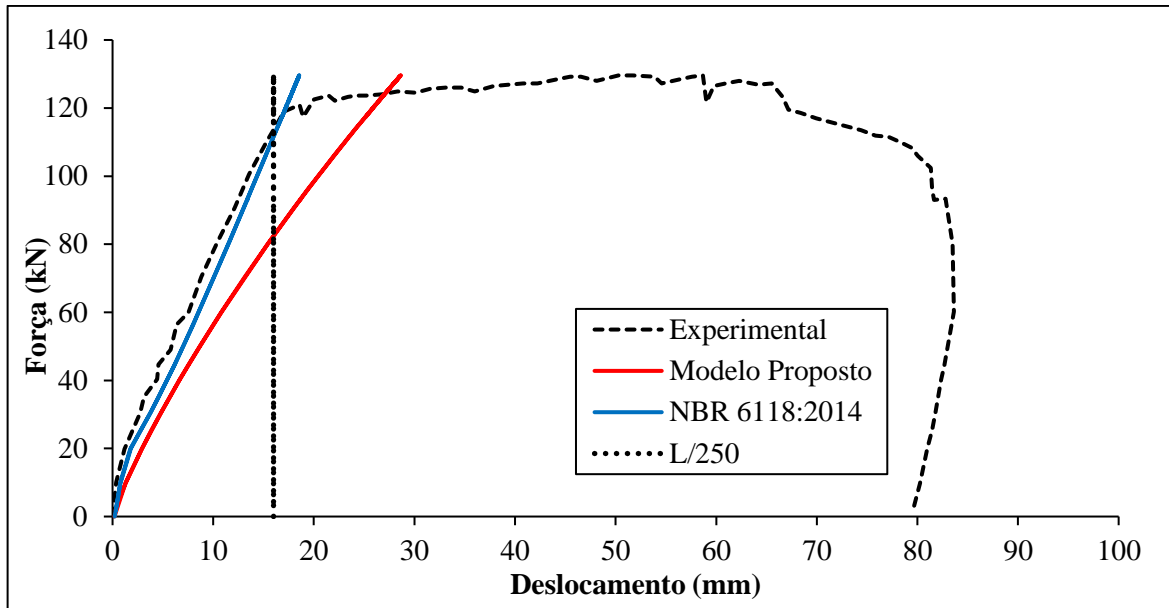
- VREF1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
400	15	40	80000,0000	11,456	6,416	32559,6326	8,99	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
6,029	36,9	188000	20	34,8	1,5	3	0,280321749	20,872

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,4857
4,5000	29302,27021	<i>X3 (cm)</i>	10,344
19,1863	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,280321749
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,887	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,319772234
<i>σsd CA-50 - Dom</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
<i>2 e 3 (kN/cm²)</i>		33035	2,238405636

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
3	-0,36078194	33035,2539	0,189191826	8,00000E+08	0,213294054	0	0
13,02808989	0,476396378	17297,37861	1,327570129	8,00000E+08	0,783675906	0,359928014	10,02808989
22,85955056	0,589293144	13567,80525	2,900192788	6,06089E+08	1,77251139	1,199760048	19,85955056
33,47752809	0,640545648	11874,66577	4,803998805	4,14899E+08	3,753796601	2,75944811	30,47752809
38,19662921	0,655257941	11388,64145	5,699630544	3,85720E+08	4,594461879	3,119376125	35,19662921
43,30898876	0,668224302	10960,29443	6,699787893	3,66843E+08	5,465018616	4,439112178	40,30898876
47,63483146	0,677491569	10654,1479	7,569013173	3,56596E+08	6,174059911	4,559088182	44,63483146
51,96067416	0,685604279	10386,14247	8,458493987	3,49480E+08	6,862996986	5,75884823	48,96067416
59,43258427	0,697620907	9989,170113	10,04130533	3,41557E+08	8,017614256	6,358728254	56,43258427
62,97191011	0,702639695	9823,373169	10,81127447	3,39014E+08	8,552801131	7,558488302	59,97191011
73,39325843	0,715612704	9394,806523	13,15323494	3,34072E+08	10,09879446	8,818236353	70,39325843
83,81460674	0,726639008	9030,549766	15,60713521	3,31287E+08	11,61506611	10,43791242	80,81460674
93,64606742	0,735804631	8727,7611	18,02601804	3,29676E+08	13,02877747	12,11757648	90,64606742
103,4775281	0,744088212	8454,110885	20,54770149	3,28620E+08	14,43196428	13,55728854	100,4775281
113,3089888	0,751692822	8202,890673	23,17455178	3,27900E+08	15,82800578	15,35692861	110,3089888
117,6348315	0,7548612	8098,222496	24,36436546	3,27655E+08	16,44058157	16,19676065	114,6348315
121,9606742	0,757934616	7996,691431	25,57530099	3,27443E+08	17,05232807	17,03659268	118,9606742
123,1404494	0,758757398	7969,510613	25,90925496	3,27391E+08	17,21903896	17,99640072	120,1404494
123,9269663	0,759302395	7951,506485	26,13277675	3,27357E+08	17,33015086	18,59628074	120,9269663
120,3876404	0,756827478	8033,266014	25,13250116	3,27517E+08	16,82996342	18,95620876	117,3876404
125,5	0,76038412	7915,771443	26,58195328	3,27291E+08	17,5523083	20,0359928	122,5
126,6797753	0,761188335	7889,204002	26,92070819	3,27244E+08	17,71887045	21,47570486	123,6797753
125,1067416	0,76011471	7924,671472	26,46939204	3,27307E+08	17,49677706	22,07558488	122,1067416
126,2865169	0,760920927	7898,037869	26,80761116	3,27260E+08	17,66335493	23,39532094	123,2865169
126,6797753	0,761188335	7889,204002	26,92070819	3,27244E+08	17,71887045	24,23515297	123,6797753
126,6797753	0,761188335	7889,204002	26,92070819	3,27244E+08	17,71887045	25,19496101	123,6797753
127,0730337	0,761455084	7880,391872	27,03398422	3,27229E+08	17,77438086	26,75464907	124,0730337
127,8595506	0,761986627	7862,832202	27,26107406	3,27199E+08	17,88538658	28,31433713	124,8595506
127,4662921	0,76172118	7871,601323	27,14743944	3,27214E+08	17,82988622	30,1139772	124,4662921
128,6460674	0,762515594	7845,357636	27,48888226	3,27170E+08	17,99637259	31,55368926	125,6460674
129,0393258	0,762779123	7836,651894	27,60305625	3,27156E+08	18,05185834	33,11337732	126,0393258
129,0393258	0,762779123	7836,651894	27,60305625	3,27156E+08	18,05185834	34,67306539	126,0393258
127,8595506	0,761986627	7862,832202	27,26107406	3,27199E+08	17,88538658	35,99280144	124,8595506
129,4325843	0,763042021	7827,966983	27,71741044	3,27142E+08	18,10733935	37,91241752	126,4325843

130,2191011	0,763565944	7810,659077	27,94666021	3,27114E+08	18,21828731	40,79184163	127,2191011
130,2191011	0,763565944	7810,659077	27,94666021	3,27114E+08	18,21828731	42,23155369	127,2191011
131,3988764	0,764347206	7784,849887	28,29189137	3,27073E+08	18,384675	44,03119376	128,3988764
132,1853933	0,764865015	7767,743929	28,5229522	3,27047E+08	18,4955779	45,47090582	129,1853933
132,1853933	0,764865015	7767,743929	28,5229522	3,27047E+08	18,4955779	46,55068986	129,1853933
131,005618	0,764087396	7793,43278	28,17663318	3,27087E+08	18,32921693	48,11037792	128,005618
132,5786517	0,765123022	7759,220595	28,63875524	3,27034E+08	18,55102284	50,26994601	129,5786517
132,5786517	0,765123022	7759,220595	28,63875524	3,27034E+08	18,55102284	51,70965807	129,5786517
132,1853933	0,764865015	7767,743929	28,5229522	3,27047E+08	18,4955779	53,86922615	129,1853933
130,2191011	0,763565944	7810,659077	27,94666021	3,27114E+08	18,21828731	54,58908218	127,2191011
131,3988764	0,764347206	7784,849887	28,29189137	3,27073E+08	18,384675	56,26874625	128,3988764
132,1853933	0,764865015	7767,743929	28,5229522	3,27047E+08	18,4955779	57,5884823	129,1853933
132,5786517	0,765123022	7759,220595	28,63875524	3,27034E+08	18,55102284	58,66826635	129,5786517
124,7134831	0,759844622	7933,593878	26,357009	3,27324E+08	17,44124045	59,02819436	121,7134831
129,4325843	0,763042021	7827,966983	27,71741044	3,27142E+08	18,10733935	59,74805039	126,4325843
130,2191011	0,763565944	7810,659077	27,94666021	3,27114E+08	18,21828731	60,94781044	127,2191011
131,005618	0,764087396	7793,43278	28,17663318	3,27087E+08	18,32921693	62,26754649	128,005618
129,8258427	0,763304294	7819,302758	27,83194503	3,27128E+08	18,16281565	64,18716257	126,8258427
130,2191011	0,763565944	7810,659077	27,94666021	3,27114E+08	18,21828731	65,50689862	127,2191011
126,2865169	0,760920927	7898,037869	26,80761116	3,27260E+08	17,66335493	66,58668266	123,2865169
122,5505618	0,758346807	7983,074596	25,74207893	3,27417E+08	17,13569007	67,18656269	119,5505618
121,5674157	0,757658924	8005,79898	25,46433655	3,27461E+08	16,996746	68,38632274	118,5674157
119,994382	0,756548853	8042,470445	25,02224137	3,27536E+08	16,77435683	69,9460108	116,994382
118,4213483	0,755426821	8079,537064	24,5829572	3,27614E+08	16,55186641	71,98560288	115,4213483
116,4550562	0,754006873	8126,445421	24,03778653	3,27718E+08	16,27360277	74,38512298	113,4550562
114,8820225	0,752856491	8164,448574	23,60478307	3,27806E+08	16,05086432	75,82483503	111,8820225
114,488764	0,752566837	8174,017373	23,49696581	3,27829E+08	15,9951612	77,14457109	111,488764
112,9157303	0,751399776	8212,571531	23,06742574	3,27924E+08	15,77227162	78,34433113	109,9157303
111,3426966	0,750218853	8251,583599	22,64064331	3,28024E+08	15,54925356	79,42411518	108,3426966
108,9831461	0,748420404	8310,99582	22,0056153	3,28185E+08	15,21446964	80,0239952	105,9831461
105,4438202	0,745658272	8402,243573	21,06457625	3,28454E+08	14,71166203	81,34373125	102,4438202
99,15168539	0,740537258	8571,417566	19,42535266	3,29034E+08	13,8156058	81,46370726	96,15168539
96,00561798	0,737864113	8659,725567	18,62176371	3,29383E+08	13,36634762	81,64367127	93,00561798
96,3988764	0,738202695	8648,540441	18,72163229	3,29337E+08	13,42255519	82,78344331	93,3988764
83,02808989	0,725859379	9056,30502	15,41800431	3,31450E+08	11,50136904	83,50329934	80,02808989
63,16853933	0,702908	9814,509651	10,85442907	3,38889E+08	8,582355037	83,62327534	60,16853933
53,14044944	0,687652794	10318,46925	8,704529091	3,47924E+08	7,04797851	83,02339532	50,14044944
47,24157303	0,67670147	10680,24902	7,489147013	3,57376E+08	6,110502561	82,66346731	44,24157303
43,11235955	0,667770112	10975,2987	6,660769292	3,67410E+08	5,432233717	82,36352729	40,11235955
33,87078652	0,641899991	11829,92472	4,877572107	4,11824E+08	3,825272906	81,82363527	30,87078652
28,36516854	0,620086513	12550,53851	3,866390345	4,72410E+08	2,804382497	81,46370726	25,36516854
23,05617978	0,590619744	13523,98068	2,933823053	5,98973E+08	1,808504872	80,98380324	20,05617978
12,63483146	0,468417068	17560,97713	1,270319543	8,00000E+08	0,76130799	80,26394721	9,634831461
8,702247191	0,350151433	21467,91241	0,733827538	8,00000E+08	0,537628832	79,9040192	5,702247191
4,769662921	0,04085766	31685,51072	0,290335803	8,00000E+08	0,313949675	79,54409118	1,769662921



- VREF2

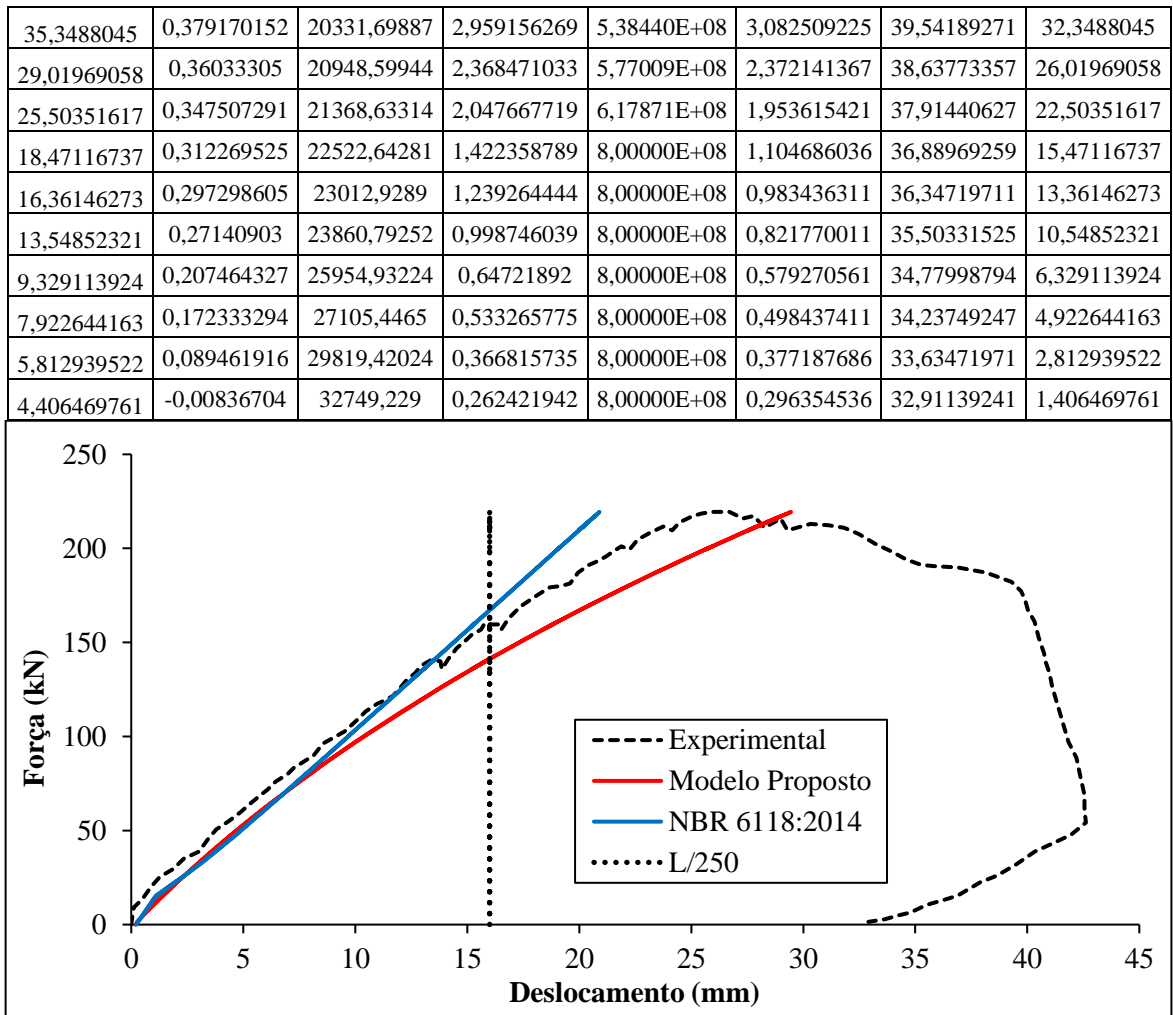
<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
400	15	40	80000,0000	14,720	6,483	49066,8703	2,22	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
12,3	35,1	188000	20	34,2	1,5	3	0,611771174	21,526

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,4429
4,5000	28999,44228	<i>X3 (cm)</i>	21,473
18,9652	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,611771174
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,886	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,316086047
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	32749
		<i>Fct,inf (MPa)</i>	2,21260233

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
3	-0,19614821	32749,229	0,190844188	8,00000E+08	0,215521386	0	0
7,922644163	0,172333294	27105,4465	0,533265775	8,00000E+08	0,498437411	0,060277275	4,922644163
12,14205345	0,254603631	24411,15639	0,880202289	8,00000E+08	0,740936861	0,120554551	9,142053446
16,36146273	0,297298605	23012,9289	1,239264444	8,00000E+08	0,983436311	0,482218204	13,36146273
23,39381153	0,338597268	21660,42952	1,85775106	6,55481E+08	1,693536495	0,904159132	20,39381153
28,3164557	0,357935616	21027,11355	2,303886966	5,83603E+08	2,289936877	1,265822785	25,3164557
32,53586498	0,371329762	20588,4656	2,694539881	5,51933E+08	2,772826403	1,868595539	29,53586498
38,16174402	0,386358487	20096,28645	3,227108992	5,28636E+08	3,384333125	2,350813743	35,16174402
41,67791842	0,394621467	19825,6802	3,566747605	5,19814E+08	3,752774329	3,013863773	38,67791842
48,71026723	0,409372604	19342,59186	4,261775222	5,08926E+08	4,468389984	3,435804702	45,71026723
53,63291139	0,418674101	19037,97499	4,760915261	5,04346E+08	4,95773131	3,797468354	50,63291139
57,85232068	0,426149086	18793,17498	5,197127924	5,01566E+08	5,371994336	4,339963834	54,85232068
62,77496484	0,434406396	18522,75445	5,71593937	4,99198E+08	5,850868404	4,882459313	59,77496484
67,697609	0,442255522	18265,70162	6,245549758	4,97470E+08	6,326168063	5,364677517	64,697609
72,62025316	0,44976719	18019,70031	6,786114818	4,96178E+08	6,798785452	5,84689572	69,62025316

74,72995781	0,452896777	17917,20872	7,021179003	4,95725E+08	7,000678844	6,088004822	71,72995781
78,94936709	0,459012879	17716,91111	7,49748518	4,94957E+08	7,403495476	6,449668475	75,94936709
83,16877637	0,464956983	17522,24627	7,982117424	4,94337E+08	7,805226327	6,992163954	80,16877637
86,68495077	0,469792676	17363,88107	8,392416267	4,93908E+08	8,13931813	7,293550332	83,68495077
88,79465541	0,472646867	17270,40852	8,641433824	4,93683E+08	8,339517247	7,594936709	85,79465541
93,0140647	0,478256948	17086,68268	9,145920486	4,93291E+08	8,739417893	8,137432188	90,0140647
99,34317862	0,486447848	16818,43704	9,918993303	4,92821E+08	9,338227841	8,559373116	96,34317862
102,859353	0,490892602	16672,87477	10,35707743	4,92608E+08	9,670455158	9,101868596	99,85935302
105,6722925	0,494398143	16558,07101	10,71202603	4,92457E+08	9,936043704	9,523809524	102,6722925
112,0014065	0,502133486	16304,74447	11,52541895	4,92171E+08	10,53308147	10,09644364	109,0014065
116,2208158	0,507181228	16139,43482	12,07919371	4,92013E+08	10,93075544	10,45810729	113,2208158
120,440225	0,512147647	15976,78841	12,6423223	4,91876E+08	11,32819316	10,97046414	117,440225
122,5499297	0,514601763	15896,41801	12,92743326	4,91815E+08	11,5268334	11,39240506	119,5499297
124,6596343	0,517037161	15816,66061	13,21492965	4,91758E+08	11,72542588	11,69379144	121,6596343
128,8790436	0,521853654	15658,92419	13,79714234	4,91654E+08	12,12247986	11,99517782	125,8790436
133,0984529	0,526600562	15503,4666	14,38908862	4,91564E+08	12,51937729	12,2965642	130,0984529
136,6146273	0,530505381	15375,58679	14,88990623	4,91496E+08	12,85001927	12,65822785	133,6146273
140,8340366	0,535132427	15224,05462	15,50003598	4,91424E+08	13,2466767	12,95961423	137,8340366
143,6469761	0,538182687	15124,16093	15,91239527	4,91381E+08	13,51105314	13,38155515	140,6469761
142,9437412	0,537422656	15149,05138	15,8088822	4,91391E+08	13,4449634	13,80349608	139,9437412
138,7243319	0,53282677	15299,5631	15,19371621	4,91459E+08	13,04836256	13,86377336	135,7243319
144,350211	0,538941047	15099,32522	16,01619155	4,91370E+08	13,57714007	14,16515973	141,350211
149,97609	0,544948936	14902,57149	16,8568324	4,91294E+08	14,10574031	14,52682339	146,97609
154,1954993	0,549387978	14757,19631	17,49942831	4,91244E+08	14,50208945	14,94876432	151,1954993
157,0084388	0,552316528	14661,28855	17,93367142	4,91214E+08	14,76627918	15,18987342	154,0084388
159,8213783	0,555221022	14566,16861	18,37263944	4,91186E+08	15,03043729	15,61181435	156,8213783
163,3375527	0,558818532	14448,35292	18,92805748	4,91153E+08	15,36059374	15,79264617	160,3375527
162,6343179	0,558101935	14471,82092	18,8163741	4,91159E+08	15,29456594	16,09403255	159,6343179
162,6343179	0,558101935	14471,82092	18,8163741	4,91159E+08	15,29456594	16,4556962	159,6343179
159,8213783	0,555221022	14566,16861	18,37263944	4,91186E+08	15,03043729	16,51597348	156,8213783
165,7988748	0,561315335	14366,58454	19,32132562	4,91132E+08	15,59167793	16,84749849	162,7988748
169,6666667	0,565203947	14239,23552	19,94684177	4,91101E+08	15,95477131	17,17902351	166,6666667
172,4796062	0,568005719	14147,47964	20,40759327	4,91080E+08	16,21881145	17,42013261	169,4796062
175,2925457	0,570785759	14056,43546	20,87330346	4,91060E+08	16,48282986	17,78179626	172,2925457
178,8087201	0,574230792	13943,61329	21,46248088	4,91038E+08	16,81282438	18,20373719	175,8087201
182,3248945	0,577643087	13831,86328	22,05956046	4,91017E+08	17,14278951	18,68595539	179,3248945
183,0281294	0,578321672	13809,64011	22,17993227	4,91013E+08	17,20877921	19,1681736	180,0281294
184,4345992	0,57967501	13765,31935	22,42163735	4,91005E+08	17,3407554	19,59011453	181,4345992
190,0604782	0,585037922	13589,68811	23,4013806	4,90976E+08	17,86861988	19,95177818	187,0604782
194,2798875	0,589008146	13459,66635	24,14991606	4,90956E+08	18,26447914	20,43399638	191,2798875
195,6863572	0,590321838	13416,64393	24,4020733	4,90950E+08	18,39642534	20,73538276	192,6863572
198,4992968	0,592934845	13331,06999	24,91039065	4,90938E+08	18,66030802	21,15732369	195,4992968
201,3122363	0,595528888	13246,11708	25,42408403	4,90927E+08	18,9241783	21,51898734	198,3122363
204,1251758	0,598104209	13161,77728	25,94320045	4,90917E+08	19,18803688	21,88065099	201,1251758
202,3670886	0,596496814	13214,41822	25,61811464	4,90923E+08	19,02312661	22,24231465	199,3670886

207,6413502	0,601297389	13057,2031	26,59979433	4,90904E+08	19,5178446	22,6039783	204,6413502
211,1575246	0,604462119	12953,56063	27,26502911	4,90893E+08	19,84763615	23,14647378	208,1575246
214,673699	0,60759882	12850,83611	27,9389991	4,90882E+08	20,17741258	23,74924653	211,673699
212,5639944	0,60572014	12912,36142	27,53356357	4,90888E+08	19,97954848	24,14104882	209,5639944
216,7834037	0,609467555	12789,63648	28,34761357	4,90876E+08	20,3752716	24,47257384	213,7834037
220,2995781	0,612560241	12688,3534	29,03575838	4,90866E+08	20,70502583	25,07534659	217,2995781
221,7060478	0,613789731	12648,08854	29,31352659	4,90862E+08	20,8369239	25,49728752	218,7060478
222,4092827	0,614402863	12628,00894	29,45295174	4,90860E+08	20,90287219	25,97950573	219,4092827
222,4092827	0,614402863	12628,00894	29,45295174	4,90860E+08	20,90287219	26,70283303	219,4092827
218,8931083	0,611326429	12728,75979	28,75942772	4,90870E+08	20,57312571	27,30560579	215,8931083
220,2995781	0,612560241	12688,3534	29,03575838	4,90866E+08	20,70502583	27,78782399	217,2995781
213,9704641	0,606973703	12871,30822	27,80350173	4,90884E+08	20,11145846	28,27004219	210,9704641
218,8931083	0,611326429	12728,75979	28,75942772	4,90870E+08	20,57312571	28,9933695	215,8931083
212,5639944	0,60572014	12912,36142	27,53356357	4,90888E+08	19,97954848	29,29475588	209,5639944
216,0801688	0,608845743	12810,00034	28,21105425	4,90878E+08	20,30931915	30,31946956	213,0801688
215,3769339	0,608222832	12830,40018	28,07484969	4,90880E+08	20,24336614	31,10307414	212,3769339
213,9704641	0,606973703	12871,30822	27,80350173	4,90884E+08	20,11145846	31,82640145	210,9704641
210,8059072	0,604146914	12963,88335	27,19811411	4,90894E+08	19,81465769	32,45931284	207,8059072
205,5316456	0,599384923	13119,8349	26,20480709	4,90912E+08	19,31996198	33,21277878	202,5316456
201,3122363	0,595528888	13246,11708	25,42408403	4,90927E+08	18,9241783	33,93610609	198,3122363
197,092827	0,591630727	13373,77883	24,6555629	4,90944E+08	18,52836827	34,59915612	194,092827
194,2798875	0,589008146	13459,66635	24,14991606	4,90956E+08	18,26447914	35,26220615	191,2798875
193,5766526	0,588349488	13481,23687	24,02433526	4,90960E+08	18,19850478	35,8649789	190,5766526
192,8734177	0,587689618	13502,84713	23,89908537	4,90963E+08	18,13252956	36,88969259	189,8734177
190,0604782	0,585037922	13589,68811	23,4013806	4,90976E+08	17,86861988	38,15551537	187,0604782
187,2475387	0,58236648	13677,17577	22,9089131	4,90990E+08	17,60469546	38,8185654	184,2475387
185,137834	0,580349771	13743,22144	22,54297204	4,91001E+08	17,40674194	39,3007836	182,137834
180,2151899	0,575599603	13898,78579	21,7003596	4,91029E+08	16,94481383	39,72272453	177,2151899
175,2925457	0,570785759	14056,43546	20,87330346	4,91060E+08	16,48282986	39,90355636	172,2925457
170,3699015	0,565906447	14216,22917	20,06156714	4,91095E+08	16,02078346	40,02411091	167,3699015
164,0407876	0,55953369	14424,93204	19,04004206	4,91147E+08	15,42661985	40,32549729	161,0407876
155,6019691	0,550855291	14709,14294	17,71596185	4,91229E+08	14,63418841	40,50632911	152,6019691
147,1631505	0,541957973	15000,52325	16,43422122	4,91331E+08	13,84146067	40,74743822	144,1631505
142,9437412	0,537422656	15149,05138	15,8088822	4,91391E+08	13,4449634	40,80771549	139,9437412
136,6146273	0,530505381	15375,58679	14,88990623	4,91496E+08	12,85001927	40,98854732	133,6146273
129,5822785	0,52264955	15632,85919	13,89512062	4,91638E+08	12,18863975	41,10910187	126,5822785
100,0464135	0,487342573	16789,13548	10,00611513	4,92776E+08	9,404696385	41,83242917	97,0464135
91,60759494	0,476400948	17147,46527	8,976797587	4,93413E+08	8,606186236	42,19409283	88,60759494
81,05907173	0,462005167	17618,91598	7,738753794	4,94630E+08	7,604482968	42,37492465	78,05907173
71,91701828	0,448712594	18054,23751	6,708214462	4,96342E+08	6,731406648	42,55575648	68,91701828
64,1814346	0,436687159	18448,06122	5,866148014	4,98650E+08	5,986988118	42,55575648	61,1814346
57,14908579	0,42493092	18833,06899	5,12388482	5,01974E+08	5,303223618	42,61603376	54,14908579
50,81997187	0,413445067	19209,22183	4,474410983	5,06745E+08	4,679035892	41,95298373	47,81997187
46,60056259	0,405153241	19480,77274	4,051051022	5,11519E+08	4,25610314	41,22965642	43,60056259
41,67791842	0,394621467	19825,6802	3,566747605	5,19814E+08	3,752774329	40,32549729	38,67791842



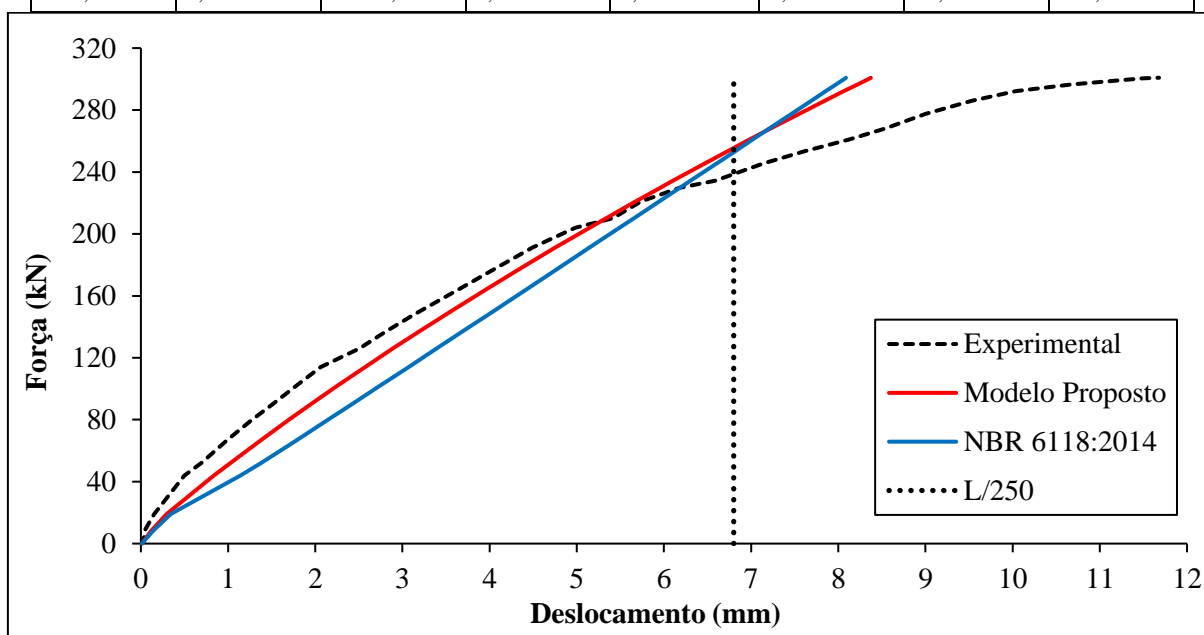
A.7 CARELLI (2002) – VIGA VC2

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
170	15	35	53593,7500	12,257	9,865	30549,3409	2,57	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
6,029	31,2	210000	17,5	20	1,3125	3	0,576869815	18,766

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,4286
8,0000	21287,37	<i>X3 (cm)</i>	17,998
10,1541	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,576869815
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,850	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,22104189
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		25044	1,547293229

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,47414063	-6,72294625	25043,96135	0,010634489	5,35938E+08	0,012511163	0	0
1,11095059	-2,63002931	25043,96135	0,025234884	5,35938E+08	0,029688098	0,030790536	1,123782292
5,25324623	-0,22369811	25043,96135	0,120206942	5,35938E+08	0,141419931	0,042829202	8,433715782
11,3061356	0,126675035	21871,51668	0,296549339	4,72429E+08	0,345646008	0,153443842	19,11528526
25,3221804	0,304707458	17412,87955	0,83466359	3,20352E+08	1,14221099	0,497927782	43,84948198

30,0993201	0,330059917	16777,95355	1,029737979	3,14341E+08	1,383747941	0,695010343	52,27972841
38,3803071	0,361422413	15992,51241	1,377630917	3,09761E+08	1,790668795	0,990553232	66,8932349
45,7055057	0,381760676	15483,16173	1,694605836	3,08020E+08	2,144574856	1,273826165	79,82005606
51,1196192	0,394144286	15173,02709	1,934129643	3,07299E+08	2,404297591	1,495541155	89,37437389
58,1261671	0,407944945	14827,40391	2,250543077	3,06722E+08	2,739049245	1,778837216	101,7388702
65,132715	0,419965574	14526,35975	2,57413568	3,06367E+08	3,072833668	2,062133278	114,1033666
71,8184824	0,4302383	14269,09	2,889584464	3,06145E+08	3,39076042	2,505863935	125,9017796
78,1874012	0,439202633	14044,58758	3,196158533	3,05998E+08	3,693266763	2,813884942	137,1410481
84,5559924	0,447537924	13835,83888	3,508679769	3,05892E+08	3,9955136	3,146584636	148,3797384
93,4716596	0,458376929	13564,38725	3,956304059	3,05789E+08	4,418352996	3,639510763	164,1132687
100,15841	0,465996862	13373,55394	4,299853642	3,05734E+08	4,73532327	4,009205358	175,9134164
108,75559	0,475278384	13141,10788	4,751560115	3,05681E+08	5,142709647	4,489815271	191,084911
116,078004	0,482802666	12952,67003	5,145289843	3,05648E+08	5,48959443	4,982857044	204,0068173
119,577428	0,486291477	12865,2964	5,336416949	3,05635E+08	5,655348212	5,414479647	210,1822713
125,627532	0,492177548	12717,88586	5,671423157	3,05615E+08	5,941886765	5,734863127	220,8589259
130,720046	0,497001496	12597,0751	5,957938392	3,05601E+08	6,183047112	6,178709428	229,8457148
133,263845	0,499369986	12537,75871	6,102624129	3,05595E+08	6,303503258	6,585722732	234,3347726
139,629487	0,505185807	12392,10753	6,469305959	3,05582E+08	6,604915132	7,140530609	245,5682589
144,084372	0,509167866	12292,38098	6,729883991	3,05574E+08	6,815838527	7,609101856	253,42982
148,220114	0,512804446	12201,30663	6,974745765	3,05568E+08	7,011642371	8,114714262	260,728189
152,357004	0,516387407	12111,57509	7,222543994	3,05562E+08	7,207492561	8,533951264	268,0285817
157,76784	0,520996135	11996,15427	7,551023911	3,05555E+08	7,46364383	9,002453124	277,5771173
162,540557	0,524992599	11896,06698	7,844921134	3,05550E+08	7,689577355	9,532697959	285,9995577
166,038998	0,527883294	11823,67254	8,062849064	3,05546E+08	7,855183825	10,03835662	292,173277
168,579684	0,529962897	11771,59103	8,222451063	3,05544E+08	7,975450588	10,67981745	296,6568416
170,799426	0,531766627	11726,4185	8,362816947	3,05542E+08	8,080523555	11,49405222	300,5740339
170,956294	0,531893639	11723,23762	8,372769278	3,05542E+08	8,087948951	11,67913081	300,8508596



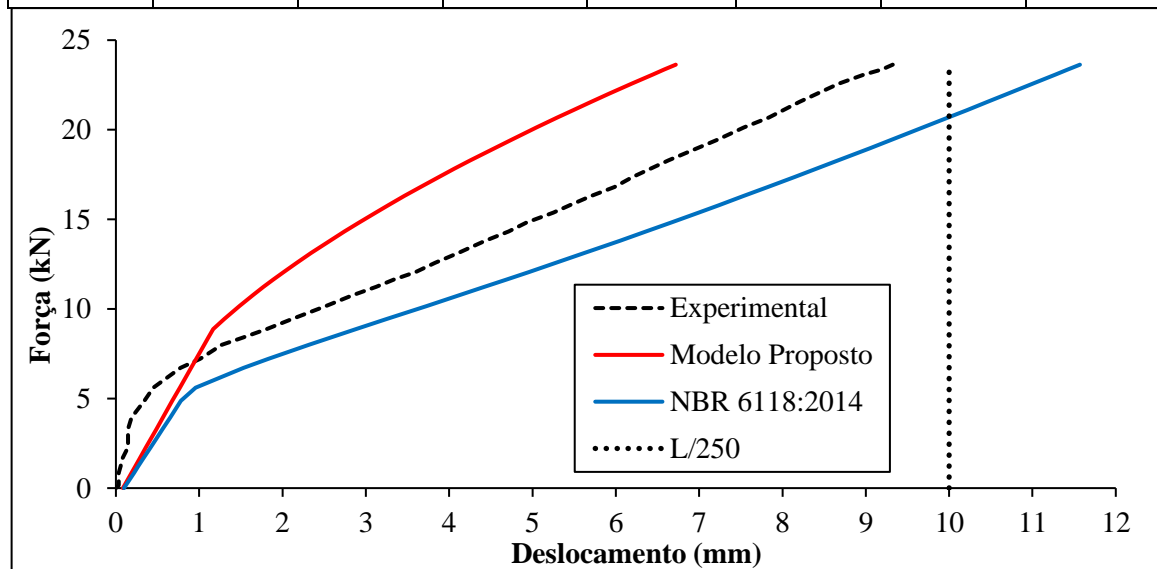
A.8 BEBER (1999) – VIGA VT1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
250	12	25	15625,0000	6,032	8,509	4443,9880	10,00	2,41
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
1,57	22,37	214800	12,5	27	0,75	2	0,193997904	12,873

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,9286
8,0000	25242,91	<i>X3 (cm)</i>	4,340
5,0625	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,08060021
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,868	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,27
<i>osd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		29098	1,89

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,5859375	-11,6346939	29098,45357	0,083901581	1,56250E+08	0,09671652	0	0
0,720423571	-9,29126331	29098,45357	0,103586855	1,56250E+08	0,119408479	0,032477438	0,161383285
1,296792447	-4,75346706	29098,45357	0,187952317	1,56250E+08	0,216659731	0,033714281	0,853025937
1,604189181	-3,66657773	29098,45357	0,23294723	1,56250E+08	0,268527066	0,055833158	1,221902017
1,950010507	-2,85340376	29098,45357	0,283566507	1,56250E+08	0,326877818	0,078034491	1,636887608
2,487954791	-2,03776416	29098,45357	0,362307605	1,56250E+08	0,417645654	0,143566561	2,282420749
2,872200708	-1,64220889	29098,45357	0,418551246	1,56250E+08	0,482479822	0,144391123	2,74351585
3,333295809	-1,28789892	29098,45357	0,486043615	1,56250E+08	0,560280824	0,145380597	3,296829971
3,871240094	-0,98119047	29098,45357	0,564784713	1,56250E+08	0,65104866	0,189453439	3,942363112
4,639731928	-0,66637764	29098,45357	0,677271995	1,56250E+08	0,780716997	0,341317155	4,864553314
5,254525396	-0,48080099	29098,45357	0,767261821	1,44434E+08	0,956805824	0,449932592	5,602305476
6,176715598	-0,27167835	29098,45357	0,90224656	1,06001E+08	1,533089885	0,773799953	6,708933718
6,599386107	-0,19534151	29098,45357	0,964114565	9,49136E+07	1,829576545	1,010758473	7,216138329
7,252604167	-0,09489982	29098,45357	1,059728755	8,24671E+07	2,314539878	1,269670959	8
7,598425492	-0,04865101	29098,45357	1,110348032	7,75077E+07	2,580268453	1,527923794	8,414985591
7,98267141	-0,00199451	29098,45357	1,166591674	7,29587E+07	2,879999166	1,807718313	8,876080692
8,443766511	0,048387103	27690,4637	1,296834087	6,85371E+07	3,243167147	2,109136972	9,429394813
9,058559978	0,107599784	25967,46625	1,483722039	6,39562E+07	3,728892479	2,518181593	10,16714697
9,558079671	0,150110004	24730,48457	1,643966407	6,10535E+07	4,121882706	2,841141936	10,76657061
9,942325588	0,179908623	23863,39086	1,77228329	5,92008E+07	4,421999007	3,120936455	11,22766571
10,28814691	0,204827957	23138,27676	1,891481893	5,77617E+07	4,690008088	3,336270836	11,6426513
10,63396824	0,228129895	22460,22642	2,014163765	5,65038E+07	4,955774346	3,594523671	12,05763689
11,05663875	0,254634935	21688,97072	2,168790677	5,51725E+07	5,277330993	3,831482192	12,5648415
11,51773385	0,281336186	20912,00561	2,343283661	5,39344E+07	5,623865994	4,111441623	13,11815562
12,09410273	0,31185702	20023,89655	2,569812794	5,26407E+07	6,05075225	4,434566878	13,80979827
12,51677323	0,332457568	19424,45245	2,741798203	5,18376E+07	6,359454303	4,714443854	14,31700288
12,93944374	0,351716393	18864,05044	2,918683465	5,11361E+07	6,664614254	4,929943146	14,82420749
13,40053884	0,371344968	18292,88927	3,117173829	5,04684E+07	6,993660959	5,252821033	15,37752161
13,74636017	0,385205268	17889,57597	3,269784509	5,00248E+07	7,237938433	5,446696186	15,7925072
14,16903068	0,401230242	17423,274	3,460619494	4,95397E+07	7,533742611	5,705113934	16,29971182
14,59170119	0,416330479	16983,88046	3,656148257	4,91093E+07	7,826688313	5,984990909	16,80691643

15,05279629	0,431840335	16532,56764	3,874746495	4,86932E+07	8,143220873	6,200572658	17,36023055
15,43704221	0,444060559	16176,978	4,061086778	4,83834E+07	8,404733003	6,415989495	17,82132565
15,82128812	0,45568997	15838,58014	4,251183747	4,81030E+07	8,664322854	6,631406332	18,28242075
16,397657	0,472117158	15360,57436	4,543294887	4,77301E+07	9,050368514	6,975990814	18,9740634
16,78190292	0,482444991	15060,0504	4,742628346	4,75093E+07	9,305672382	7,212866879	19,4351585
17,35827179	0,497084121	14634,07434	5,048431809	4,72136E+07	9,685802542	7,535992134	20,12680115
17,81936689	0,508117533	14313,01913	5,298885529	4,70038E+07	9,987659506	7,837410793	20,68011527
18,16518822	0,516027263	14082,85821	5,490078185	4,68601E+07	10,21284337	8,009826718	21,09510086
18,54943414	0,524472173	13837,1244	5,705852848	4,67128E+07	10,46191389	8,203784328	21,55619597
18,93368006	0,532576604	13601,298	5,925110871	4,65772E+07	10,70986559	8,419201164	22,01729107
19,39477516	0,541880978	13330,5551	6,192774537	4,64284E+07	11,00603173	8,677701368	22,57060519
19,81744567	0,550032392	13093,36155	6,442454456	4,63038E+07	11,27629108	8,979037571	23,0778098
20,04799322	0,554334846	12968,16679	6,580370892	4,62403E+07	11,42324132	9,194124583	23,35446686
20,27854077	0,558540236	12845,79643	6,719498437	4,61795E+07	11,56988006	9,323374685	23,63112392



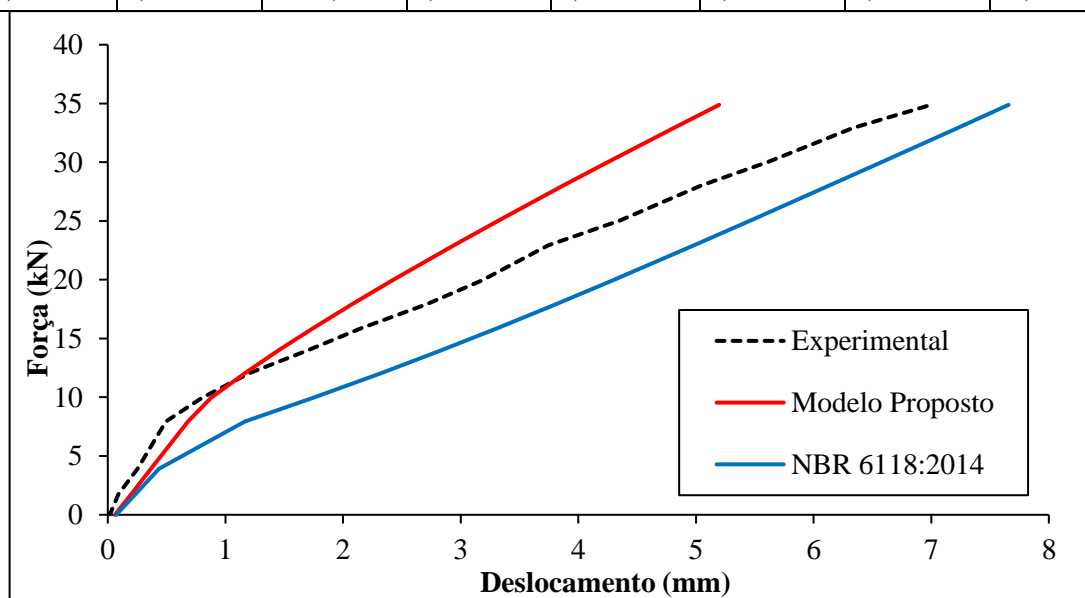
A.9 FERNANDES (1996) – VIGA VREF

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm4)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm4)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
240	12	30	27000,0000	8,844	10,682	11522,1593	5,99	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
2,355	27,5	210000	15	17,33	0,9	3	0,368796498	15,745

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,2379
8,0000	19659,94	<i>X3 (cm)</i>	10,142
5,4244	<i>ai</i>	A	0,368796498
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,843	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,20090325
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		23312	1,406322753

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,648	-7,16565205	23312,41729	0,061769656	2,70000E+08	0,073245375	0	0
0,759519845	-6,02101705	23312,41729	0,072636356	2,70000E+08	0,086130917	0,024249221	0,139399806
2,041998064	-1,84478382	23312,41729	0,197603399	2,70000E+08	0,234314646	0,089189931	1,74249758

3,770555663	-0,71022112	23312,41729	0,366037239	2,70000E+08	0,434040541	0,251127524	3,903194579
7,004631171	-0,09021593	23312,41729	0,681171522	1,87101E+08	1,165596671	0,494213654	7,945788964
8,621668925	0,045835469	22243,88172	0,879029387	1,53768E+08	1,746338091	0,801427758	9,967086157
10,2944666	0,141872936	20005,0162	1,167355274	1,37865E+08	2,326311655	1,205529338	12,05808325
11,85574443	0,207275384	18480,32705	1,455578548	1,30046E+08	2,84072979	1,706471506	14,00968054
13,36126234	0,256043188	17343,43165	1,748183989	1,25578E+08	3,315806556	2,158962121	15,89157793
14,9783001	0,297675494	16372,88196	2,076163534	1,22573E+08	3,80866772	2,708355841	17,91287512
16,59533785	0,331354695	15587,73837	2,416389763	1,20627E+08	4,288329336	3,177023023	19,93417231
18,99301452	0,370993505	14663,66188	2,940099541	1,18827E+08	4,982760527	3,742780865	22,93126815
20,69369216	0,39371089	14134,06474	3,323594039	1,18009E+08	5,466889047	4,356779261	25,0571152
23,06348887	0,41998929	13521,4517	3,872301316	1,17235E+08	6,133603489	5,043619097	28,01936108
24,68052662	0,435154435	13167,91551	4,255222179	1,16865E+08	6,584714281	5,617230779	30,04065828
26,99456341	0,453863633	12731,75889	4,81386618	1,16477E+08	7,226401989	6,3363456	32,93320426
28,55584124	0,464878648	12474,97226	5,197253237	1,16283E+08	7,657386794	6,998740846	34,88480155



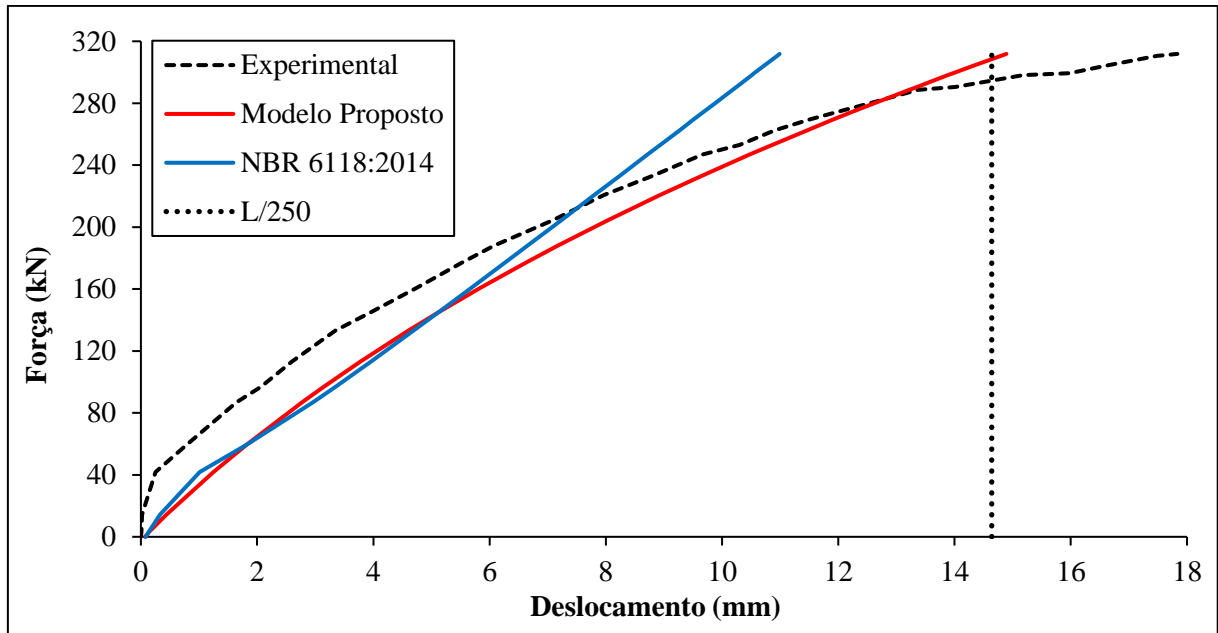
A.10 BRESLER E SCORDELIS (1962) – VIGA C1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (‰)</i>	<i>ecc (‰)</i>
366	15,5	56	226837,3333	18,842	7,716	110386,2726	2,93	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>X1 (cm)</i>
12,94	46,4	205460	28	29,6	2,17	3	0,544378878	29,675

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,1143
4,5000	26628,41	<i>X3 (cm)</i>	25,259
34,8843	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,544378878
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,874	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,287066421
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		30467	2,00946495

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
3,6335565	-0,19594289	30467,29394	0,073362554	2,26837E+09	0,083938848	0	0
6,4929315	0,142023427	26140,22443	0,139336949	2,26837E+09	0,136782424	0,011042945	3,125

16,7866815	0,346758876	19902,48933	0,437533481	2,26837E+09	0,327019294	0,02208589	14,375
41,9491815	0,446208019	16872,54307	1,250009736	1,77354E+09	1,013031549	0,25398773	41,875
57,9616815	0,475698293	15974,05421	1,813617904	1,35773E+09	1,817673828	0,78404908	59,375
83,1241815	0,510513296	14913,3353	2,772932249	1,18993E+09	2,96047128	1,645398773	86,875
92,2741815	0,52142754	14580,80782	3,144991622	1,16678E+09	3,347958438	2,065030675	96,875
107,1429315	0,537944397	14077,58386	3,777185795	1,14406E+09	3,959303179	2,595092025	113,125
125,4429315	0,556727763	13505,30553	4,604068361	1,12891E+09	4,691994778	3,34601227	133,125
136,8804315	0,567793769	13168,15428	5,149386243	1,12314E+09	5,14299749	3,986503067	145,625
150,6054315	0,580508675	12780,76549	5,833937538	1,11833E+09	5,679580544	4,737423313	160,625
165,4741815	0,593679471	12379,487	6,614112434	1,11477E+09	6,256867013	5,510429448	176,875
175,7679315	0,602469829	12111,66858	7,178616611	1,11297E+09	6,65475263	6,084662577	188,125
190,6366815	0,614738072	11737,88841	8,030588915	1,11100E+09	7,22758633	7,078527607	204,375
205,5054315	0,626540313	11378,30607	8,927452583	1,10956E+09	7,798734216	7,96196319	220,625
216,9429315	0,635325053	11110,6588	9,64909934	1,10870E+09	8,237207903	8,801226994	233,125
229,5241815	0,644711152	10824,68977	10,4759833	1,10795E+09	8,718843633	9,662576687	246,875
235,2429315	0,648885721	10697,50196	10,86361574	1,10766E+09	8,937570359	10,30306748	253,125
243,8210565	0,655043854	10509,88029	11,45921449	1,10727E+09	9,265460959	10,8993865	262,5
250,1116815	0,659482798	10374,63769	11,90698757	1,10702E+09	9,505778226	11,49570552	269,375
254,6866815	0,662671167	10277,49672	12,23859374	1,10686E+09	9,680489424	11,98159509	274,375
260,4054315	0,666610246	10157,48363	12,66026045	1,10666E+09	9,898807864	12,6	280,625
267,8398065	0,67165557	10003,76625	13,22051622	1,10644E+09	10,18251478	13,37300613	288,75
269,5554315	0,672807961	9968,656027	13,3517736	1,10639E+09	10,24796966	14,01349693	290,625
276,4179315	0,677373623	9829,552661	13,88429165	1,10620E+09	10,50973396	15,18404908	298,125
277,5616815	0,678127809	9806,574659	13,97422004	1,10617E+09	10,55335314	15,9791411	299,375
282,1366815	0,6811255	9715,243119	14,33733109	1,10606E+09	10,72780784	16,6196319	304,375
287,8554315	0,684830253	9602,369327	14,79894531	1,10594E+09	10,94582921	17,4809816	310,625
288,9991815	0,685565621	9579,964645	14,89230911	1,10591E+09	10,98942754	17,83435583	311,875



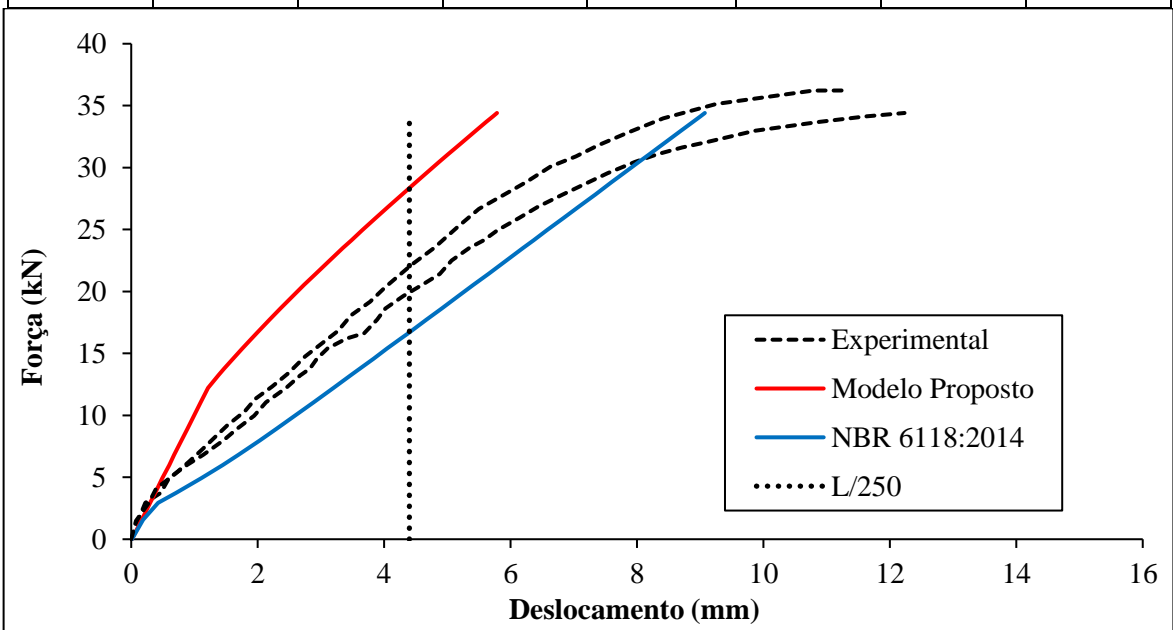
A.11 NORA (2018) – VIGA VT1

<i>L</i> (cm)	<i>b_w</i> (cm)	<i>h</i> (cm)	<i>I_c</i> (cm ⁴)	<i>X₂</i> (cm)	<i>ae</i>	<i>I₂</i> (cm ⁴)	<i>est</i> (%)	<i>ecc</i> (%)
<i>A_s</i> (cm ²)	<i>d</i> (cm)	<i>E_s</i> (MPa)	<i>Y_t</i> (cm)	<i>F_{ck}</i> (MPa)	<i>g</i> (kN/m)	<i>Domínio</i>	<i>β_x</i>	<i>X₁</i> (cm)
110	7	14	1600,6667	4,270	8,028	686,4720	6,02	3,50
1,005	12,18	210000	7	28,71	0,245	3	0,36770194	7,348

<i>Mr Modelo</i> (kN.m)	<i>E_{cs}</i> (MPa)	<i>F_{cd}</i> (kN/cm ²)	2,0507
4,5000	26158,27	<i>X₃</i> (cm)	4,479
0,9648	<i>a_i</i>	<i>A</i>	0,36770194
<i>Mr NBR</i> (kN.m)	0,872	<i>F_{ct,m}</i> (kN/cm ²)	0,281282934
<i>σ_{sd CA-50 - Dom}</i>	43,5	<i>E_{ci}</i> (Mpa)	<i>F_{ct,inf}</i> (MPa)
<i>2 e 3</i> (kN/cm ²)		30006	1,968980536

<i>Ma</i> (kN.m)	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E</i> (MPa)	<i>δ</i> (mm)	<i>I_{eq}</i> (mm ⁴)	<i>δ</i> (mm)	<i>δ</i> (mm)	<i>Carga</i> (kN)
0,03705625	-76,1552981	30005,75945	0,009724563	1,60067E+07	0,0111549	0	0
0,616315401	-3,9872119	30005,75945	0,165115911	1,60067E+07	0,18940198	0,112219451	1,579797684
1,112805552	-1,92707026	30005,75945	0,298303749	1,28226E+07	0,427147989	0,224438903	2,933861734
1,410505621	-1,3871947	30005,75945	0,378164403	9,79040E+06	0,709213059	0,467581047	3,745771013
1,840759933	-0,91537997	30005,75945	0,493583896	8,18103E+06	1,107769055	0,598503741	4,919191862
2,23774152	-0,64086117	30005,75945	0,600077689	7,59741E+06	1,450234673	0,879052369	6,001868917
2,535420948	-0,49133286	30005,75945	0,679932807	7,36845E+06	1,694283652	1,140897756	6,813721903
2,965468853	-0,32835819	30005,75945	0,795296929	7,17955E+06	2,033896183	1,458852868	7,986579826
3,296317803	-0,23176225	30005,75945	0,884050062	7,09395E+06	2,288155092	1,664588529	8,888895144
3,693299389	-0,13869796	30005,75945	0,990543855	7,02769E+06	2,587960193	1,945137157	9,971572198
4,090384179	-0,06315743	30005,75945	1,097065332	6,98469E+06	2,883912449	2,132169576	11,05453072
4,520432084	0,002872742	29919,56065	1,215922486	6,95360E+06	3,201423733	2,450124688	12,22738864
4,884367993	0,050035921	28504,39364	1,379061044	6,93518E+06	3,468403251	2,674563591	13,21994112
5,082848466	0,072927137	27817,5253	1,470545237	6,92724E+06	3,613502883	2,824189526	13,7612515

5,38069302	0,104129403	26881,27764	1,610949172	6,91742E+06	3,830709843	2,936408978	14,57355483
5,678475651	0,132075446	26042,73538	1,754858521	6,90956E+06	4,047345075	3,104738155	15,38568928
5,976113798	0,157246221	25287,46717	1,902013236	6,90319E+06	4,263448779	3,403990025	16,19742968
6,141342187	0,170175118	24899,52579	1,985060755	6,90017E+06	4,38325995	3,684538653	16,64805255
6,538406336	0,198597389	24046,69397	2,188374138	6,89409E+06	4,670804856	3,890274314	17,73095478
6,869337848	0,219800503	23410,47843	2,36163191	6,89005E+06	4,910119767	4,021197007	18,63349527
7,233211835	0,240899825	22777,37726	2,555863482	6,88642E+06	5,172970944	4,301745636	19,62587887
7,563957582	0,25833871	22254,11026	2,735590885	6,88369E+06	5,41167659	4,600997506	20,52791272
7,894723969	0,274337156	21774,06475	2,918177313	6,88141E+06	5,65022692	4,881546135	21,43000287
8,291808759	0,291882244	21247,61106	3,140910262	6,87912E+06	5,936418659	5,068578554	22,51296139
8,655682746	0,306569264	20806,91587	3,348202776	6,87738E+06	6,1985238	5,349127182	23,50534499
8,887188256	0,315298549	20544,98703	3,481590548	6,87642E+06	6,36521745	5,573566085	24,13672365
9,184908966	0,325889955	20227,18386	3,654768697	6,87532E+06	6,579524894	5,798004988	24,94868923
9,548721031	0,337953815	19865,19858	3,868781553	6,87415E+06	6,841320952	6,134663342	25,94090395
9,879466777	0,348166678	19558,75385	4,065514033	6,87323E+06	7,07925165	6,433915212	26,8429378
10,24321692	0,358654622	19244,05515	4,284145136	6,87236E+06	7,340857261	6,826683292	27,83498365
10,60694642	0,368440371	18950,42631	4,505022457	6,87160E+06	7,602386375	7,238154613	28,8269732
10,87147697	0,375156817	18748,89423	4,667015714	6,87111E+06	7,792555269	7,537406484	29,54842015
11,20207823	0,383117279	18510,03453	4,871006334	6,87056E+06	8,03018603	7,967581047	30,45005995
11,43343926	0,388422384	18350,85082	5,014742506	6,87021E+06	8,196463101	8,322942643	31,08104457
11,6316514	0,392804702	18219,35605	5,138505555	6,86994E+06	8,33890354	8,715710723	31,62162314
11,79675595	0,396346202	18113,09065	5,2420231	6,86972E+06	8,457543553	9,108478803	32,07190827
12,12700632	0,403150244	17908,93021	5,450215366	6,86932E+06	8,69483196	9,856608479	32,9725911
12,39073188	0,408332142	17753,44342	5,617520645	6,86904E+06	8,884302848	10,88528678	33,69184263
12,55546489	0,411462454	17659,51602	5,72248535	6,86887E+06	9,002645799	11,61471322	34,14111448
12,65410655	0,413299308	17604,39982	5,785503616	6,86877E+06	9,073506518	12,2319202	34,41013719

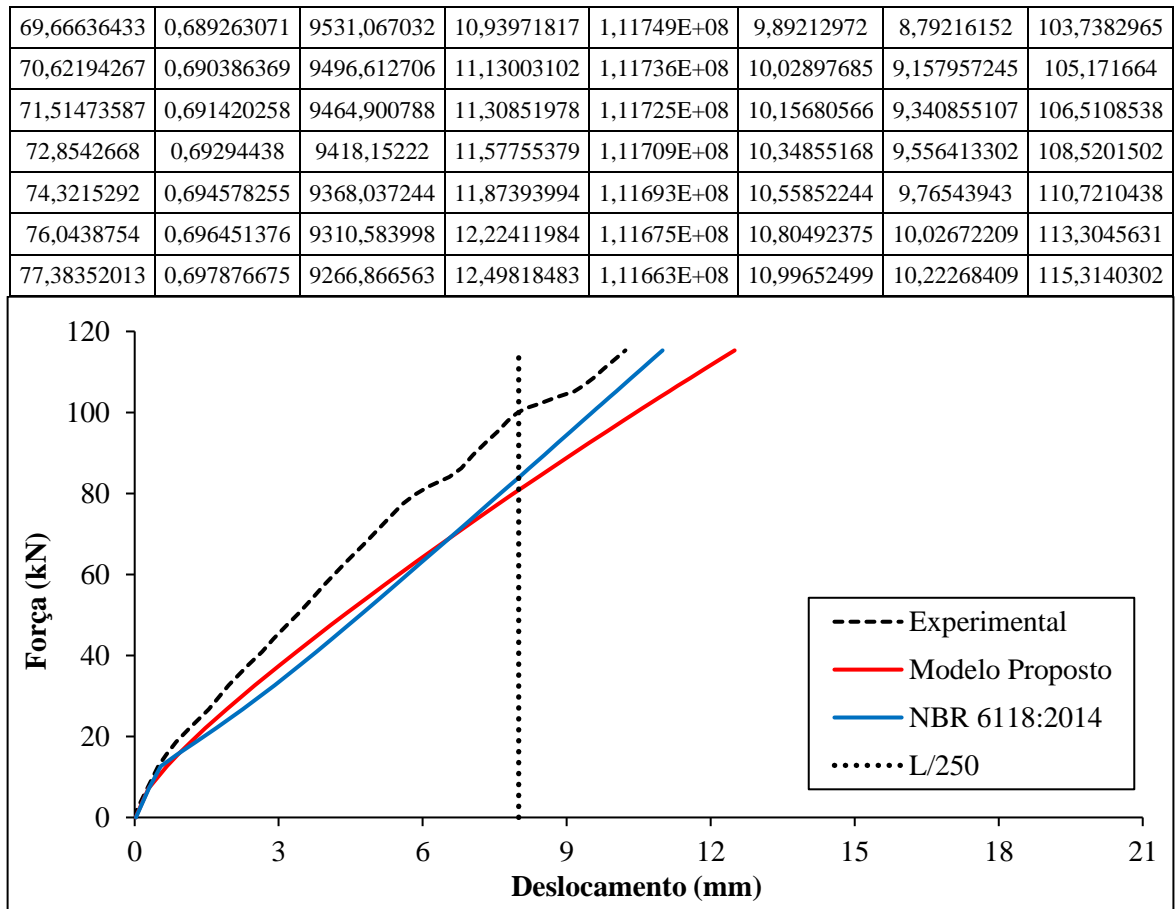


A.12 ALMEIDA (2016) – VIGA VRF

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
200	14	29	28453,8333	8,300	7,456	11143,1278	8,04	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
3,68	25,875	200100	14,5	30	1,015	3	0,303267974	15,129

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,1429
4,5000	26838,41	<i>X3 (cm)</i>	7,847
8,5258	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,303267974
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,875	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,289646815
<i>osd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		30672	2,027527708

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,5075	-5,48365364	30672,46322	0,024228993	2,84538E+08	0,027690278	0	0
1,273547472	-1,76717247	30672,46322	0,061614246	2,84538E+08	0,070416281	0,0195962	1,149071208
5,294491031	0,10503969	27450,63718	0,288110547	2,84538E+08	0,294682862	0,26128266	7,180486547
8,932429813	0,348443984	19984,82793	0,668229671	2,61955E+08	0,540485329	0,489904988	12,63739472
10,846885	0,411559435	18048,9216	0,898680079	1,95493E+08	0,879648842	0,653206651	15,5090775
12,9526151	0,459826348	16568,45648	1,169226437	1,60799E+08	1,277268254	0,862232779	18,66767265
15,18562167	0,496767127	15435,3918	1,471609471	1,42066E+08	1,695133214	1,143111639	22,01718251
18,31180056	0,533889732	14296,75006	1,916131376	1,28902E+08	2,25312759	1,541567696	26,70645084
22,26787368	0,566663773	13291,48948	2,506589208	1,21147E+08	2,915600943	1,959619952	32,64056052
25,58555495	0,586882395	12671,33454	3,021192979	1,17836E+08	3,444334856	2,364608076	37,61708242
27,8184857	0,598031107	12329,3761	3,376085259	1,16415E+08	3,7908046	2,658551069	40,96647855
29,92410205	0,60719394	12048,32944	3,716442673	1,15435E+08	4,112456629	2,887173397	44,12490308
32,15710863	0,615770671	11785,25996	4,083025513	1,14657E+08	4,449418	3,168052257	47,47441295
34,13491771	0,622567372	11576,78839	4,41228614	1,14128E+08	4,745060269	3,416270784	50,44112657
36,55946459	0,630059107	11346,99842	4,821487529	1,13627E+08	5,104648093	3,697149644	54,07794689
38,85643169	0,636449074	11151,00241	5,214575631	1,13260E+08	5,443030585	3,958432304	57,52339753
42,42934837	0,645285499	10879,9675	5,836051497	1,12836E+08	5,9660111	4,389548694	62,88277256
45,68318287	0,652395252	10661,89385	6,412249277	1,12557E+08	6,439589575	4,794536817	67,76352431
49,19225279	0,659268758	10451,06648	7,044204931	1,12332E+08	6,948184049	5,225653207	73,02712919
52,06331	0,664391235	10293,94751	7,569219145	1,12191E+08	7,363042422	5,578384798	77,333715
53,59415379	0,666964792	10215,01018	7,852039873	1,12128E+08	7,583866337	5,833135392	79,62998068
54,99707656	0,669236882	10145,31957	8,112973102	1,12076E+08	7,786038016	6,127078385	81,73436484
56,59074345	0,67172544	10068,98938	8,411397051	1,12023E+08	8,015489543	6,558194774	84,12486517
57,99393161	0,673841155	10004,09517	8,675917299	1,11981E+08	8,217351423	6,806413302	86,22964742
60,16335682	0,676984795	9907,671992	9,088120679	1,11924E+08	8,529173177	7,041567696	89,48378523
62,14109007	0,679727488	9823,546844	9,467312828	1,11878E+08	8,81318882	7,302850356	92,45038511
64,05497655	0,682279996	9745,25515	9,837350544	1,11839E+08	9,087833746	7,564133017	95,32121483
65,77762605	0,684498978	9677,193507	10,17300398	1,11808E+08	9,334884922	7,773159145	97,90518907
66,92588211	0,685939602	9633,005996	10,39809947	1,11789E+08	9,499488255	7,942992874	99,62757316
67,81859947	0,687039488	9599,269788	10,5738527	1,11775E+08	9,627422983	8,138954869	100,9666492
68,4556264	0,687813979	9575,514244	10,69966885	1,11766E+08	9,718696138	8,387173397	101,9221896



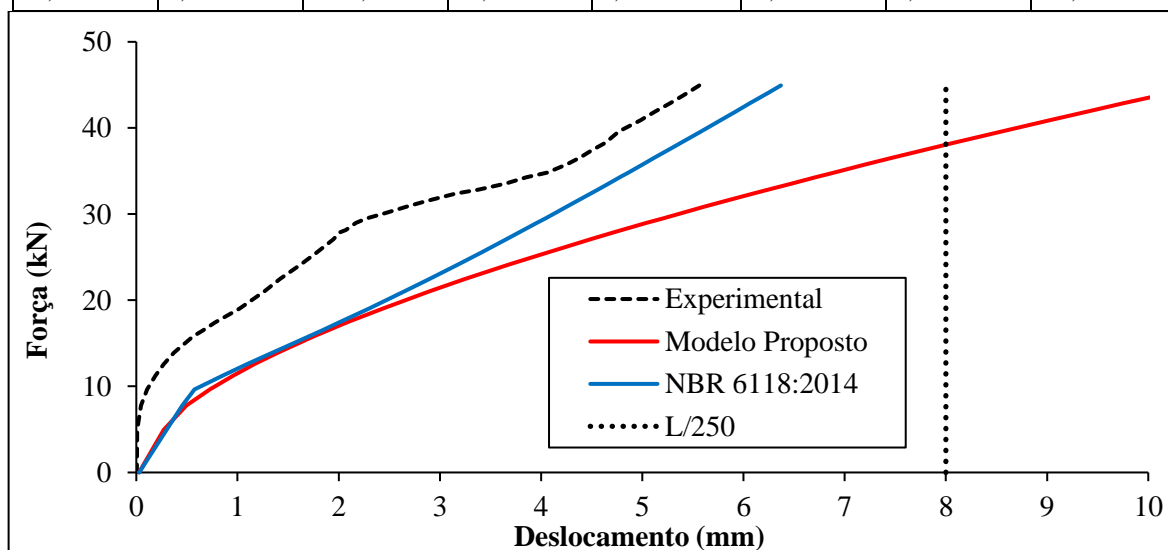
A.13 BRANCO (2016) – VIGA VREF

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
200	12	25	15625,0000	6,956	7,433	5975,6876	10,00	2,44
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
2,45	22,9	248000	12,5	40,7	0,75	2	0,196183883	13,019

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,9071
4,5000	33364,75	<i>X3 (cm)</i>	4,493
6,6556	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,080381612
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,902	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,354963906
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		37000	2,484747339

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,375	-10,1163044	37000	0,027027027	1,56250E+08	0,029971752	0	0
0,555799031	-6,52681934	37000	0,040347156	1,56250E+08	0,044743173	0,006528781	0,271198547
3,690199465	-0,20196874	37000	0,271269951	1,56250E+08	0,300826117	0,01009047	4,972799198
5,558614205	0,175348526	30512,10454	0,49587364	1,56250E+08	0,453477048	0,046084129	7,775421307
6,793987038	0,310965652	25494,27087	0,725562354	1,50472E+08	0,575697631	0,108060455	9,628480557
7,87856864	0,39503216	22383,81007	0,958468296	1,17928E+08	0,851972021	0,189555422	11,25535296
8,75217988	0,44763439	20437,52756	1,166264938	1,02190E+08	1,09231958	0,271029784	12,56576982
9,65583162	0,492062987	18793,66948	1,399346709	9,13566E+07	1,348121359	0,37204045	13,92124743

10,92070531	0,541951459	16947,796	1,755202359	8,15993E+07	1,707206961	0,560986558	15,81855797
11,37229407	0,557087682	16387,75575	1,890302094	7,90992E+07	1,83404838	0,658697511	16,4959411
11,97447781	0,575505554	15706,2945	2,076830872	7,63254E+07	2,001419385	0,775956542	17,39921672
13,05825812	0,604400417	14637,18457	2,430359607	7,25329E+07	2,296809445	1,016973948	19,02488718
14,3831147	0,63385016	13547,54408	2,892412292	6,93177E+07	2,6473354	1,264526023	21,01217205
15,34676569	0,652104072	12872,14933	3,248247296	6,76274E+07	2,895408086	1,420887096	22,45764853
16,49098677	0,671035903	12171,6716	3,691439239	6,61001E+07	3,183286405	1,62935479	24,17398015
17,39439321	0,684243936	11682,97437	4,056638635	6,51622E+07	3,406088215	1,779198856	25,52908982
18,41825604	0,697666988	11186,32144	4,486245072	6,43100E+07	3,65446734	1,948588055	27,06488406
18,96042419	0,704196293	10944,73714	4,720304286	6,39305E+07	3,784423103	2,013752239	27,87813629
19,14096157	0,706289688	10867,28154	4,799233459	6,38135E+07	3,827476951	2,07236998	28,14894236
19,68296619	0,712347456	10643,14413	5,039120485	6,34875E+07	3,956112459	2,170089763	28,96194929
20,04410637	0,71620496	10500,41646	5,201367698	6,32895E+07	4,041334779	2,274303006	29,50365956
20,46509862	0,720532928	10340,28165	5,392901527	6,30759E+07	4,140220825	2,463166694	30,13514793
20,94626999	0,725270385	10164,99574	5,614931836	6,28524E+07	4,252673543	2,67156963	30,85690499
21,36726224	0,72924365	10017,98493	5,811882556	6,26730E+07	4,350597053	2,860433319	31,48839336
21,96853022	0,734659488	9817,598941	6,097454604	6,24401E+07	4,489755883	3,160003709	32,39029533
22,26880445	0,737256931	9721,493553	6,24193071	6,23330E+07	4,558964899	3,381411223	32,84070667
22,74968147	0,741276867	9572,755909	6,475849263	6,21730E+07	4,66942867	3,648414239	33,5620222
23,23085284	0,745136383	9429,953842	6,713008661	6,20260E+07	4,779529881	3,856817175	34,28377926
23,59150243	0,747928341	9326,651371	6,892770333	6,19235E+07	4,861789138	4,058697217	34,82475364
24,19332641	0,752406423	9160,962354	7,19651396	6,17658E+07	4,998587121	4,247578567	35,72748961
24,73513479	0,756256161	9018,522031	7,473943375	6,16367E+07	5,121275793	4,38436507	36,54020219
25,33728584	0,760346489	8867,179895	7,78661795	6,15058E+07	5,257150592	4,508135221	37,44342876
25,87915964	0,763869044	8736,845355	8,071843682	6,13982E+07	5,379026547	4,631899484	38,25623946
26,7826315	0,769434219	8530,933883	8,555364319	6,12377E+07	5,581470231	4,76872131	39,61144725
27,62546635	0,774307434	8350,624934	9,015223807	6,11062E+07	5,769553326	4,977159568	40,87569952
28,31790243	0,778100833	8210,269195	9,399238972	6,10096E+07	5,923573318	5,126983029	41,91435365
28,95006128	0,78141081	8087,800039	9,75463043	6,09294E+07	6,063827064	5,276800603	42,86259192
29,73284783	0,785321171	7943,116678	10,20094779	6,08392E+07	6,237066427	5,439655134	44,03677174
30,33499887	0,788196816	7836,717794	10,54889813	6,07760E+07	6,37002951	5,563425285	44,9399983



A.14 RIBEIRO ET AL (2013) – VIGA V2

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
180	20	30	45000,0000	6,414	8,696	10021,0216	10,00	1,89
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
2,355	26,5	210000	15	25	1,5	2	0,159178135	15,337

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,7857
8,0000	24150,00	<i>X3 (cm)</i>	4,218
11,5423	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,084082186
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,863	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,256496392
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		28000	1,795474744

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,6075	-11,1667483	28000	0,016272321	4,50000E+08	0,01886646	0	0
2,7363	-1,76270947	28000	0,074560893	4,50000E+08	0,086447412	0,145	3,548
6,3645	-0,23561751	28000	0,173904464	4,50000E+08	0,201628364	0,211	9,595
8,5269	0,056676521	26413,05741	0,247118874	4,50000E+08	0,270275983	0,302	13,199
10,4847	0,217431602	21911,91514	0,366382626	4,50000E+08	0,332428364	0,393	16,462
12,1485	0,313393854	19224,97209	0,483939584	4,00210E+08	0,433176274	0,454	19,235
13,7889	0,385392947	17208,99747	0,613711811	3,05373E+08	0,644442431	0,517	21,969
15,7125	0,450735699	15379,40043	0,782613409	2,38871E+08	0,938899845	0,629	25,175
17,7339	0,504191745	13882,63114	0,978623206	1,96654E+08	1,287298268	0,72	28,544
19,4097	0,54011347	12876,82285	1,154838051	1,73769E+08	1,594608114	0,853	31,337
21,4011	0,575535213	11885,01402	1,379668965	1,55086E+08	1,970142251	1,005	34,656
23,0043	0,599632175	11210,29911	1,572349215	1,44394E+08	2,274641242	1,157	37,328
24,7047	0,62180513	10589,45637	1,78764087	1,35884E+08	2,595857589	1,309	40,162
26,1129	0,638005881	10135,83532	1,974160429	1,30418E+08	2,858899215	1,46	42,509
27,8373	0,655639592	9642,091426	2,212362864	1,25145E+08	3,176209808	1,631	45,383
28,9059	0,665525911	9365,274499	2,365233929	1,22481E+08	3,369942251	1,745	47,164
30,8145	0,681503685	8917,896812	2,647970199	1,18593E+08	3,710308608	2,001	50,345
32,6253	0,694963635	8541,01821	2,92735648	1,15699E+08	4,026706908	2,322	53,363
34,7805	0,709191266	8142,644553	3,273497305	1,12995E+08	4,395568202	2,652	56,955
36,7005	0,72048852	7826,321432	3,593888297	1,11091E+08	4,717778568	2,904	60,155
38,1171	0,728111347	7612,882282	3,837309434	1,09923E+08	4,952038979	3,094	62,516
39,6681	0,735849041	7396,226841	4,110485745	1,08827E+08	5,205477626	3,303	65,101
41,2089	0,742975028	7196,699209	4,388590391	1,07896E+08	5,454393886	3,512	67,669
42,8439	0,749992769	7000,202474	4,690845033	1,07050E+08	5,715730369	3,74	70,394
44,3499	0,756013557	6831,620392	4,975607989	1,06376E+08	5,954157522	3,949	72,904
45,9039	0,761826167	6668,867333	5,275688246	1,05771E+08	6,198117128	4,138	75,494
47,2833	0,766677181	6533,038919	5,547250743	1,05298E+08	6,413078254	4,328	77,793
49,1373	0,772784635	6362,030227	5,919777753	1,04744E+08	6,699889286	4,556	80,883
50,6391	0,777417365	6232,313776	6,227732813	1,04352E+08	6,930621413	4,765	83,386
52,2825	0,782195124	6098,536528	6,570941211	1,03974E+08	7,181646604	4,955	86,125
53,7717	0,786283893	5984,050984	6,887448839	1,03670E+08	7,407926786	5,145	88,607

55,3815	0,790468379	5866,885386	7,235359515	1,03377E+08	7,651382519	5,354	91,29
56,9775	0,794395406	5756,928621	7,586098053	1,03118E+08	7,891684977	5,563	93,95
58,4343	0,797802645	5661,525951	7,911207224	1,02906E+08	8,110188539	5,753	96,378
59,9397	0,801159269	5567,540456	8,252054092	1,02708E+08	8,335214906	5,943	98,887
61,1679	0,803782573	5494,087946	8,533766744	1,02560E+08	8,518275571	6,152	100,934
62,9415	0,80740109	5392,769473	8,946242787	1,02367E+08	8,781858882	6,38	103,89
64,1649	0,80978788	5325,939374	9,234608498	1,02246E+08	8,963187511	6,588	105,929
65,9253	0,813077127	5233,840454	9,654976196	1,02088E+08	9,223472551	6,854	108,863
66,8355	0,814714508	5187,993779	9,874804631	1,02012E+08	9,357777408	7,082	110,38
68,4381	0,817499121	5110,024608	10,26591632	1,01888E+08	9,593831569	7,31	113,051
69,6759	0,819568612	5052,078865	10,57150263	1,01800E+08	9,775812065	7,614	115,114
71,1327	0,821918976	4986,268672	10,93501947	1,01705E+08	9,989637996	7,918	117,542
72,3099	0,823754469	4934,874865	11,23178733	1,01633E+08	10,16216553	8,222	119,504
73,3899	0,825390794	4889,057762	11,5064022	1,01571E+08	10,3202567	8,526	121,304
74,2755	0,826700012	4852,399674	11,73325134	1,01523E+08	10,44976236	8,83	122,78
73,8003	0,82600108	4871,96975	11,61134159	1,01548E+08	10,38028561	9,058	121,988
75,4515	0,828395055	4804,93847	12,03678785	1,01462E+08	10,62156425	9,285	124,74
76,2039	0,829454468	4775,274907	12,23235649	1,01426E+08	10,73138518	9,589	125,994
76,2021	0,829451956	4775,345235	12,23188736	1,01426E+08	10,73112254	9,89	125,991
76,4637	0,829815863	4765,155827	12,30013186	1,01413E+08	10,76928882	10,166	126,427
77,9127	0,83179124	4709,845289	12,68044731	1,01347E+08	10,98053787	10,501	128,842
78,4503	0,832507261	4689,796685	12,82253988	1,01324E+08	11,05885053	10,767	129,738
78,5943	0,832697544	4684,468769	12,86069093	1,01318E+08	11,07982147	11,102	129,978
79,1361	0,833407858	4664,579966	13,00457607	1,01296E+08	11,15870364	11,299	130,881
79,8735	0,834360584	4637,903643	13,20127146	1,01266E+08	11,26601164	11,811	132,11
80,4807	0,835133234	4616,269459	13,36398266	1,01242E+08	11,3543289	12,248	133,122
80,7429	0,835463632	4607,018292	13,43445176	1,01232E+08	11,39245399	12,565	133,559
81,0855	0,835892437	4595,011752	13,52671731	1,01219E+08	11,44225899	12,856	134,13
81,4611	0,836358808	4581,953385	13,62811442	1,01205E+08	11,49684771	13,16	134,756
81,7389	0,836701258	4572,364778	13,70327348	1,01195E+08	11,53721342	13,464	135,219
82,1265	0,837175575	4559,08391	13,80837165	1,01181E+08	11,59352102	13,768	135,865
82,3197	0,837410498	4552,506068	13,86085906	1,01174E+08	11,62158224	14,072	136,187
82,7799	0,837966108	4536,948963	13,98615358	1,01158E+08	11,68840947	14,375	136,954
82,9977	0,838227133	4529,64027	14,04558446	1,01151E+08	11,72003005	14,679	137,317
83,3361	0,838630261	4518,352684	14,13809179	1,01140E+08	11,76915087	14,983	137,881
83,1771	0,838441215	4523,645981	14,09460096	1,01145E+08	11,74607236	15,287	137,616
83,1759	0,838439786	4523,686	14,0942729	1,01145E+08	11,74589817	15,591	137,614
83,2719	0,838554007	4520,487794	14,12052591	1,01142E+08	11,75983266	15,895	137,774
83,3679	0,838667993	4517,296198	14,14679538	1,01139E+08	11,7737663	16,199	137,934
83,4273	0,838738404	4515,324699	14,16305787	1,01137E+08	11,78238732	16,503	138,033
83,4747	0,838794525	4513,753288	14,17603952	1,01135E+08	11,7892665	16,807	138,112
83,5215	0,838849881	4512,203338	14,18886079	1,01133E+08	11,79605839	17,11	138,19
83,5569	0,838891715	4511,031974	14,19856152	1,01132E+08	11,80119572	17,414	138,249
83,5923	0,838933518	4509,8615	14,20826449	1,01131E+08	11,80633294	17,718	138,308
83,7003	0,839060855	4506,296049	14,23788058	1,01128E+08	11,82200511	18,022	138,488

83,7477	0,839116649	4504,733816	14,25088532	1,01126E+08	11,82888312	18,326	138,567
83,7459	0,839114532	4504,793112	14,25039139	1,01126E+08	11,82862193	18,63	138,564
83,7693	0,839142056	4504,022438	14,25681286	1,01125E+08	11,83201734	18,934	138,603
83,7801	0,839154755	4503,666872	14,25977694	1,01125E+08	11,83358443	19,238	138,621
83,8395	0,839224545	4501,712728	14,2760831	1,01123E+08	11,84220326	19,522	138,72
83,9349	0,839336448	4498,579443	14,30228494	1,01120E+08	11,85604496	19,94	138,879
83,6397	0,838989441	4508,295647	14,2212601	1,01130E+08	11,81321141	20,839	138,387
83,4195	0,838729163	4515,583439	14,16092203	1,01137E+08	11,78125529	21,175	138,02
83,6787	0,839035411	4507,008479	14,2319557	1,01128E+08	11,81887076	21,46	138,452
83,8779	0,839269616	4500,450764	14,2866278	1,01122E+08	11,84777486	21,897	138,784
84,3957	0,839873769	4483,534471	14,42907274	1,01105E+08	11,92289174	22,271	139,647
84,6867	0,840210394	4474,108959	14,50933484	1,01096E+08	11,96509668	22,676	140,132
85,2813	0,840891828	4455,028808	14,67380074	1,01077E+08	12,05131163	23,273	141,123
83,3499	0,838646639	4517,89412	14,1418686	1,01139E+08	11,77115381	23,466	137,904
84,5991	0,840109278	4476,940225	14,48515766	1,01099E+08	11,95239245	23,701	139,986
85,3497	0,840969673	4452,84916	14,69276022	1,01075E+08	12,0612275	24,11	141,237
86,0901	0,841805233	4429,453476	14,89851634	1,01053E+08	12,16853783	24,518	142,471
86,2227	0,841953523	4425,301356	14,93546759	1,01049E+08	12,18775162	24,821	142,692
86,6103	0,842384664	4413,229401	15,04365601	1,01038E+08	12,24390699	25,125	143,338
86,8029	0,842597624	4407,266535	15,09751327	1,01033E+08	12,27180643	25,429	143,659
86,9595	0,842770158	4402,435564	15,14135165	1,01028E+08	12,29448891	25,733	143,92
87,1407	0,842969107	4396,864999	15,19213008	1,01023E+08	12,32073217	26,037	144,222
87,1881	0,843021029	4395,411199	15,20542265	1,01022E+08	12,32759671	26,341	144,301
87,4053	0,843258306	4388,767426	15,26638313	1,01016E+08	12,35904978	26,645	144,663
87,6471	0,843521227	4381,405637	15,33434486	1,01009E+08	12,39406102	26,949	145,066
86,9559	0,842766198	4402,546447	15,14034339	1,01028E+08	12,29396749	27,252	143,914
87,5835	0,843452197	4383,338486	15,31645918	1,01011E+08	12,38485254	27,556	144,96
87,6189	0,84349063	4382,262347	15,32641355	1,01010E+08	12,38997805	27,86	145,019
88,2009	0,844118571	4364,68	15,49038303	1,00994E+08	12,47423167	28,164	145,989
87,2415	0,843079462	4393,775057	15,22040253	1,01020E+08	12,33532998	28,624	144,39
85,6161	0,841271798	4444,389666	14,76668113	1,01067E+08	12,0998435	28,411	141,681
88,2639	0,844186103	4362,789112	15,50816766	1,00992E+08	12,48335042	28,834	146,094
88,8531	0,84481357	4345,220048	15,67482987	1,00977E+08	12,56861852	29,076	147,076
89,1309	0,845106859	4337,007949	15,75361766	1,00970E+08	12,60881272	29,38	147,539
89,3973	0,845386595	4329,175336	15,82929766	1,00963E+08	12,64735242	29,683	147,983
89,6265	0,84562609	4322,469471	15,89450786	1,00957E+08	12,68050651	29,987	148,365
89,7957	0,845802196	4317,538512	15,9427055	1,00953E+08	12,70497921	30,291	148,647
89,9643	0,845977094	4312,641364	15,99078133	1,00949E+08	12,72936319	30,595	148,928
90,1695	0,846189179	4306,702988	16,04935961	1,00944E+08	12,75903789	30,899	149,27
90,3381	0,846362798	4301,841648	16,09754395	1,00940E+08	12,78341764	31,203	149,551
90,5313	0,846561047	4296,290676	16,15281884	1,00935E+08	12,81135224	31,507	149,873
90,6999	0,846733444	4291,463577	16,20110803	1,00931E+08	12,83572795	31,811	150,154
90,7839	0,846819124	4289,064526	16,2251849	1,00929E+08	12,84787173	32,115	150,294
90,7827	0,846817901	4289,09877	16,22484086	1,00929E+08	12,84769825	32,418	150,292
90,7815	0,846816678	4289,133016	16,22449683	1,00929E+08	12,84752477	32,722	150,29

90,7803	0,846815455	4289,167262	16,22415279	1,00929E+08	12,84735129	33,026	150,288
90,7785	0,84681362	4289,218633	16,22363674	1,00929E+08	12,84709107	33,33	150,285
90,8139	0,84684969	4288,208671	16,23378672	1,00928E+08	12,85220869	33,634	150,344
90,8247	0,84686069	4287,900686	16,23688376	1,00928E+08	12,85376997	33,938	150,362
90,8115	0,846847246	4288,277121	16,23309852	1,00928E+08	12,85186173	34,242	150,34
90,8223	0,846858246	4287,969122	16,23619551	1,00928E+08	12,85342302	34,546	150,358
90,8085	0,84684419	4288,362688	16,23223828	1,00929E+08	12,85142804	34,849	150,335

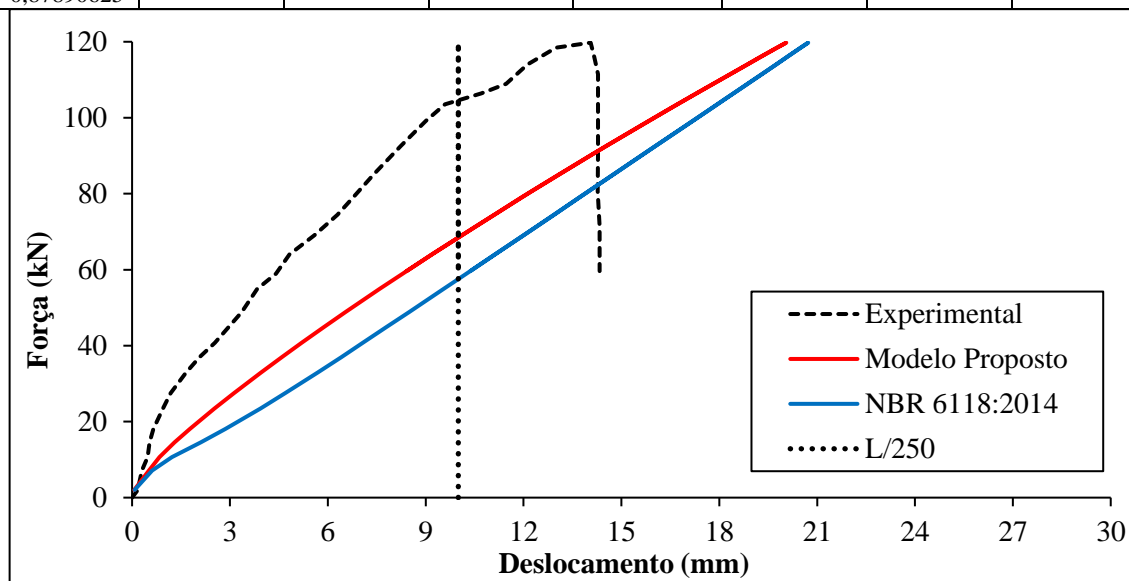
A.15 SILVA ET AL (2018) – VIGA V0

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm4)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm4)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
250	15	30	33750,0000	9,113	9,599	14765,9443	5,45	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
3,68	26,745	210000	15	21	1,125	3	0,39120378	15,772

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,5000
8,0000	21877,22	<i>X3 (cm)</i>	10,463
7,7068	<i>ai</i>	A	0,39120378
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,853	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,228349878
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		25662	1,598449148

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
2,568095439	-1,29110617	25662,42389	0,066066285	3,37500E+08	0,077497108	0	0
6,791068412	-0,10913312	25662,42389	0,520351903	3,37500E+08	0,610383464	0,176547515	2,027027027
9,747149493	0,110216034	22834,01331	0,840085617	2,41498E+08	1,22539066	0,295335658	7,094594595
12,98476211	0,236817422	19585,11482	1,305415243	1,87352E+08	2,105221717	0,472329001	10,64189189
15,94084319	0,308202663	17753,1965	1,768455752	1,69112E+08	2,86403341	0,532119363	14,52702703
20,44534769	0,378287556	15954,64828	2,524535852	1,57827E+08	3,937026903	0,650461679	18,07432432
23,82372607	0,414133426	15034,75636	3,122088234	1,54086E+08	4,699589048	0,945301974	23,47972973
28,32823057	0,449377184	14130,31611	3,950525568	1,51482E+08	5,684960232	1,181094951	27,53378378
31,70660895	0,469735663	13607,8682	4,591750046	1,50386E+08	6,409786605	1,651888325	32,93918919
34,8034558	0,485263707	13209,38094	5,192562611	1,49721E+08	7,067468623	2,063634382	36,99324324
38,18183418	0,499664226	12839,82872	5,86084858	1,49221E+08	7,779876635	2,533932393	40,70945946
41,56021256	0,512040838	12522,21487	6,541498221	1,48870E+08	8,488539121	2,94567845	44,76351351
46,62778012	0,527768217	12118,61219	7,583927628	1,48517E+08	9,546708923	3,357424507	48,81756757
50,0061585	0,536805641	11886,68999	8,292336407	1,48354E+08	10,24989006	3,828416026	54,89864865
54,22913148	0,546850995	11628,90186	9,192237269	1,48204E+08	11,12706755	4,416115162	58,9527027
58,45210445	0,55578389	11399,66213	10,10756431	1,48095E+08	12,00275897	4,828158437	64,02027027
62,95660895	0,564334735	11180,22669	11,10041509	1,48008E+08	12,93562037	5,59210787	69,08783784
66,61651886	0,570674959	11017,52119	11,91938326	1,47953E+08	13,69286982	6,29750535	74,49324324
71,8248522	0,57892979	10805,68223	13,10350049	1,47894E+08	14,76966949	6,768001506	78,88513514
78,01854589	0,58779311	10578,22795	14,53981512	1,47842E+08	16,0492385	7,414995641	85,13513514
83,50841075	0,594952993	10394,48798	15,83828176	1,47809E+08	17,18276296	8,238289609	92,56756757
87,16832066	0,59942422	10279,74547	16,71711917	1,47791E+08	17,93818814	9,00268487	99,15540541
89,56133868	0,602233122	10207,66222	17,29744468	1,47780E+08	18,43202722	9,590483078	103,5472973

91,67282517	0,604642667	10145,82747	17,81324092	1,47772E+08	18,86771378	10,7056947	106,4189189
95,89579814	0,6092846	10026,70422	18,8553744	1,47758E+08	19,73895356	11,46890109	108,9527027
99,55570805	0,613134526	9927,905794	19,76994611	1,47748E+08	20,4939031	12,11554847	114,0202703
100,6818342	0,614289479	9898,266892	20,05348507	1,47745E+08	20,72617466	12,99660181	118,4121622
97,58498733	0,611080333	9980,621358	19,27616852	1,47753E+08	20,08740507	14,05271657	119,7635135
95,75503238	0,609133444	10030,58326	18,82040995	1,47758E+08	19,70991486	14,16892883	116,0472973
93,78431166	0,606991913	10085,54012	18,33254971	1,47765E+08	19,30335457	14,22693588	113,8513514
90,82823057	0,603686306	10170,37001	17,60650107	1,47775E+08	18,69344489	14,2848934	111,4864865
88,29444679	0,600756764	10245,54916	16,98965199	1,47786E+08	18,17059149	14,28385313	107,9391892
86,32372607	0,598411878	10305,72462	16,51337462	1,47795E+08	17,76387525	14,28296148	104,8986486
82,66381616	0,593888696	10421,80043	15,63697097	1,47813E+08	17,00840697	14,28226797	102,5337838
76,47012247	0,585662259	10632,91074	14,17788395	1,47854E+08	15,72942668	14,28098003	98,14189189
68,02417652	0,572988477	10958,1507	12,23726451	1,47936E+08	13,98398288	14,27880043	90,70945946
60,42282517	0,559636553	11300,79345	10,53986536	1,48053E+08	12,41101886	14,27582825	80,57432432
54,51066301	0,547478312	11612,80337	9,252784863	1,48196E+08	11,1854882	14,33180431	71,4527027
50,56922157	0,538219171	11850,41537	8,411411869	1,48331E+08	10,36695078	14,32972379	64,35810811
0,87890625	-4,93708669	25662,42389	0,066066285	3,37500E+08	0,077497108	14,32833677	59,62837838



A.16 FUGIYAMA ET AL (2021) – VIGA VREF2

L (cm)	b_w (cm)	h (cm)	I_c (cm ⁴)	X_2 (cm)	ae	I_2 (cm ⁴)	ε_{st} (‰)	ε_{cc} (‰)
120	12,5	23,5	13518,6198	6,679	8,149	5129,2868	7,99	3,50
A_s (cm ²)	d (cm)	E_s (MPa)	Y_t (cm)	F_{ck} (MPa)	g (kN/m)	Domínio	β_x	XI (cm)
2,453	20,625	210000	11,75	27,98	0,734375	3	0,304546945	12,250

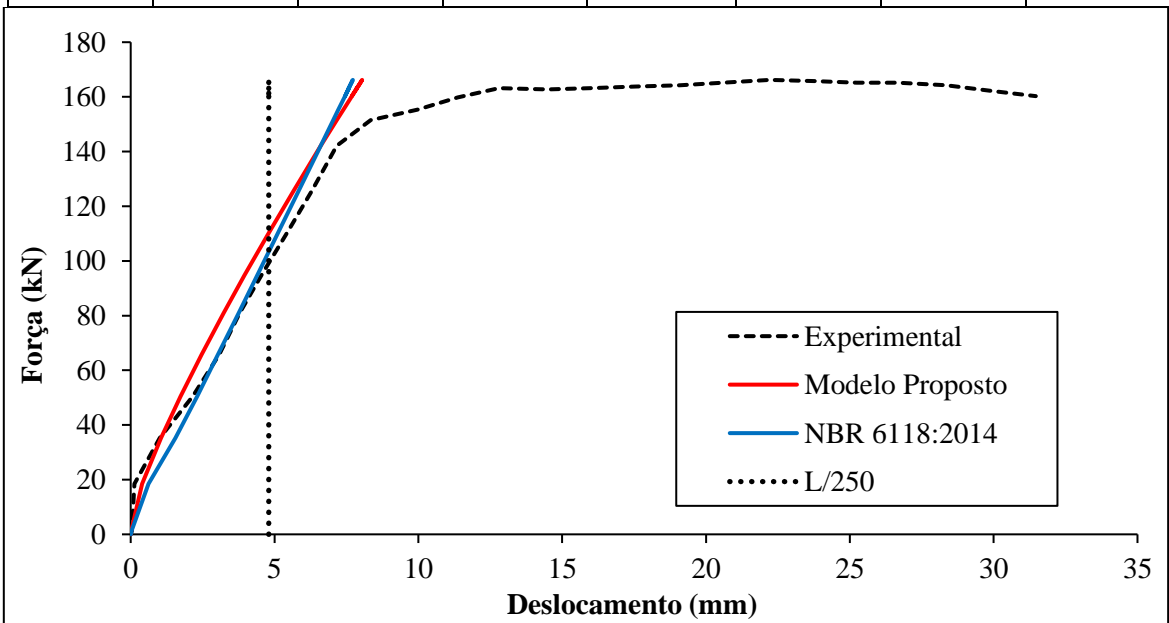
M_r Modelo (kN.m)	E_{cs} (MPa)	F_{cd} (kN/cm ²)	1,9986
4,5000	25769,51	X_3 (cm)	6,281
4,7717	a_i	A	0,304546945
M_r NBR (kN.m)	0,870	$F_{ct,m}$ (kN/cm ²)	0,276494435
σ_{sd} CA-50 - Dom	43,5	E_{ci} (Mpa)	$F_{ct,inf}$ (MPa)
2 e 3 (kN/cm ²)		29622	1,935461046

MODELO

NBR 6118:2014

EXPERIMENTAL

<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	δ (mm)	<i>Ieq (mm⁴)</i>	δ (mm)	δ (mm)	<i>Carga (kN)</i>
0,1321875	-22,9821301	29621,82979	0,004951507	1,35186E+08	0,005691715	0	0
0,62466356	-4,31679870	29621,82979	0,023808718	1,35186E+08	0,027367916	0,042185825	1,23119015
7,519328403	0,281028335	21297,25629	0,400307396	7,27320E+07	0,61491922	0,128282866	18,46785226
14,21700282	0,481000632	15373,71095	1,048686724	5,44648E+07	1,552869603	1,013121192	35,2120383
20,32370597	0,55065413	13310,44688	1,731621937	5,23786E+07	2,308435521	2,150039232	50,47879617
26,43040911	0,589702443	12153,7644	2,46632369	5,17865E+07	3,03647864	3,076747062	65,74555404
32,53711226	0,615355156	11393,88409	3,238717544	5,15575E+07	3,754735778	3,793244681	81,0123119
38,05284413	0,632359992	10890,16974	3,962998414	5,14583E+07	4,399764288	4,551611803	94,80164159
44,55352813	0,647928018	10429,01631	4,845236331	5,13959E+07	5,157696266	5,478434659	111,0533516
50,26625043	0,659009953	10100,74914	5,644198774	5,13646E+07	5,822612276	6,278901336	125,3351573
56,96392485	0,669920131	9777,569693	6,607714932	5,13422E+07	6,60137038	7,163739663	142,0793434
60,7067429	0,675293282	9618,407122	7,158424378	5,13336E+07	7,036310178	8,342009588	151,4363885
62,2826663	0,677429575	9555,126224	7,392902059	5,13306E+07	7,219402715	9,982109332	155,376197
64,05558011	0,679753158	9486,297454	7,658522099	5,13275E+07	7,425357585	11,37001434	159,8084815
65,43451308	0,681506076	9434,372793	7,866453722	5,13254E+07	7,585528649	12,79984636	163,255814
65,23752266	0,681258442	9441,708166	7,836677605	5,13257E+07	7,562647877	14,48147053	162,7633379
65,43451308	0,681506076	9434,372793	7,866453722	5,13254E+07	7,585528649	15,99504155	163,255814
65,63150351	0,681752804	9427,064265	7,896253693	5,13251E+07	7,60840916	17,55065462	163,74829
65,82849393	0,681998633	9419,782352	7,926077511	5,13248E+07	7,631289413	19,10626769	164,2407661
66,22247478	0,682487627	9405,297459	7,985796671	5,13243E+07	7,677049158	20,57785419	165,2257182
66,61645563	0,682973119	9390,91632	8,045611167	5,13237E+07	7,722807908	22,21760885	166,2106703
66,4194652	0,682730807	9398,094031	8,015692004	5,13240E+07	7,699928656	23,7731069	165,7181943
66,22247478	0,682487627	9405,297459	7,985796671	5,13243E+07	7,677049158	25,24452085	165,2257182
66,22247478	0,682487627	9405,297459	7,985796671	5,13243E+07	7,677049158	26,67395028	165,2257182
65,82849393	0,681998633	9419,782352	7,926077511	5,13248E+07	7,631289413	28,35551694	164,2407661
65,04053223	0,681009894	9449,070619	7,806925345	5,13260E+07	7,539766841	29,8688004	162,2708618
64,25257054	0,680006398	9478,795998	7,688154989	5,13272E+07	7,448239991	31,46616795	160,3009576



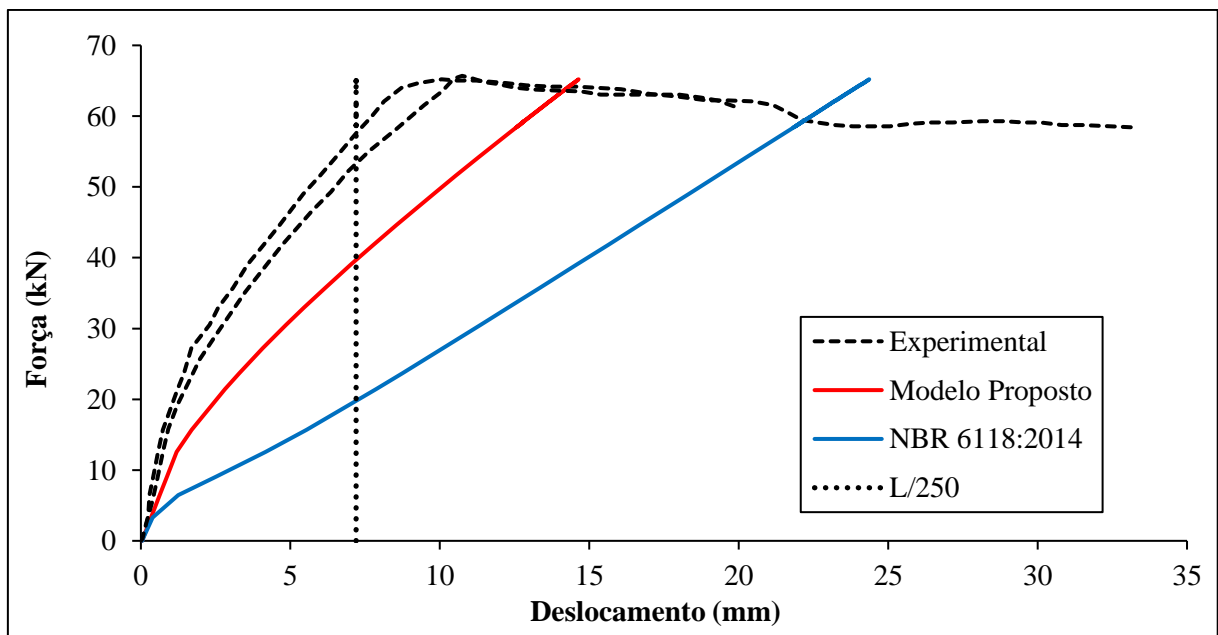
A.17 DEGHENHARD ET AL (2016) – VIGA A1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
180	12	20	8000,0000	5,094	8,696	2304,8381	8,82	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
1,57	16,5	210000	10	25	0,6	3	0,284055258	10,312

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,7857
8,0000	24150,00	<i>X3 (cm)</i>	4,687
3,0780	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,284055258
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,863	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,256496392
<i>osd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		28000	1,795474744

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,243	-22,8582363	28000	0,036612723	8,00000E+07	0,042449534	0	0
0,661430884	-7,94716736	28000	0,101058551	8,00000E+07	0,117169335	0,082159624	0,697384807
2,2305467	-1,85479517	28000	0,342730407	8,00000E+07	0,397368588	0,246478873	3,312577833
4,113485679	-0,67842989	28000	0,632736634	4,69080E+07	1,25114281	0,287558685	6,450809465
5,682601494	-0,29315086	28000	0,874408489	3,20985E+07	2,526743507	0,410798122	9,066002491
7,774755915	-0,02085668	28000	1,19663763	2,65821E+07	4,175457608	0,575117371	12,55292653
9,657694894	0,123732515	24535,48958	1,696563985	2,48920E+07	5,539593336	0,73943662	15,69115816
13,10974969	0,281645863	20113,91584	2,809647546	2,37855E+07	7,870636969	1,232394366	21,44458281
14,46965006	0,323392751	18945,00296	3,292561356	2,35966E+07	8,756948139	1,437793427	23,71108344
16,56180448	0,374448649	17515,43783	4,076403986	2,34140E+07	10,10174403	1,6842723	27,19800747
18,54935118	0,412500394	16449,98898	4,861480201	2,33086E+07	11,36556806	2,300469484	30,51058531
20,01385928	0,435826782	15796,85009	5,462290671	2,32555E+07	12,29112826	2,588028169	32,95143213
21,68758281	0,458746638	15155,09414	6,16986729	2,32112E+07	13,34473745	3,080985915	35,74097136
23,67512951	0,481904843	14506,66439	7,036504882	2,31735E+07	14,59167917	3,573943662	39,05354919
25,34885305	0,49870712	14036,20063	7,786590577	2,31503E+07	15,6391237	4,107981221	41,84308842
27,02257659	0,513528168	13621,21131	8,553723869	2,31325E+07	16,68477826	4,642018779	44,63262765
29,63776961	0,533516702	13061,53235	9,783698938	2,31122E+07	18,31594401	5,422535211	48,99128269
31,20688543	0,544002313	12767,93523	10,53865874	2,31030E+07	19,2934554	5,997652582	51,60647572
32,77600125	0,553555388	12500,44913	11,30549172	2,30955E+07	20,27027676	6,531690141	54,22166874
34,86815567	0,565059313	12178,33922	12,34537299	2,30876E+07	21,57183927	7,230046948	57,70859278
36,12344832	0,571376854	12001,44809	12,97839964	2,30836E+07	22,35238544	7,681924883	59,8007472
37,48334869	0,577787865	11821,93979	13,67154315	2,30799E+07	23,19769998	8,133802817	62,06724782
38,63403362	0,582895008	11678,93977	14,26383662	2,30772E+07	23,91276964	8,708920188	63,98505604
39,05246451	0,584685371	11628,8096	14,48049953	2,30763E+07	24,17275471	9,284037559	64,68244085
39,36628767	0,586005884	11591,83524	14,64343918	2,30756E+07	24,36773031	10,06455399	65,20547945
39,26167995	0,585567799	11604,10161	14,58908403	2,30758E+07	24,30273968	10,55751174	65,03113325
39,26167995	0,585567799	11604,10161	14,58908403	2,30758E+07	24,30273968	11,21478873	65,03113325
39,05246451	0,584685371	11628,8096	14,48049953	2,30763E+07	24,17275471	12,24178404	64,68244085
38,84324907	0,583794487	11653,75437	14,37208345	2,30767E+07	24,04276474	12,89906103	64,33374844
38,73864134	0,58334583	11666,31675	14,31793883	2,30769E+07	23,97776784	13,72065728	64,15940224
38,73864134	0,58334583	11666,31675	14,31793883	2,30769E+07	23,97776784	14,58333333	64,15940224

38,63403362	0,582895008	11678,93977	14,26383662	2,30772E+07	23,91276964	15,32276995	63,98505604
38,5294259	0,582442003	11691,62392	14,20977694	2,30774E+07	23,84777014	16,06220657	63,81070984
38,11099502	0,580607791	11742,98186	13,99396565	2,30784E+07	23,58775877	17,04812207	63,11332503
37,90177958	0,579677114	11769,04081	13,88631799	2,30789E+07	23,45774486	17,95187793	62,76463263
37,58795641	0,578263712	11808,61606	13,72517152	2,30797E+07	23,26271338	18,93779343	62,24159402
37,58795641	0,578263712	11808,61606	13,72517152	2,30797E+07	23,26271338	19,63615023	62,24159402
37,48334869	0,577787865	11821,93979	13,67154315	2,30799E+07	23,19769998	20,45774648	62,06724782
37,16952553	0,576345903	11862,31472	13,51092105	2,30807E+07	23,00265089	21,15610329	61,54420922
36,5418792	0,573395246	11944,93312	13,19087107	2,30824E+07	22,61251106	21,64906103	60,498132
35,91423288	0,570351736	12030,15139	12,87243552	2,30842E+07	22,22231246	22,10093897	59,45205479
35,70501743	0,569315756	12059,15883	12,76665384	2,30849E+07	22,09223248	22,63497653	59,10336239
35,49580199	0,568268722	12088,47578	12,66105567	2,30855E+07	21,96214534	23,2100939	58,75466999
35,39119427	0,567740999	12103,25204	12,60832573	2,30858E+07	21,89709904	23,82629108	58,58032379
35,39119427	0,567740999	12103,25204	12,60832573	2,30858E+07	21,89709904	24,44248826	58,58032379
35,39119427	0,567740999	12103,25204	12,60832573	2,30858E+07	21,89709904	25,05868545	58,58032379
35,60040971	0,568793633	12073,77828	12,71383175	2,30852E+07	22,02718981	25,75704225	58,92901619
35,70501743	0,569315756	12059,15883	12,76665384	2,30849E+07	22,09223248	26,41431925	59,10336239
35,70501743	0,569315756	12059,15883	12,76665384	2,30849E+07	22,09223248	27,15375587	59,10336239
35,80962516	0,569835116	12044,61676	12,81952181	2,30845E+07	22,15727335	28,13967136	59,27770859
35,80962516	0,569835116	12044,61676	12,81952181	2,30845E+07	22,15727335	28,87910798	59,27770859
35,70501743	0,569315756	12059,15883	12,76665384	2,30849E+07	22,09223248	29,53638498	59,10336239
35,70501743	0,569315756	12059,15883	12,76665384	2,30849E+07	22,09223248	30,11150235	59,10336239
35,49580199	0,568268722	12088,47578	12,66105567	2,30855E+07	21,96214534	30,80985915	58,75466999
35,49580199	0,568268722	12088,47578	12,66105567	2,30855E+07	21,96214534	31,50821596	58,75466999
35,39119427	0,567740999	12103,25204	12,60832573	2,30858E+07	21,89709904	32,45305164	58,58032379
35,28658655	0,567210438	12118,10773	12,55564207	2,30862E+07	21,83205088	33,13086854	58,40597758



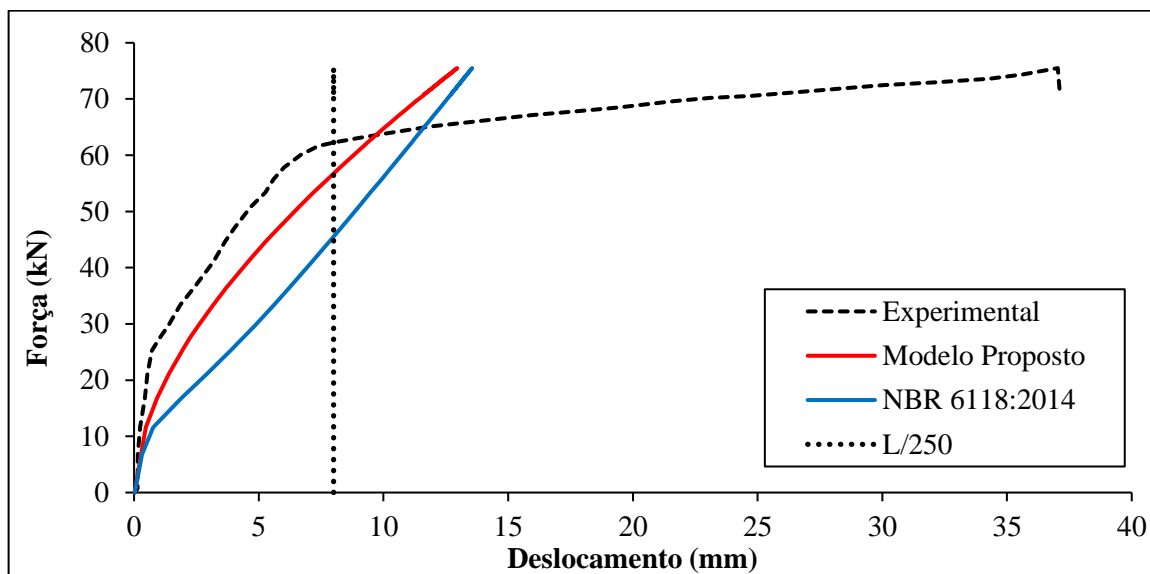
A.18 OLIVEIRA E VARGAS (2021) – VC1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
200	12	30	27000,0000	6,710	8,696	6555,2402	10,00	2,15
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
1,57	26,5	210000	15	25	0,9	2	0,176864595	15,373

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	1,7857
8,0000	24150,00	<i>X3 (cm)</i>	4,687
6,9254	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,082313541
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,863	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,256496392
<i>osd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		28000	1,795474744

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,45	-15,3978629	28000	0,024801587	2,70000E+08	0,028755464	0	0
0,911760462	-7,13536391	28000	0,050816898	2,70000E+08	0,058918143	0,141750672	0,692640693
4,952164502	-0,5652466	28000	0,278450871	2,70000E+08	0,322841589	0,145319933	6,753246753
8,184487733	0,020712965	27420,03699	0,470299342	1,89416E+08	0,761154996	0,242403847	11,6017316
11,6476912	0,287927925	19938,01811	0,920795669	1,08526E+08	1,891297027	0,433920222	16,7965368
14,53369409	0,413510473	16421,70676	1,395197253	8,76726E+07	2,921706859	0,530698199	21,12554113
17,30425685	0,494790843	14145,85639	1,928627839	7,86580E+07	3,877762216	0,7216027	25,28138528
18,68953824	0,526438324	13259,72693	2,222321676	7,59545E+07	4,337450819	1,00551196	27,35930736
20,30569985	0,557936877	12377,76745	2,586644093	7,36632E+07	4,859315373	1,383853681	29,78354978
22,72994228	0,596847194	11288,27856	3,175074888	7,13350E+07	5,617275557	1,857137758	33,41991342
24,80786436	0,624199371	10522,41761	3,717687364	7,00002E+07	6,247920578	2,424344403	36,53679654
27,80930736	0,656568612	9616,078872	4,560470667	6,87099E+07	7,135671295	3,180823888	41,03896104
30,23354979	0,678081684	9013,712851	5,289506906	6,80097E+07	7,837814347	3,654107965	44,67532468
31,8497114	0,690632668	8662,285294	5,798423298	6,76542E+07	8,300303403	4,032449686	47,0995671
34,38939394	0,708014367	8175,597721	6,633637885	6,72221E+07	9,019982382	4,694292751	50,90909091
36,00555555	0,717824256	7900,920834	7,186941428	6,70072E+07	9,474293784	5,26109148	53,33333333
37,62171717	0,726810199	7649,314435	7,756637051	6,68277E+07	9,926274887	5,592318949	55,75757576
39,00699856	0,733934213	7449,842033	8,257657226	6,66966E+07	10,31209844	6,017570965	57,83549784
40,50772006	0,741116465	7248,738991	8,813344678	6,65741E+07	10,72864393	6,678496219	60,08658009
41,5466811	0,745793378	7117,785422	9,205756556	6,64993E+07	11,01625203	7,38612781	61,64502165
42,00844156	0,747799959	7061,601138	9,382153881	6,64684E+07	11,14389375	8,093249507	62,33766234
42,47020202	0,749764251	7006,600973	9,559764783	6,64389E+07	11,27142874	8,941713959	63,03030303
43,10512265	0,752398594	6932,839375	9,805945736	6,64003E+07	11,44662301	10,2614739	63,98268398
43,85548341	0,755416728	6848,331621	10,09979469	6,63575E+07	11,65343565	11,91113559	65,10822511
44,43268398	0,757671299	6785,203617	10,32795524	6,63265E+07	11,81235861	13,65487281	65,97402597
45,18304473	0,760519056	6705,466437	10,62729589	6,62886E+07	12,01875806	15,91701977	67,0995671
45,64480519	0,762226611	6657,654904	10,81302736	6,62665E+07	12,1456661	17,70776926	67,79220779
46,10656565	0,763901188	6610,766736	10,99990912	6,62452E+07	12,27249637	19,40429025	68,48484848
46,85692641	0,766554551	6536,472582	11,30602616	6,62125E+07	12,47843726	21,66643721	69,61038961
47,26096681	0,767949689	6497,408696	11,47209736	6,61957E+07	12,58925086	23,0802217	70,21645022
47,49184704	0,768736661	6475,373502	11,56738209	6,61864E+07	12,65254943	24,68231023	70,56277056

47,83816739	0,769903425	6442,704095	11,71083444	6,61727E+07	12,74746608	26,28450074	71,08225108
48,35764791	0,771623462	6394,543074	11,92718892	6,61529E+07	12,88977292	28,31087248	71,86147186
48,76168831	0,772936937	6357,765769	12,0964347	6,61381E+07	13,00040136	30,05445673	72,46753247
49,10800866	0,774046265	6326,704574	12,24217427	6,61258E+07	13,09518894	32,22201826	72,98701299
49,51204906	0,775321671	6290,993208	12,41298353	6,61119E+07	13,20573281	34,29540228	73,59307359
50,03152958	0,776932467	6245,890932	12,6338225	6,60946E+07	13,34779689	35,61506024	74,37229437
50,78189033	0,779203446	6182,303517	12,95523163	6,60710E+07	13,5528793	37,02915067	75,4978355
47,66500721	0,769322079	6458,981778	11,63902962	6,61795E+07	12,70001238	37,12062574	70,82251082



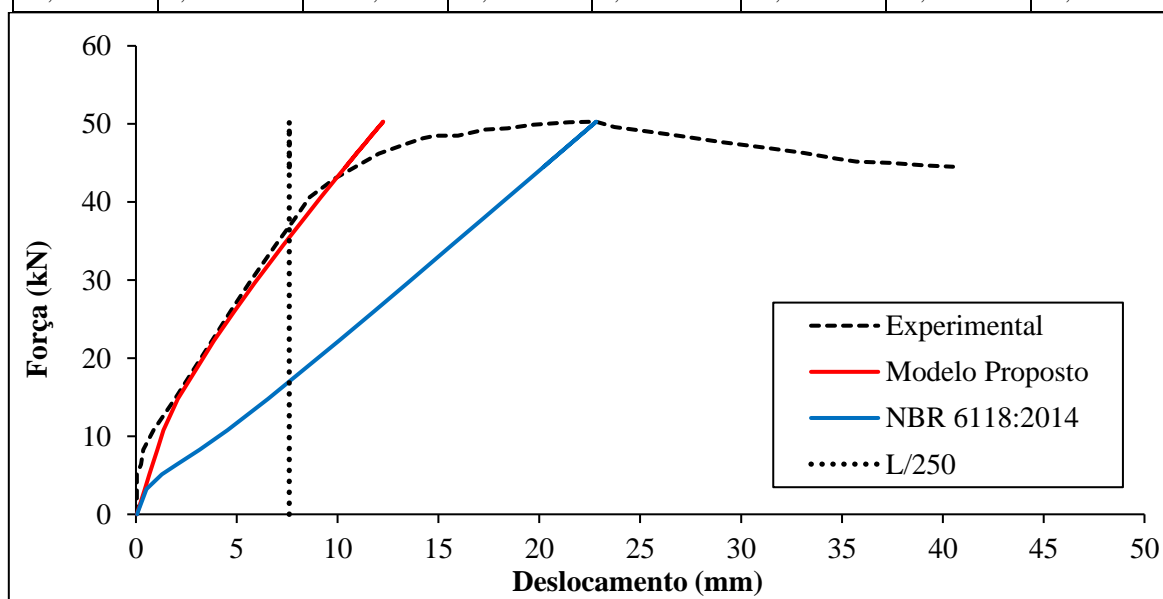
A.19 FERNANDES E VARGAS (2015) – A1

<i>L (cm)</i>	<i>b_w (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>I_c (cm⁴)</i>	<i>X₂ (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I₂ (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
190	12	20	8000,0000	5,362	9,865	2538,0242	6,36	3,50
<i>A_s (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>E_s (MPa)</i>	<i>Y_t (cm)</i>	<i>F_{ck} (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>β_x</i>	<i>X_I (cm)</i>
1,57	16,5	210000	10	20	0,6	3	0,355069073	10,356

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>E_{cs} (MPa)</i>	<i>F_{cd} (kN/cm²)</i>	1,4286
8,0000	21287,37	<i>X₃ (cm)</i>	5,859
2,6525	<i>a_i</i>	<i>A</i>	0,355069073
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,850	<i>F_{ct,m} (kN/cm²)</i>	0,22104189
<i>σ_{sd CA-50 - Dom 2 e 3}</i> (kN/cm ²)	43,5	<i>E_{ci} (Mpa)</i>	<i>F_{ct,inf} (MPa)</i>
		25044	1,547293229

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>I_{eq} (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,27075	-18,4154718	25043,96135	0,050817281	8,00000E+07	0,059785036	0	0
0,519716218	-9,28663458	25043,96135	0,098584361	8,00000E+07	0,115981601	0,051020408	0,393104555
2,312638892	-1,58918587	25043,96135	0,442577543	8,00000E+07	0,520679462	0,051020408	3,224035092
3,507920674	-0,82834494	25043,96135	0,671906331	4,89942E+07	1,290730324	0,051020408	5,111322117
4,304571917	-0,55570224	25043,96135	0,824753188	3,81601E+07	2,034159999	0,255102041	6,3691925
5,49975206	-0,29456899	25043,96135	1,054062475	3,15078E+07	3,148612613	0,357142857	8,256319041
7,092952905	-0,08297247	25043,96135	1,359736688	2,82368E+07	4,532221244	0,867346939	10,77189932

9,631859477	0,110161602	22285,07845	2,075495514	2,65210E+07	6,554119982	1,93877551	14,78069917
14,36135369	0,289149556	17802,51104	3,874604566	2,57244E+07	10,07701216	3,775510204	22,24832161
16,75100249	0,341698012	16486,48953	4,880353552	2,55971E+07	11,81290132	4,693877551	26,02145131
19,04104449	0,379980795	15527,737	5,890330093	2,55279E+07	13,46482796	5,612244898	29,63730709
22,12753444	0,419439666	14539,53056	7,310690596	2,54743E+07	15,6810127	6,93877551	34,51071228
24,3179188	0,441617208	13984,11706	8,353674024	2,54511E+07	17,24938564	7,908163265	37,9692139
26,01052318	0,456329233	13615,66968	9,177049917	2,54382E+07	18,4596859	8,62244898	40,64174713
27,50340574	0,467892919	13326,06917	9,914772674	2,54292E+07	19,52627999	9,846938776	42,99893011
29,5431602	0,48193055	12974,51129	10,93882584	2,54198E+07	20,98254022	12,04081633	46,21959505
30,38834435	0,487236625	12841,62615	11,36826505	2,54166E+07	21,58566165	13,52040816	47,55409634
30,78606013	0,489641009	12781,41085	11,57133798	2,54152E+07	21,86942037	14,23469388	48,18206863
30,98466393	0,490820536	12751,87081	11,67297832	2,54145E+07	22,01110712	14,84693878	48,49565357
30,98354589	0,490813935	12752,03613	11,67240571	2,54145E+07	22,01030952	15,96938776	48,49388825
31,48025865	0,49370467	12679,64068	11,92728062	2,54129E+07	22,36464002	17,29591837	49,27817156
31,57874743	0,494268004	12665,53255	11,97793052	2,54126E+07	22,43489191	18,41836735	49,43368016
31,8763482	0,495950976	12623,38427	12,13120273	2,54117E+07	22,64716007	19,64285714	49,90357611
32,07373232	0,497051556	12595,82139	12,2330458	2,54111E+07	22,78793911	21,47959184	50,21523524
32,12221441	0,497320007	12589,09833	12,25808324	2,54110E+07	22,82251673	22,80612245	50,29178591
31,67306899	0,494804516	12652,09618	12,02647211	2,54123E+07	22,50216977	23,7244898	49,58260893
31,37282559	0,493086507	12695,12193	11,87207339	2,54133E+07	22,28800627	25,15306122	49,1085404
30,97267045	0,490749698	12753,64489	11,66683598	2,54145E+07	22,00255102	26,8877551	48,47671651
30,47250195	0,487750185	12828,76457	11,41118338	2,54163E+07	21,64570824	29,03061224	47,68697676
29,97213016	0,484657936	12906,20674	11,15642365	2,54181E+07	21,28867101	31,37755102	46,89691604
29,57197502	0,482116031	12969,86611	10,9534187	2,54197E+07	21,00310494	33,1122449	46,26509214
29,12211812	0,479181815	13043,3505	10,72598808	2,54215E+07	20,68202714	34,74489796	45,55479177
28,87213551	0,477514916	13085,09625	10,59997257	2,54226E+07	20,50358577	35,71428571	45,16008238
28,77085164	0,476831946	13102,20051	10,54899095	2,54230E+07	20,43128349	37,39795918	45,00016048
28,56991014	0,475463746	13136,46568	10,44797579	2,54240E+07	20,28783226	39,13265306	44,68288443
28,46893119	0,474769451	13153,85358	10,39727811	2,54244E+07	20,21573998	40,51020408	44,52344398



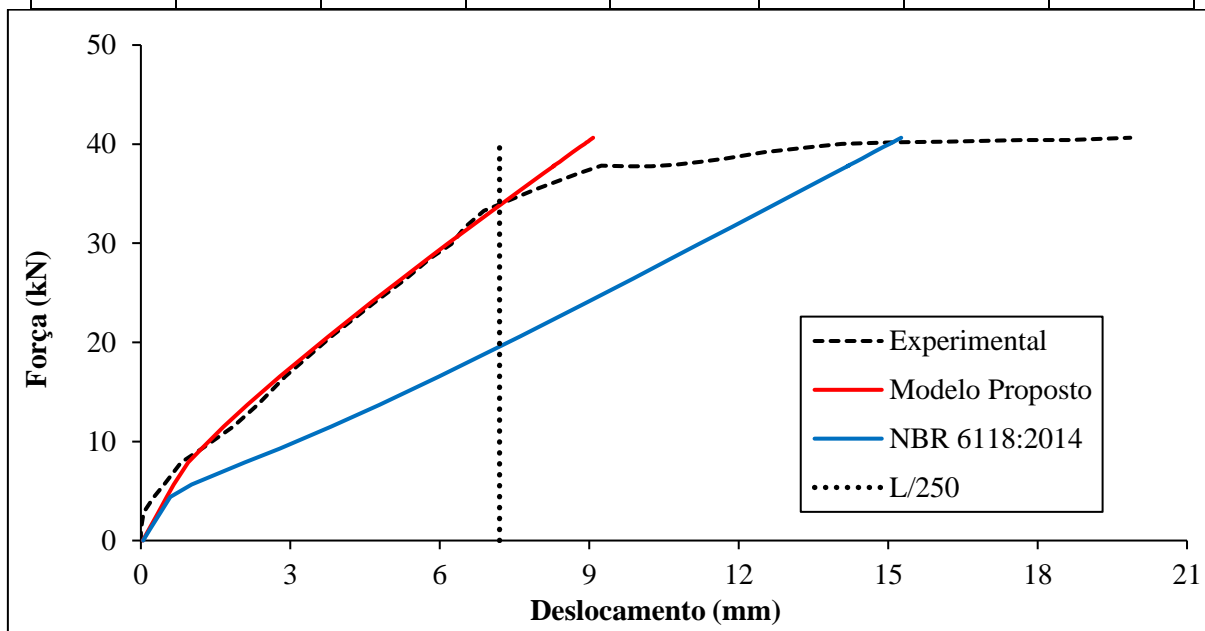
A.20 OH (1992) – S1V0

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
180	12	18	5832,0000	5,111	6,957	1927,0872	5,23	3,50
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
2,534	14	200000	9	33,7	0,54	3	0,400844388	9,327

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,4071
4,5000	28746,04	<i>X3 (cm)</i>	5,612
3,0423	<i>ai</i>	A	0,400844388
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,884	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,312997731
<i>σsd CA-50 - Dom 2 e 3 (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		32509	2,190984114

	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
<i>Ma (kN.m)</i>	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,2187	-11,732926	32508,95261	0,038931583	5,83200E+07	0,044027801	0	0
0,880196381	-2,46721644	32508,95261	0,159303749	5,83200E+07	0,180156912	0	1,102493968
1,919450677	-0,80779001	32508,95261	0,348416334	5,83200E+07	0,394024692	0,055443921	2,834584462
2,863946272	-0,34371216	32508,95261	0,520285725	5,83200E+07	0,588392112	0,259858377	4,408743786
3,619462102	-0,14653585	32508,95261	0,657766563	4,24609E+07	1,02170346	0,46606496	5,667936836
3,619462102	-0,14653585	32508,95261	0,657766563	4,24609E+07	1,02170346	0,46606496	5,667936836
4,941648407	0,053935834	30755,55513	0,949580565	2,83830E+07	2,087550933	0,809145223	7,871580678
5,791250891	0,13472364	28129,22818	1,216912807	2,49322E+07	2,785457504	1,227830832	9,287584818
7,112899558	0,22238599	25279,417	1,663377479	2,23265E+07	3,8210051	1,855411215	11,4903326
8,434817044	0,282945184	23310,70105	2,139326396	2,11032E+07	4,794278156	2,340741537	13,69352841
10,13455965	0,33803351	21519,83725	2,78460562	2,03272E+07	5,980858458	2,893612636	16,52643275
12,58948206	0,392034637	19764,31717	3,766722172	1,98219E+07	7,61971221	3,830502893	20,6179701
14,66657935	0,424152707	18720,19236	4,633181403	1,96194E+07	8,96898257	4,699852374	24,07979892
16,0827179	0,44155426	18154,48608	5,239003158	1,95352E+07	9,877659516	5,326536693	26,44002984
17,31014551	0,454491244	17733,9183	5,772690806	1,94829E+07	10,66030251	5,812763079	28,48574251
18,15974799	0,462503221	17473,45733	6,146371934	1,94545E+07	11,19998378	6,231448688	29,90174665
19,19859906	0,471421571	17183,53111	6,607712567	1,94263E+07	11,85806312	6,506092111	31,6331651
20,19000357	0,479159755	16931,97086	7,052257857	1,94045E+07	12,48455884	6,88787111	33,28550595
21,46366804	0,488163444	16639,27034	7,629130349	1,93821E+07	13,28765891	7,907087189	35,40828007
22,45413169	0,494541697	16431,92003	8,081976194	1,93680E+07	13,91107077	8,786741398	37,05905282
22,92570744	0,497409604	16338,68738	8,298834217	1,93621E+07	14,2075962	9,244573776	37,8450124
22,87745443	0,497120846	16348,07458	8,27660835	1,93627E+07	14,17726278	9,778459533	37,76459071
22,87658077	0,497115608	16348,24486	8,276206007	1,93627E+07	14,17671355	10,24077223	37,76313461
22,97012978	0,497674512	16330,07548	8,319302903	1,93616E+07	14,23551998	10,73775137	37,91904964
23,15816868	0,49878616	16293,93698	8,406023334	1,93594E+07	14,3537046	11,23383446	38,2324478
23,34620758	0,49988239	16258,2997	8,492867458	1,93573E+07	14,47186362	11,72991754	38,54584596
23,7226886	0,502032326	16188,40753	8,667110066	1,93532E+07	14,70836124	12,50870862	39,17331434
24,05152146	0,503863003	16128,89412	8,819697422	1,93499E+07	14,91485065	13,50132281	39,7213691
24,23942595	0,504890086	16095,50474	8,90705468	1,93481E+07	15,03281406	14,06853093	40,03454324
24,33189969	0,505390594	16079,23375	8,950089551	1,93472E+07	15,0908597	15,13451031	40,18866614

24,37712848	0,505634218	16071,31378	8,97114829	1,93468E+07	15,11924789	16,20093773	40,26404747
24,46879577	0,506125639	16055,33819	9,013849969	1,93459E+07	15,17677985	17,6936673	40,41682628
24,46704844	0,506116301	16055,64176	9,013035746	1,93459E+07	15,17568324	18,61829269	40,41391407
24,6064311	0,506857665	16031,54079	9,078017663	1,93447E+07	15,26315295	19,86163661	40,6462185

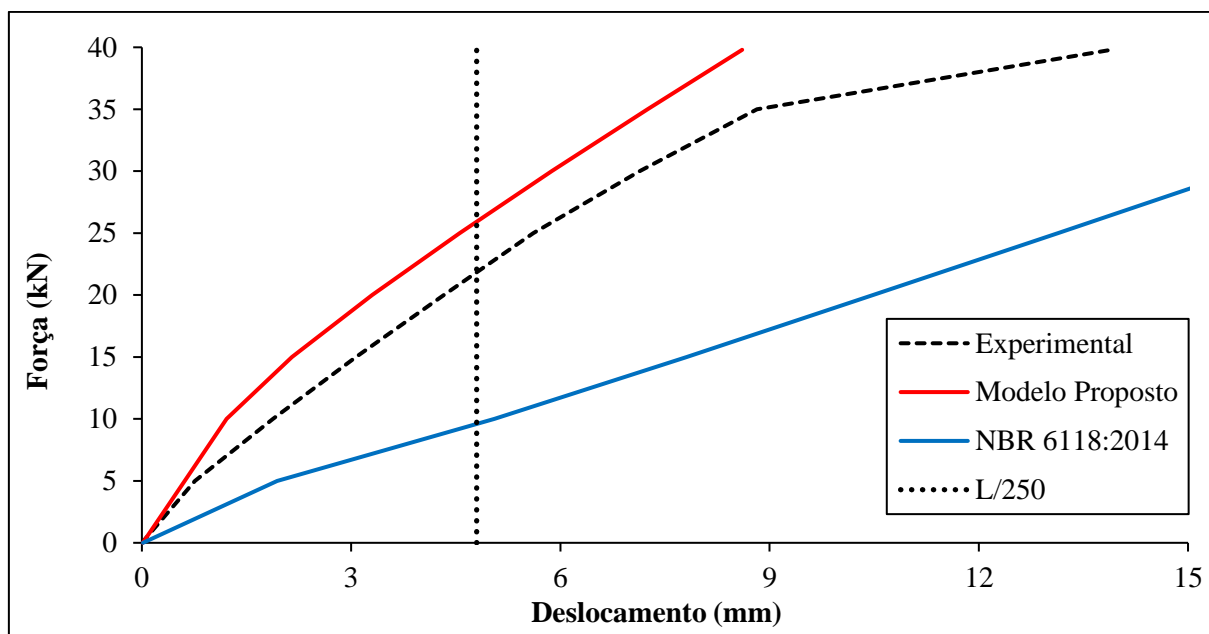


A.21 SANTOS E FANTON (2020) – VT

<i>L (cm)</i>	<i>b_w (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>I_c (cm⁴)</i>	<i>X₂ (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I₂ (cm⁴)</i>	<i>ε_{st} (%)</i>	<i>ε_{cc} (%)</i>
120	7	14	1600,6667	3,682	7,475	416,0704	5,32	3,50
<i>A_s (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>E_s (MPa)</i>	<i>Y_t (cm)</i>	<i>F_{ck} (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>β_x</i>	<i>X₁ (cm)</i>
1,005	9,997	210000	7	32,42	0,245	3	0,396728773	7,187

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>E_{cs} (MPa)</i>	<i>F_{cd} (kN/cm²)</i>	2,3157
4,5000	28092,80	<i>X₃ (cm)</i>	3,966
1,0462	<i>a_i</i>	<i>A</i>	0,396728773
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,881	<i>F_{ct,m} (kN/cm²)</i>	0,305021132
<i>σ_{sd CA-50 - Dom 2 e 3}</i> (kN/cm ²)	43,5	<i>E_{ci} (Mpa)</i>	<i>F_{ct,inf} (MPa)</i>
		31886	2,135147923

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>I_{eq} (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,0441	-60,9588097	31885,59549	0,012960878	1,60067E+07	0,014710718	0	0
2,0441	-0,72689074	31885,59549	0,613817898	5,74902E+06	1,939752301	0,76	5
4,0441	-0,06839449	31885,59549	1,214674917	4,36581E+06	5,054702651	1,88	10
6,0441	0,155424889	26929,78035	2,149639403	4,22214E+06	7,812161486	3,07	15
8,0441	0,268782306	23315,31162	3,304609523	4,18677E+06	10,48548313	4,33	20
10,0441	0,33765969	21119,11521	4,555431596	4,17409E+06	13,13254891	5,61	25
12,0441	0,384212079	19634,76456	5,875566689	4,16847E+06	15,76901976	7,14	30
14,0441	0,41797426	18558,23731	7,248751603	4,16560E+06	18,40043166	8,82	35
15,9641	0,442812703	17766,24877	8,607128662	4,16404E+06	20,92401822	13,9	39,8



A.22 BARROS ET AL (2007) – R1, R2 E R3

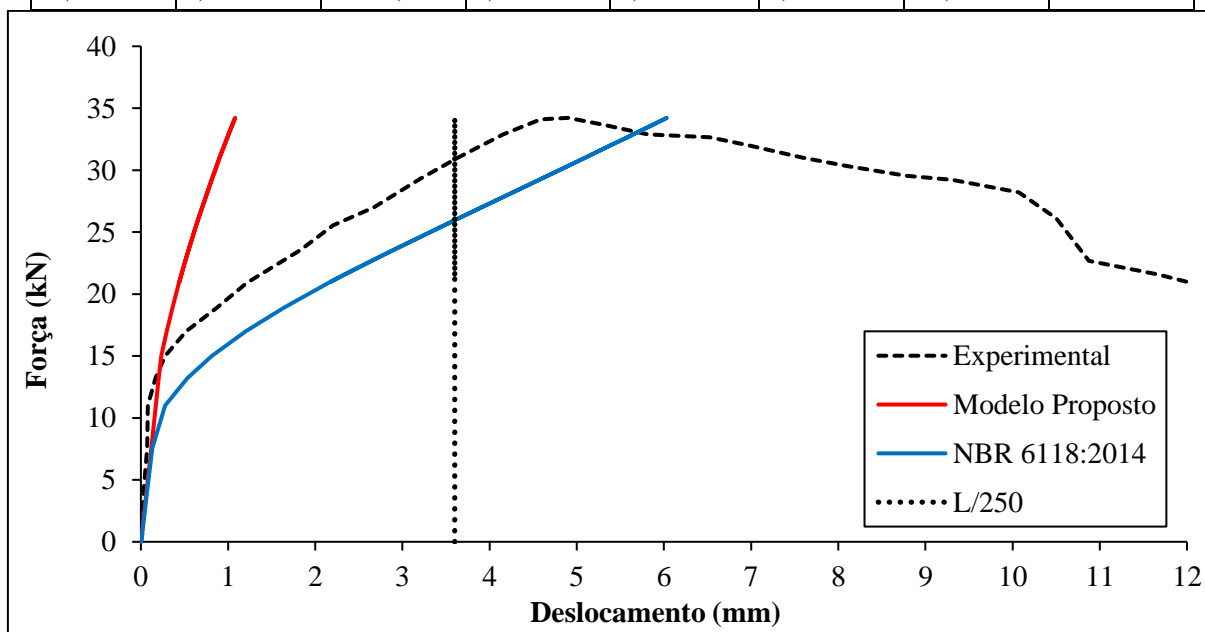
- R1

<i>L (cm)</i>	<i>bw (cm)</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Ic (cm⁴)</i>	<i>X2 (cm)</i>	<i>ae</i>	<i>I2 (cm⁴)</i>	<i>est (%)</i>	<i>ecc (%)</i>
90	12	17	4913,0000	2,208	6,515	377,8341	10,00	0,61
<i>As (cm²)</i>	<i>d (cm)</i>	<i>Es (MPa)</i>	<i>Yt (cm)</i>	<i>Fck (MPa)</i>	<i>g (kN/m)</i>	<i>Domínio</i>	<i>βx</i>	<i>XI (cm)</i>
0,3925	13,65	200000	8,5	37,6	0,51	2	0,05707505	8,554

<i>Mr Modelo (kN.m)</i>	<i>Ecs (MPa)</i>	<i>Fcd (kN/cm²)</i>	2,6857
4,5000	30698,66	<i>X3 (cm)</i>	0,779
2,9192	<i>ai</i>	<i>A</i>	0,094292495
<i>Mr NBR (kN.m)</i>	0,894	<i>Fct,m (kN/cm²)</i>	0,336702611
<i>osd (dado no trab.) (kN/cm²)</i>	43,5	<i>Eci (Mpa)</i>	<i>Fct,inf (MPa)</i>
		34339	2,35691828

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,0516375	-78,0240450	34338,54977	0,002582559	4,91300E+07	0,002888769	0	0
0,284970833	-13,3973424	34338,54977	0,014511645	4,91300E+07	0,016232265	0,019980181	0,777777778
1,284970833	-2,26682005	34338,54977	0,0656363	4,91300E+07	0,07341868	0,032986498	4,111111111
2,318304167	-0,85282398	34338,54977	0,11846511	4,91300E+07	0,132511309	0,072736281	7,555555556
3,3516375	-0,31057567	34338,54977	0,171293921	3,37437E+07	0,278971025	0,079041249	11
4,018304167	-0,10867917	34338,54977	0,205377024	2,11668E+07	0,533218926	0,165750031	13,22222222
4,5516375	0,010286561	33985,32419	0,235061481	1,57426E+07	0,812124964	0,279264214	15
5,1516375	0,114708858	30399,61394	0,297436953	1,20302E+07	1,202862238	0,519843924	17
5,718304167	0,193234433	27703,15958	0,362297239	9,81210E+06	1,637040837	0,867459433	18,88888889
6,318304167	0,261050978	25374,43776	0,437058201	8,25123E+06	2,151018604	1,215062554	20,88888889
7,118304167	0,333723735	22878,96069	0,546114988	6,90630E+06	2,895359921	1,830149882	23,55555556
7,718304167	0,378365724	21346,01951	0,634679043	6,23206E+06	3,479100107	2,204508857	25,55555556

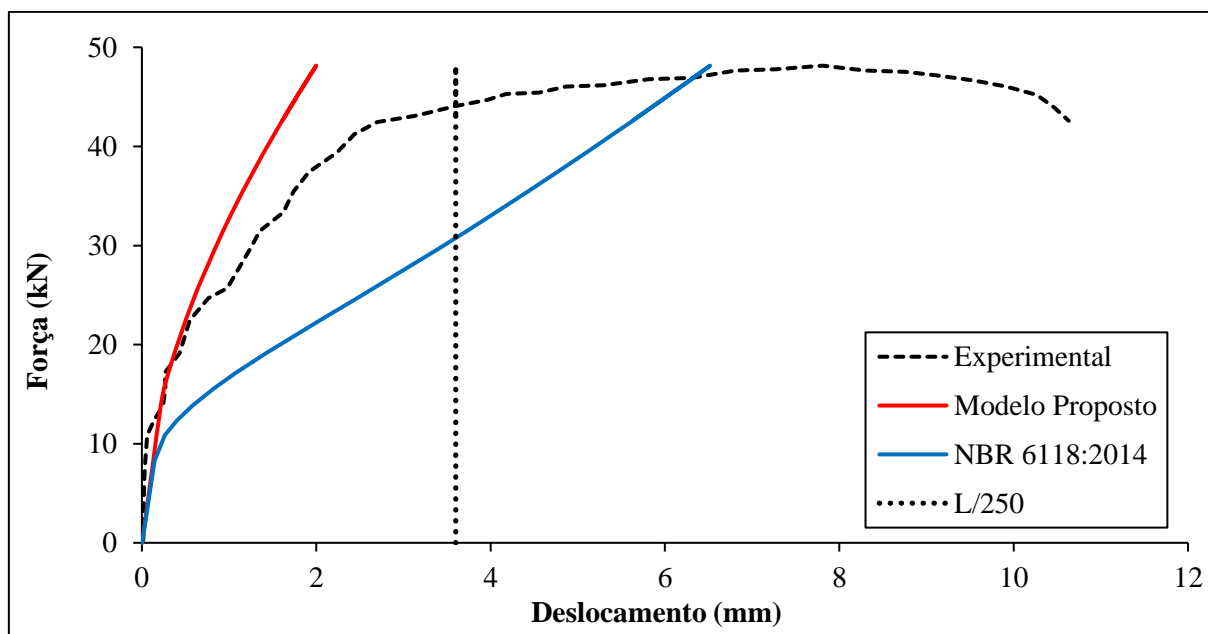
8,1516375	0,406532119	20378,82636	0,702131114	5,86118E+06	3,906966776	2,672575251	27
8,8516375	0,446225624	19015,80898	0,817082809	5,40508E+06	4,600506594	3,207432181	29,33333333
9,3516375	0,470953909	18166,67551	0,903592067	5,15786E+06	5,09337649	3,635340022	31
9,918304167	0,495978543	17307,36587	1,005934334	4,93466E+06	5,646386856	4,156868574	32,88888889
10,28497083	0,510708753	16801,55183	1,074530147	4,81535E+06	6,00022843	4,584825963	34,11111111
10,31830417	0,511996231	16757,3417	1,080857124	4,80533E+06	6,032226422	4,899194847	34,22222222
10,1516375	0,505474766	16981,27936	1,049373295	4,85675E+06	5,871949891	5,307283538	33,66666667
9,918304167	0,495978543	17307,36587	1,005934334	4,93466E+06	5,646386856	5,815731451	32,88888889
9,8516375	0,493183155	17403,35545	0,993661089	4,95829E+06	5,581697163	6,524786325	32,66666667
9,6516375	0,484566486	17699,23936	0,957212199	5,03318E+06	5,387011407	6,966332219	32
9,3516375	0,470953909	18166,67551	0,903592067	5,15786E+06	5,09337649	7,595206243	31
9,1516375	0,461385417	18495,24367	0,868555984	5,25029E+06	4,896679015	8,103641769	30,33333333
8,918304167	0,449682227	18897,11422	0,828408342	5,36888E+06	4,666420618	8,772624799	29,55555556
8,818304167	0,444477805	19075,82654	0,811444388	5,42360E+06	4,567532079	9,307779016	29,22222222
8,518304167	0,428134442	19637,03393	0,761434161	5,60363E+06	4,270379097	10,07043231	28,22222222
7,884970833	0,389564098	20961,48361	0,660280664	6,07973E+06	3,643289775	10,4987613	26,11111111
6,8516375	0,311380553	23646,19315	0,508597622	7,28592E+06	2,641671149	10,87372724	22,66666667
6,518304167	0,280887483	24693,28096	0,463333141	7,85201E+06	2,331945663	11,67652669	21,55555556
6,3516375	0,264443622	25257,9393	0,441390891	8,18118E+06	2,180884191	11,9909699	21



- R2

L (cm)	bw (cm)	h (cm)	Ic (cm ⁴)	X2 (cm)	ae	I2 (cm ⁴)	est (%)	ecc (%)
90	12	17	4913,0000	2,787	6,515	589,5147	10,00	1,07
As (cm ²)	d (cm)	Es (MPa)	Yt (cm)	Fck (MPa)	g (kN/m)	Domínio	β_x	X1 (cm)
0,6633	13,575	200000	8,5	37,6	0,51	2	0,096986089	8,589
Mr Modelo (kN.m)	Ecs (MPa)	Fcd (kN/cm ²)	2,6857					
4,5000	30698,66	X3 (cm)	1,317					
2,9192	ai	A	0,090301391					
Mr NBR (kN.m)	0,894	Fct,m (kN/cm ²)	0,336702611					
osd (dado no trab.) (kN/cm ²)	43,5	Eci (Mpa)	Fct,inf (MPa)					
		34339	2,35691828					

<i>Ma (kN.m)</i>	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	<i>Dano</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Ieq (mm⁴)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>Carga (kN)</i>
0,0516375	-78,3678204	34338,54977	0,002582559	4,91300E+07	0,002888769	0	0
0,162748611	-24,2444008	34338,54977	0,008263076	4,91300E+07	0,009242815	0,01539263	0,37037037
1,829415278	-1,32855035	34338,54977	0,093470835	4,91300E+07	0,104553506	0,023775694	5,925925926
2,533118981	-0,70676972	34338,54977	0,129447444	4,91300E+07	0,144795798	0,039420921	8,271604938
3,310896759	-0,32697028	34338,54977	0,169211064	3,55294E+07	0,26172805	0,062770358	10,86419753
3,755341203	-0,18054579	34338,54977	0,191933133	2,62039E+07	0,402525904	0,139686148	12,34567901
4,199785647	-0,06509218	34338,54977	0,214655202	2,04146E+07	0,577843764	0,239619841	13,82716049
4,718304168	0,042135935	32891,66286	0,251772972	1,61345E+07	0,821422254	0,270531401	15,55555556
5,199785649	0,122575789	30129,47493	0,30290919	1,35454E+07	1,078301642	0,263064002	17,16049383
5,792378241	0,203243895	27359,44917	0,371601732	1,14294E+07	1,423601631	0,432114553	19,13580247
6,79237824	0,307503239	23779,33448	0,501375058	9,32729E+06	2,045664149	0,547630324	22,4691358
7,459044906	0,361510126	21924,81633	0,597164845	8,48682E+06	2,46894976	0,762748256	24,69135802
7,755341205	0,382540492	21202,66404	0,642036843	8,20098E+06	2,656512709	0,977708314	25,67901235
8,940526389	0,452763746	18791,29935	0,835149231	7,40016E+06	3,393961043	1,239083073	29,62962963
9,496081944	0,479668044	17867,44478	0,932916991	7,15117E+06	3,730402568	1,354409397	31,48148148
10,0516375	0,503611105	17045,27477	1,035134174	6,95421E+06	4,060508253	1,623188406	33,33333333
10,68126713	0,527750145	16216,37516	1,15620725	6,77774E+06	4,427225374	1,738546304	35,43209877
11,27385972	0,548019524	15520,35408	1,275087816	6,64575E+06	4,765678575	1,915269489	37,40740741
11,86645232	0,566276691	14893,42943	1,398612612	6,53882E+06	5,098234594	2,237772726	39,38271605
12,42200787	0,581821361	14359,64802	1,51852203	6,45627E+06	5,405187471	2,437498027	41,2345679
12,79237824	0,5914399	14029,36133	1,600617715	6,40893E+06	5,607477483	2,698525465	42,4691358
12,97756343	0,59604492	13871,23162	1,64230157	6,38724E+06	5,707970237	3,143617189	43,08641975
13,27385972	0,6031479	13627,3256	1,709866491	6,35502E+06	5,867905967	3,59642891	44,07407407
13,45904491	0,607429809	13480,29106	1,752633419	6,33630E+06	5,967357115	3,957121657	44,69135802
13,64423009	0,611596517	13337,21234	1,795810789	6,31858E+06	6,066434909	4,179706987	45,30864198
13,68126713	0,612416446	13309,05716	1,804495222	6,31515E+06	6,086206937	4,555681854	45,43209877
13,86645232	0,616450999	13170,51645	1,848160727	6,29855E+06	6,184855606	4,862666161	46,04938272
13,90348935	0,617245134	13143,24701	1,856942313	6,29533E+06	6,204543815	5,292349468	46,17283951
14,08867454	0,621153777	13009,02989	1,901091235	6,27976E+06	6,30278314	5,814167535	46,79012346
14,12571158	0,621923326	12982,60467	1,909969038	6,27674E+06	6,322391397	6,305231916	46,91358025
14,3479338	0,626458015	12826,89006	1,963569835	6,25928E+06	6,439772277	6,811720501	47,65432099
14,38497083	0,627200311	12801,40067	1,972558728	6,25648E+06	6,459291912	7,272094345	47,77777778
14,49608195	0,629404674	12725,70605	1,999619924	6,24823E+06	6,517777606	7,809226106	48,14814815
14,3479338	0,626458015	12826,89006	1,963569835	6,25928E+06	6,439772277	8,30021155	47,65432099
14,31089676	0,625711915	12852,51003	1,954596736	6,26212E+06	6,420240279	8,760553819	47,5308642
14,19978565	0,623450501	12930,1637	1,927772456	6,27080E+06	6,361569127	9,113447633	47,16049383
14,0516375	0,62038021	13035,59305	1,892229404	6,28281E+06	6,28316182	9,543052003	46,66666667
13,86645232	0,616450999	13170,51645	1,848160727	6,29855E+06	6,184855606	9,911259512	46,04938272
13,60719306	0,610772165	13365,51937	1,787142641	6,32205E+06	6,046648522	10,26409018	45,18518519
13,23682268	0,602277268	13657,22182	1,701362654	6,35889E+06	5,847969635	10,4634208	43,95061728
12,82941528	0,592371451	13997,3732	1,608920773	6,40449E+06	5,627609851	10,63204509	42,59259259



• R3

L (cm)	bw (cm)	h (cm)	Ic (cm ⁴)	X2 (cm)	ae	I2 (cm ⁴)	est (%)	ecc (%)
90	12	17	4913,0000	3,327	6,515	828,0795	10,00	1,70
As (cm ²)	d (cm)	Es (MPa)	Yt (cm)	Fck (MPa)	g (kN/m)	Domínio	βx	XI (cm)
0,99498	13,575	200000	8,5	37,6	0,51	2	0,14548352	8,633

Mr Modelo (kN.m)	Ecs (MPa)	Fcd (kN/cm²)	2,6857
4,5000	30698,66	X3 (cm)	1,975
2,9192	ai	A	0,085451648
Mr NBR (kN.m)	0,894	Fct,m (kN/cm²)	0,336702611
csd (dado no trab.) (kN/cm²)	43,5	Eci (Mpa)	Fct,inf (MPa)
		34339	2,35691828

Ma (kN.m)	MODELO			NBR 6118:2014		EXPERIMENTAL	
	Dano	E (MPa)	δ (mm)	Ieq (mm ⁴)	δ (mm)	δ (mm)	Carga (kN)
0,0516375	-78,7855552	34338,54977	0,002582559	4,91300E+07	0,002888769	0	0
0,289261262	-13,3138142	34338,54977	0,014730992	4,91300E+07	0,01647762	0,024882932	0,792079208
1,477380074	-1,87171518	34338,54977	0,075473156	4,91300E+07	0,084421875	0,032792738	4,752475248
2,665498886	-0,62979802	34338,54977	0,136215321	4,91300E+07	0,152366131	0,04902432	8,712871287
3,536786015	-0,24926373	34338,54977	0,180759575	3,12504E+07	0,31787372	0,073687535	11,61716172
4,249657302	-,053925487	34338,54977	0,217204873	2,15217E+07	0,554627811	0,123371006	13,99339934
4,883320668	0,071865465	31870,79393	0,268927278	1,70072E+07	0,806533828	0,189725491	16,10561056
5,516984035	0,168789635	28542,5585	0,339260104	1,43325E+07	1,081264922	0,239436426	18,21782178
5,913023639	0,218831934	26824,17849	0,386912774	1,31961E+07	1,258695845	0,339160407	19,5379538
6,150647401	0,245768865	25899,20336	0,416838183	1,26481E+07	1,366011625	0,422295766	20,330033
7,180350371	0,341929548	22597,18498	0,557745062	1,10258E+07	1,829393661	0,455225828	23,76237624
7,140746411	0,338742782	22706,61389	0,551995194	1,10717E+07	1,811755202	0,446917785	23,63036304
7,536786015	0,369107044	21663,94918	0,610655406	1,06545E+07	1,987143102	0,571607091	24,95049505
8,170449381	0,411582904	20205,38974	0,709792455	1,01439E+07	2,262663536	0,696214004	27,06270627

9,120944431	0,464263287	18396,42179	0,870292693	9,62004E+06	2,663477134	0,878963486	30,2310231
10,07143948	0,507035574	16927,68348	1,044378562	9,27553E+06	3,050311577	1,095000069	33,39933993
11,21995433	0,549092145	15483,5218	1,272009121	9,00026E+06	3,502131139	1,302646215	37,22772277
12,48728106	0,586569211	14196,61372	1,544032431	8,80268E+06	3,985230404	1,55186004	41,45214521
13,67539988	0,615436993	13205,33596	1,817888608	8,67813E+06	4,427083274	1,78445778	45,41254125
14,74470681	0,637472036	12448,68454	2,079179354	8,59780E+06	4,817870687	2,083670919	48,97689769
15,73480582	0,655229524	11838,91814	2,333085878	8,54165E+06	5,175214299	2,283050219	52,27722772
17,00213255	0,674973613	11160,93477	2,674154484	8,48756E+06	5,627709206	2,615481798	56,50165017
17,7546078	0,685379441	10803,61372	2,884874436	8,46237E+06	5,894288941	2,848230593	59,00990099
18,03183552	0,688997271	10679,3827	2,964006076	8,45412E+06	5,992169937	3,097787726	59,9339934
18,62589493	0,696392419	10425,44405	3,136236114	8,43806E+06	6,201375646	3,347235001	61,91419142
18,70510285	0,697343491	10392,78559	3,159471253	8,43607E+06	6,229217639	3,596860796	62,17821782
18,90312265	0,699686856	10312,31786	3,217835287	8,43124E+06	6,29877203	3,962950248	62,83828383
19,14074641	0,70243592	10217,91896	3,288389737	8,42571E+06	6,382145075	4,37895662	63,63036304
19,53678601	0,70687153	10065,60655	3,407222965	8,41707E+06	6,520888348	4,861482265	64,95049505
19,77440978	0,70944906	9977,097911	3,47926077	8,41222E+06	6,60401418	5,244201535	65,74257426
20,0516375	0,712380317	9876,442789	3,563996904	8,40684E+06	6,700886883	5,743411928	66,66666667
20,2496573	0,714425814	9806,203387	3,624975242	8,40318E+06	6,770013952	6,259293336	67,32673267
20,40807314	0,716034156	9750,975275	3,674027455	8,40035E+06	6,825276556	6,691970723	67,85478548
20,68530087	0,718790581	9656,323612	3,760441188	8,39561E+06	6,921905799	7,091319812	68,77887789
21,00213255	0,721853372	9551,151837	3,860084147	8,39049E+06	7,032219686	7,39911564	69,8349835
21,00213255	0,721853372	9551,151837	3,860084147	8,39049E+06	7,032219686	7,723664877	69,8349835
21,00213255	0,721853372	9551,151837	3,860084147	8,39049E+06	7,032219686	8,056535889	69,8349835
21,16054839	0,723351045	9499,723897	3,9102564	8,38805E+06	7,087330958	8,472569726	70,3630363
21,16054839	0,723351045	9499,723897	3,9102564	8,38805E+06	7,087330958	8,822084289	70,3630363
21,43777611	0,725919777	9411,517374	3,998615827	8,38394E+06	7,183705664	9,054997871	71,28712871
21,51698403	0,72664179	9386,724486	4,023991071	8,38280E+06	7,211225422	9,321267217	71,55115512
21,59619196	0,727358617	9362,109701	4,049423678	8,38169E+06	7,238738305	9,52096236	71,81518152
21,47738007	0,726281436	9399,098544	4,011296269	8,38337E+06	7,197466408	9,853874569	71,41914191
21,51698403	0,72664179	9386,724486	4,023991071	8,38280E+06	7,211225422	10,08687055	71,55115512
21,51698403	0,72664179	9386,724486	4,023991071	8,38280E+06	7,211225422	10,28659315	71,55115512
21,47738007	0,726281436	9399,098544	4,011296269	8,38337E+06	7,197466408	10,5529037	71,41914191
21,51698403	0,72664179	9386,724486	4,023991071	8,38280E+06	7,211225422	10,76925612	71,55115512
21,20015235	0,723722036	9486,984603	3,922835792	8,38745E+06	7,101104165	11,06894989	70,4950495
21,20015235	0,723722036	9486,984603	3,922835792	8,38745E+06	7,101104165	11,3352467	70,4950495
21,23975631	0,724091672	9474,29186	3,935429677	8,38685E+06	7,114875553	11,68474753	70,62706271
21,08134047	0,722604966	9525,343183	3,885141172	8,38926E+06	7,059779038	11,99270815	70,0990099

