

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RHAISSA SALAMONI VARES

**ESTUDO DO REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS BIPOIADAS
EM CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE FIBRA DE
VIDRO**

Porto Alegre

Julho 2019

RHAISSA SALAMONI VARES

**ESTUDO DO REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS BIPOIADAS
EM CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE FIBRA DE
VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientadora: Paula Manica Lazzari

Porto Alegre

Julho 2019

RHAISSA SALAMONI VARES

ESTUDO DE REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS BIAPOIADAS EM CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora Paula Manica Lazzari e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Paula Manica Lazzari (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof^ª. Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, ao meu
namorado e a todos que, de alguma forma,
contribuíram para que esse estudo fosse
realizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professora Dra. Paula M. Lazzari, pelos ensinamentos transmitidos, pela proatividade e disponibilidade ímpar. Aos técnicos do laboratório LEME, Fontes e Edgar, por terem ajudado a realizar toda a parte experimental. Aos bolsistas do LEME, em especial ao Ronaldo e ao Leandro, por colaborarem em todas as etapas de elaboração das vigas. Ao “seu” José, pelo bom-humor, pela sua força inabalável e ajuda. À mestrandia Carolina, por sempre indicar a melhor forma de resolver os problemas que surgiam ao longo dessa pesquisa. Ao doutorando Lucas pela disponibilidade nos ensaios. Aos colegas Luísa, Andrew e Wagner pelo apoio laboratorial e bom-humor. Aos meus pais e minha tia, que sempre estiveram oferecendo todo o apoio que precisei ao longo de todos os anos de graduação. Ao meu namorado pela compreensão, pelo apoio e por ser meu porto-seguro nas horas difíceis. À minha amiga Marina por sempre estar presente, mesmo que distante, e me motivar a seguir em frente. À Paula, Bianca, Yasmin e Larissa pela amizade de sempre e apoio incondicional. Agradeço à professora PhD. Ângela Graeff, ao professor João Luiz Campagnolo e à dotoranda Andressa por doarem parte de seus materiais de pesquisa, para a realização desse estudo. À Margarete da ArcelorMittal por intermediar a doação das armaduras de aço. Ao técnico Marcelo da Stratus, por disponibilizar materiais e informações sobre os vergalhões de fibra de vidro sempre que solicitado.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O trabalho trata do uso de barras de fibra de vidro como alternativa de reforço à flexão simples. O estudo desenvolvido foi dividido em oito capítulos. No capítulo 1, é apresentado uma introdução ao assunto de reforço estrutural com materiais compósitos, em especial ao reforço com barras de fibra de vidro. No capítulo 2 foram apresentadas as diretrizes da pesquisa. No capítulo 3 elaborou-se uma breve revisão bibliográfica acerca dos processos de produção e propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro. No capítulo 4 foi estruturado o roteiro do cálculo analítico de verificação das vigas testemunhos e das vigas reforçadas. No capítulo 5 é apresentada a estruturação do modelo numérico utilizado para representar o ensaio à flexão em quatro pontos. No capítulo 6 é apresentado a parte experimental deste trabalho. No Capítulo 7 foi feita a análise dos resultado obtidos nos experimentos e comparou-se com os resultados obtidos no modelo numérico. No capítulo 8 são apresentadas a considerações finais, a relação custo x benefício de se utilizar as barras de fibra de vidro, como reforço de vigas simples, e sugestões de estudos futuros.

Palavras-chave: Barras de fibra de vidro. GFRP. ANSYS. Método dos Elementos Finitos.
Reforço estrutural com barras não-metálicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da disposição da manta de fibra de vidro em uma viga reforçada genérica.....	16
Figura 2 – Dimensões das vigas de concreto armado.....	17
Figura 3 – Diagrama do processo de pultrusão.....	20
Figura 4 - Barra de fibra de vidro sujeita a ação de cisalhamento transversal.....	23
Figura 5 - Diagrama de equilíbrio da seção reforçada.....	26
Figura 6 – Processo iterativo teórico.....	29
Figura 7 – Geometria do elemento SOLID 65.....	39
Figura 8 – Diagrama tensão-deformação do concreto comprimido.....	41
Figura 9 – Geometria do elemento LINK180.....	45
Figura 10 – Modelos elastoplástico perfeito.....	46
Figura 11 – Geometria do elemento SOLID 185.....	47
Figura 12 – (a) Volume de concreto da viga VT e (b) Volume de concreto das vigas reforçadas.....	48
Figura 13 – (a) Areia média; (b) Brita 1, respectivamente, utilizadas no concreto.....	50
Figura 14 – Comparação curva tensão x deformação entre materiais frágeis e materiais dúcteis.....	52
Figura 15 – Propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro.....	52
Figura 16 – Ensaio de Tração realizado em vergalhão ϕ 6,2 mm pela Stratus.....	53
Figura 17 – Realização do corte das barras.....	53
Figura 18 – Resinas Primer e Laminação utilizadas nas vigas.....	55
Figura 19 – Dimensões vigas testemunho e vigas a serem reforçadas.....	57
Figura 20 – Amarração dos estribos nas armaduras longitudinais.....	57
Figura 21 – (a) Colocação do extensômetro; (b) Conexões elétricas do extensômetro....	58
Figura 22 – Formas das vigas.....	60
Figura 23 – Abatimento de cone referente à betonada do dia 26/04/2019.....	62
Figura 24 – (a) Apicoamento da região central da viga; (b) Ajuste fino realizado com martelo com prego.....	63
Figura 25 – Detalhe do aumento de seção para reforço na viga.....	63
Figura 26 – Forma para execução de reforço de uma das vigas.....	64
Figura 27 – (a) Lançamento da Argamassa Estrutural e (b) Viga acabada.....	67
Figura 28 – (a) Esmerilhadeira com disco diamantado e (b) Execução do arredondamento dos cantos das vigas.....	68

Figura 29 – Corte da manta de fibra de vidro.....	68
Figura 30 – Aplicação do primer na superfície onde a manta foi colocada.....	69
Figura 31 – Mistura manual dos materiais bi componentes da resina.....	69
Figura 32 – Aplicação da manta de fibra de vidro.....	70
Figura 33 – (a) Passagem de rolo de metal para reduzir os vazios e (b) Tábuas de madeiras colocadas para ajudar na fixação da manta.....	71
Figura 34 – (a) Esquema do ensaio para a viga VT e (b) Esquema das solicitações.....	72
Figura 35 – (a) Posicionamento da viga VT para ensaio; (b) Ensaio da Viga VR1.....	72
Figura 36 – (a) Descolamento do reforça na extremidade e (b) Descolamento do reforço na região central da viga.....	76
Figura 37 – Flambagem da armadura de aço na zona comprimida e barra de fibra de vidro intacta.....	77
Figura 38 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VT.....	78
Figura 39 – Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VT.....	79
Figura 40 – Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VT.....	79
Figura 41 – Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VT.....	79
Figura 42 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR1.....	81
Figura 43 – Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR1.....	82
Figura 44 – Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR1.....	82
Figura 45 – Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR1.....	82
Figura 46 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR2.....	84
Figura 47 – Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR2.....	84
Figura 48 – Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR2.....	85
Figura 49 – (a) Ocorrência da flambagem na armadura superior de aço e (b) Instante próximo ao final do ensaio.....	85
Figura 50 – Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR2.....	85
Figura 51 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR3.....	87
Figura 52 – Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR3.....	87
Figura 53 – Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR3.....	88
Figura 54 – Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR3.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas da pesquisa.....	19
Quadro 2 – Coeficiente de expansão térmica.....	22
Quadro 3 – Peso específico típico para barras com teor de fibras entre 50-70% (kg/m ³)	22
Quadro 4 - Caracterização física do agregado miúdo.....	50
Quadro 5 – Caracterização física do agregado graúdo.....	51
Quadro 6 – Cargas das vigas no ensaio experimental.....	73
Quadro 7 – Aumento de carga das vigas da primeira betonada.....	74
Quadro 8 – Aumento de carga das vigas da segunda betonada.....	75
Quadro 9 - Relação do aumento da carga de ruptura em relação à viga testemunho VT.	75
Quadro 10 – Relação do aumento da carga de ruptura em relação à viga testemunho VT1.....	76
Quadro 11 – Comparação da flecha da viga VT experimentais com o modelo computacional.....	78
Quadro 12 – Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VT (em kN/cm ²).....	80
Quadro 13 – Comparação da flecha das viga experimental VR1 com o modelo computacional.....	81
Quadro 14 – Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR1 (em kN/cm ²).....	83
Quadro 15 – Comparação da flecha das viga experimental VR2 com o modelo computacional.....	84
Quadro 16 – Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR2 (em kN/cm ²).....	86
Quadro 17 – Comparação da flecha das viga experimental VR3 com o modelo computacional.....	87
Quadro 18 – Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR3 (em kN/cm ²).....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das Fibras utilizadas nas barras de GFRP.....	21
Tabela 2(a) – Valores das propriedades para o concreto C40 e argamassas C62,7 C63 e C71,35.....	41
Tabela 2(b) –Valores dos coeficientes para concretos C12 a C50.....	41
Tabela 2(c) – Valores dos coeficientes para concretos C55 a C120.....	42
Tabela 3 – Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial do concreto conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012).....	42
Tabela 4 – Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C62,7 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012).....	42
Tabela 5 – Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C63 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012).....	43
Tabela 6 – Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C71,3 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012).....	42
Tabela 7 – Propriedades do Primer RESIN 50.....	54
Tabela 8 – Propriedades da Resina Laminação.....	55
Tabela 9 – Tabela com dados técnicos da argamassa estrutural ZENTRIFIX CR.....	55
Tabela 10 – Resistência à compressão simples da argamassa SIKA MonoTop-622 aos 28 dias.....	56
Tabela 11 – Comparação entre as resistências médias do concreto com alteração na relação água-cimento.....	59
Tabela 12 – Ensaio dos corpos-de-prova da primeira betonada.....	59
Tabela 13 – Ensaio dos corpos-de-prova da segunda betonada.....	60
Tabela 14 – Quantidade adicionada de aditivo em cada betonada.....	61
Tabela 15 – Valores de abatimento de cone por betonada.....	61
Tabela 16 – Diâmetros das barras de reforço por vigas.....	64
Tabela 17 – Quantidade de corpos-de-prova por Viga.....	65
Tabela 18 – Índice de Consistência da Argamassa Estrutural por vigas.....	66
Tabela 19 – Ensaio à compressão realizado dia 11 de junho de 2019.....	66
Tabela 20 – Ensaio à compressão realizado dia 11 de junho de 2019.....	67
Tabela 21 – Resistência média à compressão e desvio-padrão da argamassa das vigas reforçadas.....	67
Tabela 22 – (a) Custo de duas barras de aço em função do diâmetro e comprimento e (b) Custo de duas barras de fibra de vidro em função do diâmetro e comprimento.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Carga x Deslocamento das vigas VT, VR1, VR2 e VR3.....	74
Gráfico 2 – Carga x Deslocamento das vigas VT1, VRR1, VRR2 e VRR3.....	74
Gráfico 3 – Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VR1 experimental vs. VR1 numérica.....	90
Gráfico 4 – Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR2 (em kN/cm ²).....	90
Gráfico 5 – Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VR3 experimental vs. VR3 numérica.....	90
Gráfico 6 – Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VRR3 experimental.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSYS - Analysis Systems Incorporated

APDL - Ansys Parametric Design Language

GFRP – Glass FIBer Reinforced Polymer

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT - Linear Variation Displacement Transducer

PVC – Policloreto de vinila

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES.....	15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	15
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	15
2.2.1 Objetivo Principal.....	15
2.2.2 Objetivo Secundário.....	15
2.3 HIPÓTESE.....	15
2.4 DELIMITAÇÕES.....	16
2.5 LIMITAÇÕES.....	16
2.6 DELINEAMENTO.....	17
3 BARRAS DE FIBRAS DE VIDRO.....	20
3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS BARRAS DE GFRP.....	20
3.2 PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP.....	20
3.2.1 Propriedades Físicas das barras de GFRP.....	22
3.2.2 Propriedades Mecânicas das barras.....	23
3.2.3 Efeitos térmicos nas barras de GFRP.....	23
3.3 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO EM MEIOS ALCALINOS.....	24
4 VERIFICAÇÃO DAS ARMADURAS.....	26
4.1 VERIFICAÇÃO DA LINHA NEUTRA.....	26
4.2 VERIFICAÇÃO DO DOMÍNIO DE DEFORMAÇÃO.....	27
4.3 VERIFICAÇÃO QUANTO AOS MOMENTO ÚLTIMO E À CARGA ÚLTIMA..	31
4.4 VERIFICAÇÃO QUANTO AO CISALHAMENTO.....	31
4.5 VERIFICAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM.....	33
4.6 AVALIAÇÃO DA FLECHA IMEDIATA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....	35
5 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	38
5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	38
5.2 ANSYS.....	38
5.3 MODELAGEM DO CONCRETO E ARGAMASSA ESTRUTURAL.....	39
5.3.1 SOLID 65.....	39
5.3.1.1 Modelo Linear Isotropic.....	39
5.3.1.2 Modelo Multilinear Elástico (MELAS).....	40

5.3.1.3 Modelo Concrete.....	43
5.3.1.4 Massa Específica do Concreto.....	44
5.4 MODELAGEM DA ARMADURA.....	45
5.4.1 LINK 180.....	45
5.4.1.1 Modelo Bilinear (BISO).....	46
5.5 MODELO DO PONTO DE APLICAÇÃO DAS CARGAS E APOIOS.....	47
6 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	49
6.1 MATERIAIS.....	49
6.1.1 Cimento.....	49
6.1.2 Agregado miúdo e agregado graúdo.....	49
6.1.3 Armaduras de aço.....	51
6.1.4 Barras de fibra de vidro.....	51
6.1.5 Manta de fibra de vidro.....	54
6.1.6 Primer.....	54
6.1.7 Resina Epóxi.....	54
6.1.8 Argamassa Estrutural.....	55
6.2 EXECUÇÃO DAS VIGAS.....	56
6.2.1 Amarração das armaduras.....	57
6.2.2 Concreto.....	58
6.2.3 Formas.....	60
6.3 CONCRETAGEM.....	61
6.3.1 Ensaio de Abatimento de cone (<i>slump</i>).....	61
6.3.2 Cura.....	62
6.4 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	62
6.5 EXECUÇÃO DA CAMADA DE REFORÇO.....	63
6.5.1 Formas.....	63
6.5.2 Colocação das barras.....	64
6.5.3 Preparação da Argamassa.....	64
6.5.3.1 Índice de Consistência.....	65
6.5.3.2 Resistência à compressão.....	66
6.5.4 Lançamento da Argamassa.....	67
6.6 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	68
6.7 APLICAÇÃO DA MANTA DE GFRP PARA ANCORAGEM.....	69

6.8 ENSAIO.....	71
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	73
7.1 FISSURAÇÃO.....	77
7.2 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	77
7.3 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL X NUMÉRICO.....	89
8 CONCLUSÃO.....	92
8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
8.2 RELAÇÃO CUSTO x BENEFÍCIO.....	93
8.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	93
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A.1 – Exemplo de <i>script</i> para viga VT.....	98
APÊNDICE A.2 – <i>Script</i> para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento para a viga VT.....	111
APÊNDICE B.1 – Exemplo de <i>script</i> para viga VR1.....	112
APÊNDICE B.2 – <i>Script</i> para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR1.....	129
APÊNDICE C.1 – Exemplo de <i>script</i> para viga VR2.....	130
APÊNDICE C.2 – <i>Script</i> para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR2.....	147
APÊNDICE D.1 – Exemplo de <i>script</i> para viga VR3.....	148
APÊNDICE D.2 – <i>Script</i> para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR3.....	165
APÊNDICE E.1 – Tabelas do Cálculo analítico do $M_{\text{último}}$ das vigas.....	166
APÊNDICE E.2 – Tabelas do Cálculo analítico do $P_{\text{último}}$ das vigas.....	168

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos materiais de construção utilizados na execução de estruturas, desde a Roma Antiga até os dias atuais, proporcionou o aumento da capacidade portante de elementos estruturais e o aproveitamento quase total das condições de trabalho oferecidas pelas estruturas.

A fim de restaurar a segurança e aumentar a durabilidade das construções, tornou-se comum a utilização de técnicas capazes de restabelecer condições estruturais e de uso adequadas das estruturas. Entretanto, a necessidade de se realizar intervenções pode estar atrelada a fatores que não são unicamente a qualidade e durabilidade da construção, mas sim à mudança de uso que essa possa sofrer.

Nos últimos anos, tem-se observado a crescente preocupação relativa à durabilidade, à manutenção das construções e às adequações a novos usos das obras civis, o que tem desenvolvido estudos para solucionar esses problemas. Contudo, os profissionais da área de engenharia ainda contam com, basicamente, técnicas fundadas em experiências empíricas anteriores e com a falta de normas específicas de projeto de reforço com materiais compósitos; demonstrando-se, assim, a importância de estudos experimentais e computacionais em relação ao tema.

O uso da fibra de vidro de forma difusa em concretos e argamassas, já vem sendo realizada para se aumentar a capacidade de deformação desses materiais e auxiliar na capacidade de resistir maiores solicitações de tração, de solicitações compostas e impacto. Atualmente, também têm sido utilizadas a fim de se controlar a fissuração, em concretos e argamassas, decorrentes do processo de hidratação do cimento.

A utilização das fibras em formas de barras, tecidos e telas vem surgindo como alternativa a armaduras de aço, por essas estarem sujeitas à corrosão. Entretanto, para que se possa, de fato, serem feitas as substituições dos materiais metálicos é necessário realizar uma investigação experimental aprofundada em relação ao seu comportamento frente às deformações estruturais, resistência à tração, ruptura, entre outras. Um dos aspectos que tem sido debatido na comunidade acadêmica é a susceptibilidade das fibras em meios alcalinos que, com o passar do tempo, provocam perdas nas propriedades físicas como a redução da resistência à tração.

Entre as alternativas de uso, as barras de fibra de vidro podem ser utilizadas em reforços de estruturas submetidas à flexão. Para tanto, surge este estudo que visa observar o comportamento físico das barras de fibra de vidro em diferentes configurações de reforço. Para a realização desse trabalho, foram ensaiadas experimentalmente oito vigas em concreto armado, sendo seis reforçadas com barras de fibra de vidro (de 8 mm, 10mm e 12 mm) e duas vigas testemunhos. Em uma primeira etapa, essas vigas foram verificadas analiticamente e, na sequência, elaborou-se um estudo numérico com o auxílio do *software* ANSYS , versão 18.2 estudante, o qual é baseado no Método dos Elementos Finitos. Dessa forma, foi possível comparar os resultados do ensaio à flexão de quatro pontos com os resultados obtidos de forma numérica e analítica, obtendo-se bons resultados. É interessante ressaltar que as propriedades físicas e mecânicas das barras influenciam na transferência de tensões ao material cimentício, sendo esse um dos pontos de estudo nesse trabalho.

Primeiramente seriam utilizados estribos de fibra de vidro para realizar a ancoragem das barras de GFRP, entretanto não foi possível executar essa técnica de reforço dentro do cronograma do estudo. Sendo assim, para evitar o escorregamento das barras de fibra de vidro durante o ensaio de flexão, utilizou-se uma camada de manta de fibra de vidro que funcionou como ancoragem das barras de reforço.

2 DIRETRIZES

As diretrizes da pesquisa serão apresentadas a seguir.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão da pesquisa é: qual a influência que o reforço com barras de fibra de vidro, de diferentes diâmetros, causa em vigas submetidas à flexão?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa foram divididos em principal e secundários, conforme descrição a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

Verificar o aumento da capacidade estrutural das vigas reforçadas com barras de fibra de vidro, considerando diâmetros de 8 mm, 10 mm e 12 mm.

2.2.2 Objetivos Secundários

Entre os objetivos secundários, pode-se listar:

- a) estudo dos tipos de reforços estruturais existentes para melhorar o comportamento à flexão;
- b) comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados analíticos.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese da pesquisa é que a utilização de barras de fibra de vidro para reforço estrutural proporcionará um ganho de resistência dos elementos, aumentando a capacidade de carga à flexão.

2.4 DELIMITAÇÕES

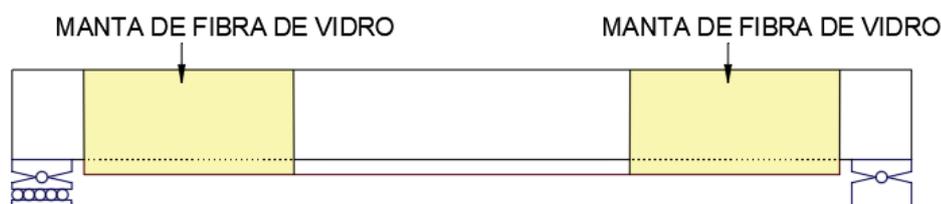
O estudo delimita-se à avaliação de três diferentes diâmetros de barras de fibra de vidro para reforço estrutural em vigas de concreto armado submetidas à flexão, em comparação a vigas sem reforço. As barras possuem diâmetros de 8 mm, 10 mm e 12 mm e todas serão recobertas com argamassa estrutural e ancoradas com manta de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações do trabalho são:

- a) com relação às barras de GFRP: serão analisados os comportamentos das barras à flexão, não sendo realizados estudos acerca da resistência desse material a altas temperaturas, a materiais corrosivos e a solicitações compostas;
- b) a manta de fibra de vidro será utilizada apenas para ancorar as barras de GFRP, não sendo realizados estudos do comportamento dessa durante o ensaio. As dimensões da manta utilizada são 35cm x 55 cm e foram colocadas nos dois terços médios das vigas reforçadas, de modo que ficassem 12 cm livres para posicionamento nos apoios dos testes (Figura 1);

Figura 1 - Esquema da disposição da manta de fibra de vidro em uma viga reforçada genérica

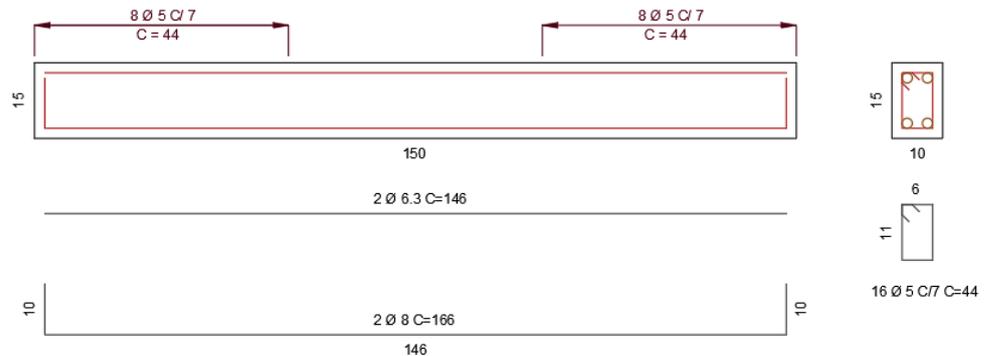


(fonte: elaborada pela autora)

- c) a argamassa estrutural teve seis valores característicos de resistência à compressão, sendo utilizado na análise analítica, a mais elevada resistência média à compressão obtida, para mesma configuração de reforço;
- d) as vigas de concreto armado utilizadas
 - d.1) têm dimensões de 150 cm de comprimento 10 cm de largura e 15 cm de altura e são compostas por duas armaduras ativas de 146 cm e ganchos de 10 cm com diâmetro de 8 mm, duas armaduras passivas de 146 cm com

diâmetro de 6,3 mm e estribos com diâmetro de 5 mm espaçados a cada 7 cm nos dois terços médios das vigas, conforme é possível verificar na Figura 2.

Figura 2 - Dimensões das vigas de concreto armado



(fonte: elaborada pela autora)

d.2) na análise numérica será adotada a maior resistência média à compressão entre as duas betonadas;

d.3) o reforço será executado sem carga previamente aplicada nas vigas;

d.4) cada diâmetro de barra de fibra de vidro será analisado em duas vigas distintas.

2.6 DELINEAMENTO

A pesquisa seguirá as etapas abaixo descritas e elucidadas no Quadro 1 a seguir.

- a) revisão bibliográfica;
- b) verificação das armaduras e demais materiais necessários para moldagem das vigas;
- c) aquisição e recebimento de materiais;
- d) teste de resistência de materiais recebidos;
- e) elaboração do modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos;
- f) moldagem das vigas em concreto armado;
- g) execução dos reforços;
- h) ensaios em conformidade com as normas;
- i) avaliação de resultados;
- j) considerações finais;

A primeira etapa desse trabalho consistiu em revisar bibliografias referentes ao tema. Buscaram-se, estudos nacionais, em sua maioria, e internacionais sobre o tema, principalmente referentes aos comportamentos das barras de fibra de vidro submetidas a ensaios de flexão simples.

A segunda etapa do trabalho consistiu em realizar a verificação das armaduras com base na norma NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). Sendo fundamental para que a etapa subsequente de aquisição de materiais fosse realizada.

Com base nas pesquisas publicadas, foi possível estabelecer uma diretriz para testar materiais que não possuíam normas de referência para ensaios, como o ensaio de compressão da argamassa estrutural. Na próxima análise, foram elaborados os *scripts* de entrada de dados dos modelos numéricos de cada viga (uma testemunho e três reforçadas) no *software* ANSYS, que serviram para comparar os resultados numéricos e experimentais. Esta foi uma das etapas mais importantes do trabalho, visto que os resultados aqui encontrados devem possibilitar uma análise conclusiva do estudo.

Definidos os parâmetros das vigas referentes a armaduras e resistências do concreto, adquiriu-se os materiais para ensaio em conformidade com as especificações previamente estabelecidas.

Executadas todas as etapas anteriores, foram realizados ensaios em corpo-de-prova do programa experimental, sendo possível levantar dados referentes à resistência à compressão dos materiais.

Com base nos ensaios realizados, buscou-se encontrar as explicações dos resultados encontrados em função do comportamento dos corpos-de-prova.

As considerações finais foram elaboradas a fim de responder à questão da pesquisa deste trabalho.

Quadro 1 - Etapas da pesquisa

	Elaboração da Proposta	Revisão Bibliográfica	Verificação da Estrutura	Doação de materiais	Parte Experimental	Parte Numérica	Entrega do TCC	Defesa do TCC	Correções	Entrega Final
mar/19	1ª									
	2ª									
	3ª	X		X	X					
	4ª	X		X	X					
abr/19	1ª		X	X	X					
	2ª		X		X	X				
	3ª		X			X	X			
	4ª		X			X	X			
mai/19	1ª		X		X	X				
	2ª		X		X	X				
	3ª		X		X	X				
	4ª		X		X	X				
jun/19	1ª		X		X	X				
	2ª		X		X	X				
	3ª		X			X				
	4ª		X			X				
jul/19	1ª									
	2ª						X			
	3ª							X	X	X
	4ª									

(fonte: elaborada pela autora)

3 BARRAS DE FIBRA DE VIDRO

Os materiais compósitos são a combinação de uma matriz e um reforço, que compõem duas fases. Esses materiais, quando combinados, apresentam um desempenho mecânico superior do que quando estão separados.

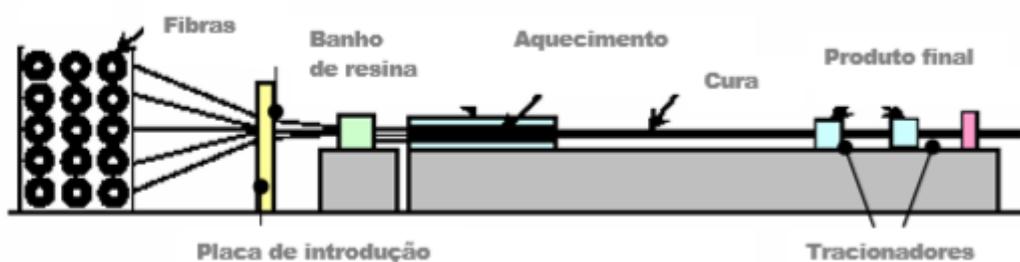
Os estudos realizados neste trabalho serão em relação aos compósitos sintéticos que formam as barras de fibra de vidro, formadas por fibras impregnadas com resina.

Os compósitos GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) são materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro.

3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS BARRAS DE GFRP

As barras passam por um processo denominado pultrusão, que consiste em alongar as fibras e impregná-las com resina. Após esse processo, os fios de fibra são passados por um bico compactador que forma a barra; a barra formada é então aquecida para começar uma reação exotérmica de endurecimento da resina. feita a cura, a barra é tracionada e cortada no tamanho desejado (TAVARES, 2006). A Figura 3 a seguir mostra de forma simplificada o processo de pultrusão.

Figura 3 - Diagrama do processo de pultrusão



(fonte: TAVARES, 2006)

3.2 PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP

Os materiais compósito GFRP possuem grande rigidez e resistência específicas, não são corrosivos e são fáceis de serem aplicados. Por possuírem alta resistência à tração, os compósitos de GFRP têm surgido como alternativa em estruturas protendidas, além de possuírem baixa fluência.

As fibras de vidro possuem excelente resistência à fadiga, embora as resinas não possuam tal característica. Estudos demonstram que barras de fibra de vidro, de boa qualidade, possuem deformação adicional, em decorrência da fluência, estimada em 3% da deformação elástica inicial. Quando submetidas a condições ambientais agressivas, as barras sujeitas a carregamentos constantes podem, eventualmente, falhar por fluência. A resistência ao cisalhamento dos compósitos reforçados com fibras é baixo, sendo assim as barras de fibra de vidro podem ser facilmente cortadas na direção perpendicular ao eixo longitudinal com o auxílio de serras comuns (MACHADO, 2002).

Testes de fluência realizados por (BUDELMANN; ROSTASY, 1993, apud MACHADO, 2002) com compósitos formados por fibras, com diferentes seções transversais, mostraram que a ruptura por fluência somente ocorrem quando as tensões que o elemento estiver suportando forem maiores que 60% das tensões de curta duração.

As fibras das barras de GFRP devem ser contínuas, mais resistentes e mais rígidas que a matriz. Quando submetidas à tração, possuem um comportamento elástico linear, apresentando bom comportamento em ambientes secos. Entretanto, em ambientes úmidos, reagem com a água, o que pode danificá-las. De acordo com o código ACI 440-1996, a susceptibilidade em relação ao meio ao qual estão inseridas deve ser considerada, independentemente de possuírem polímeros na sua constituição, pois durante o processo de fabricação podem ocorrer falhas (TAVARES, 2006).

As fibras disponíveis no mercado para confecção das barras de GFRP, são fibras de *E-GLASS*, *S-GLASS* e suas propriedades podem ser vistas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Propriedades das fibras utilizadas nas barras de GFRP

TIPO DE FIBRA	DENSIDADE (kg/m ³)	RESIST. À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE YOUNG (Gpa)	DEFORMAÇÃO ÚLTIMA (%)	COEFICIENTE DE POISSON
S-GLASS	2500	3450	72,4	2,4	0,22
E-GLASS	2500	4580	85,5	3,3	0,22
VIDRO ÁLCALI	2270	1800 - 3500	70-76	2,0 - 3,0	-

(fonte: TAVARES, 2006)

O sistema *E-GLASS* é anisotrópico, ou seja, as propriedades físicas variam conforme a direção, relativamente ao comprimento, na direção das fibras. Entretanto, é possível rearranjar as fibras de tal forma adquira um grau relativamente alto de isotropia em seu desempenho (MACHADO, 2002).

Quando as fibras de vidro são submetidas a carregamento constante, com tensões menores que a resistência instantânea estática, a falha ocorrerá em algum momento proporcional à manutenção das tensões com um valor mínimo, produzindo a ruptura por fluência, que é influenciada pelas condições ambientais e de umidade. Considera-se para efeitos teóricos que as fibras de vidro possuem pequenos vazios em sua superfície, que agem como concentradores de tensão, sendo assim quando as fibras são expostas a ambientes ácidos, ocorre a degradação ou rupturas no material, que podem ser maiores ou menores dependendo do tempo de exposição à essa condição (MACHADO, 2002). De acordo com o ACI 440.2R-02 as fibras de vidro podem sustentar 30% da sua resistência última para evitar problemas com ruptura por fluência (ACI, 2002).

3.2.1 Propriedades Físicas das barras de GFRP

O coeficiente de expansão térmica está relacionado ao tipo de fibra e à quantidade do materiais que compõem as barras. No Quadro 2 a seguir estão contidos valores típicos de coeficientes de expansão térmica (TAVARES, 2006).

Quadro 2 - Coeficiente de expansão térmica

DIREÇÃO	GFRP ($10^{(-6)}$)/°C
LONGITUDINAL	6,0 - 10,0
TRANSVERSAL	21,0 - 23,0

(fonte: TAVARES, 2006)

O peso específico do compósito pode ser obtido em função do peso específico das fibras e da fração da matriz. O Quadro 3 a seguir, mostra o peso específico das barras com a variação do teor de fibras entre 50 a 70% (TAVARES, 2006).

Quadro 3 - Peso específico típico para barras com teor de fibras entre 50-70% (kg/m^3)

MATRIZ	GFRP (kg/m^3)
POLIÉSTER	1750 - 2170
EPÓXI	1760 - 2180
VINIL ÉSTER	1730 - 2150

(fonte: TAVARES,2006)

3.2.2 Propriedades Mecânicas das barras

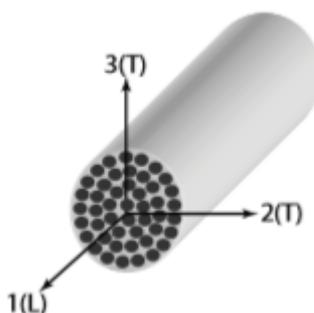
Os principais fatores que influenciam a resistência à tração são as propriedades da matriz e das fibras, as frações dos materiais constituintes, interação físico-química e procedimentos de controle na fabricação das barras (FIB TG 9.3, 2003).

A resistência à tração é variável em função da seção transversal da barra, ou seja, quanto maior a área transversal, menor a resistência à tração da barra. A ocorrência da perda de resistência à tração ocorre devido ao aumento da área de interface entre as fibras e a resina (TAVARES, 2006).

Quando solicitadas à compressão longitudinal, não é possível aplicar os conceitos relativos à tração, em função das barras apresentarem ruína por microfissuração das fibras. O comportamento à compressão depende da geometria da amostra e da metodologia de ensaio, apresentando valores de resistência menores que na tração (FIB TG 9.3, 2003).

O cisalhamento das barras (Figura 4) é governado pelas propriedades da matriz polimérica das barras e pela distribuição local de tensões. As barras de GFRP estão sujeitas, principalmente, ao cisalhamento transversal (FIB TG 9.3, 2003).

Figura 4 - Barra de fibra de vidro sujeita a ação de cisalhamento transversal



(fonte: FIB TG 9.3, 2003)

3.2.3 Efeitos térmicos nas barras de GFRP

A altas temperaturas, as resinas poliméricas começam a amolecer e gerar uma perda na resistência mecânica. (KARBHARI et al., 2003, apud FIB TG 9.3, 2003). Os compósitos não devem ser utilizados a temperaturas mais elevadas que a temperatura de transição do vidro T_v , temperatura a partir da qual ocorrem mudanças significativas nas propriedades do sistema, sendo essa a temperatura em que ocorre a transição elasto-plástica.

O valor de T_v depende do tipo de resina. De acordo com Bootle et al. (2001), os valores normalmente encontram-se na faixa de 70-100°C para poliéster, 70-163°C para resinas éster vinílicas e 95-175°C para resinas epóxis. Acima desses valores, as propriedades mecânicas em relação à tração diminuem, devido à redução da ligação matriz-fibra. O cisalhamento e a flexão também são prejudicados a altas temperaturas (KUMAHARA et al. (1993), WANG; EVANS (1995)).

De acordo com o (FIB, 2000), quando as barras são colocadas diretamente no concreto, a ligação entre eles depende das propriedades das resinas que estão na superfície das barras. Sendo assim, a altas temperaturas, a matriz não consegue transferir as solicitações do concreto para as fibras (FIB TG 9.3, 2003).

A temperaturas negativas pode ocorrer o endurecimento e micro trincamento da matriz, assim como redução na ligação fibra-matriz. Em ciclos de gelo e degelo em ambientes salinos, pode ocorrer degradação no compósito (FIB TG 9.3, 2003).

Em situações de incêndio, os materiais compósitos podem ser inflamados, propagando calor e gerando fumaça potencialmente tóxica. A partir de temperaturas acima de T_v , o módulo de elasticidade do compósito diminui (FIB TG 9.3, 2003).

Os problemas relacionados ao fogo são mais severos em ambientes fechados e com concentração de pessoas, como é o caso de túneis e edifícios. O uso de materiais compósitos não é recomendável em estruturas que a integridade estrutural dependa da resistência ao fogo do material compósito (FIB TG 9.3, 2003).

3.3 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO EM MEIOS ALCALINOS

O comportamento do material compósito depende das propriedades dos compostos que o foram. Cada elemento pode ser susceptível a ataques de meios agressivos, porém, isso não deve impedir que os componentes deixem de desempenhar sua função ao longo da vida útil do compósito (FIB TG 9.3, 2003).

Apesar de proporcionarem leveza e boa resistência à corrosão, as barras de GFRP passam por processos de deterioração por ataque químico, quando em contato a ambientes alcalinos, o que prejudica as propriedades mecânicas do material (PARDELA; AGUILA, 1992).

Quando as barras de fibra de vidro são expostas a meios alcalinos, além de perderem suas propriedades mecânicas, têm redução em sua massa, assim como do seu diâmetro. Isso ocorre,

pois as ligações Si – O – Si, na cadeia de vidro, são quebradas pelos íons OH^- do meio alcalino (PERUZZI, 2007).

De acordo com estudos de Micelli e Nanni, 2004 (apud, PERUZZI, 2007), as propriedades das resinas influenciam a durabilidade dos materiais GFRP, devido às fibras ficarem mais susceptíveis a ambientes alcalinos, quando a resina não possui uma propriedade adequada.

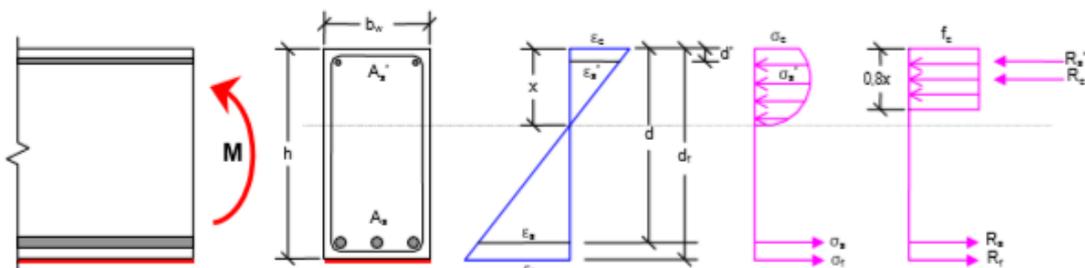
4 VERIFICAÇÃO DAS ARMADURAS

Como um dos objetivos deste trabalho é a comparação entre os resultados analíticos e experimentais, não foram considerados os coeficientes de majoração de carga ou de minoração da resistência dos materiais e o efeito de carregamento de longa duração (efeito Rush). O modelo de cálculo utilizado, foi o estudado por Beber (2003), embasado em modelos internacionais. Para tanto, realizaram-se as devidas considerações:

- (i) até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- (ii) o encurtamento de ruptura do concreto é 3,5‰;
- (iii) o alongamento máximo permitido para armadura de tração é 10‰;
- (iv) é desprezada a resistência à tração do concreto;
- (v) existe aderência perfeita entre o aço e o concreto;
- (vi) existe aderência perfeita entre o reforço e a superfície do concreto.

Na Figura 5 são apresentadas a nomenclatura e a seção utilizadas, com adaptações na parte do reforço, em que foram consideradas barras, ao invés de manta.

Figura 5 - Diagrama de equilíbrio da seção reforçada



(fonte: BEBER, 2003, p. 57)

4.1 VERIFICAÇÃO DA LINHA NEUTRA

A definição da altura da linha neutra foi obtida pelo equilíbrio de forças da seção, como é determinado na Equação 1 a seguir.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_s + R_f = R_c + R_{s'} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$$R_s = \sigma_s A_s;$$

$$R_c = 0,8 b_w f_c x;$$

$$R_{s'} = \sigma'_s A'_s;$$

$$R_f = \sigma_f A_f$$

A partir do equilíbrio das forças faz-se as substituições necessárias e isola-se os fatores, obtendo-se, assim, a Equação 2 a seguir.

$$\sigma'_s A'_s + 0,8 b_w f_c x = \sigma_s A_s + \sigma_f A_f \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

σ'_s : tensão na armadura longitudinal comprimida;

σ_s : tensão na armadura longitudinal tracionada;

σ_f : tensão no reforço.

Para se obter o valor inicial de x , considerou-se que as tensões atuantes são as máximas suportadas pelos materiais. Ao isolar-se o x da equação anterior consegue-se chegar à expressão da linha neutra (Equação 3).

$$x = \frac{\sigma_s A_s + \sigma_f A_f - \sigma'_s A'_s}{0,8 b_w f_c} \quad (\text{Equação 3})$$

4.2 VERIFICAÇÃO DO DOMÍNIO DE DEFORMAÇÃO

Foi necessário um processo iterativo para o cálculo de σ_s , σ'_s , e σ_f , conforme é demonstrado na Figura 5. Para a obtenção do x inicial considerou-se as tensões dos materiais, $\sigma_s = 500$ MPa, $\sigma'_s = 500$ MPa, f_c = resistência média à compressão para as barras de fibra de vidro de

8 mm $\sigma_f = 1054,70 \text{ MPa}$, para as de 10 mm $\sigma_f = 1027,70 \text{ MPa}$ e para as de 12 mm $\sigma_f = 989 \text{ MPa}$, conforme especificação do fabricante. De posse do valor, compara-se x a x_{23} e x_{lim} , se $x < x_{23}$ a viga encontra-se no domínio 2, caso $x_{23} < x < x_{lim}$ a viga está no domínio 3. Se $x > x_{lim}$, a viga se encontra no domínio 4, não sendo recomendável, pois nessa configuração a ruína se dá pelo esmagamento do concreto. Nas Equações 4 a 6 a seguir é possível observar os valores de x_{23} e x_{lim} (Equações 4 a 6).

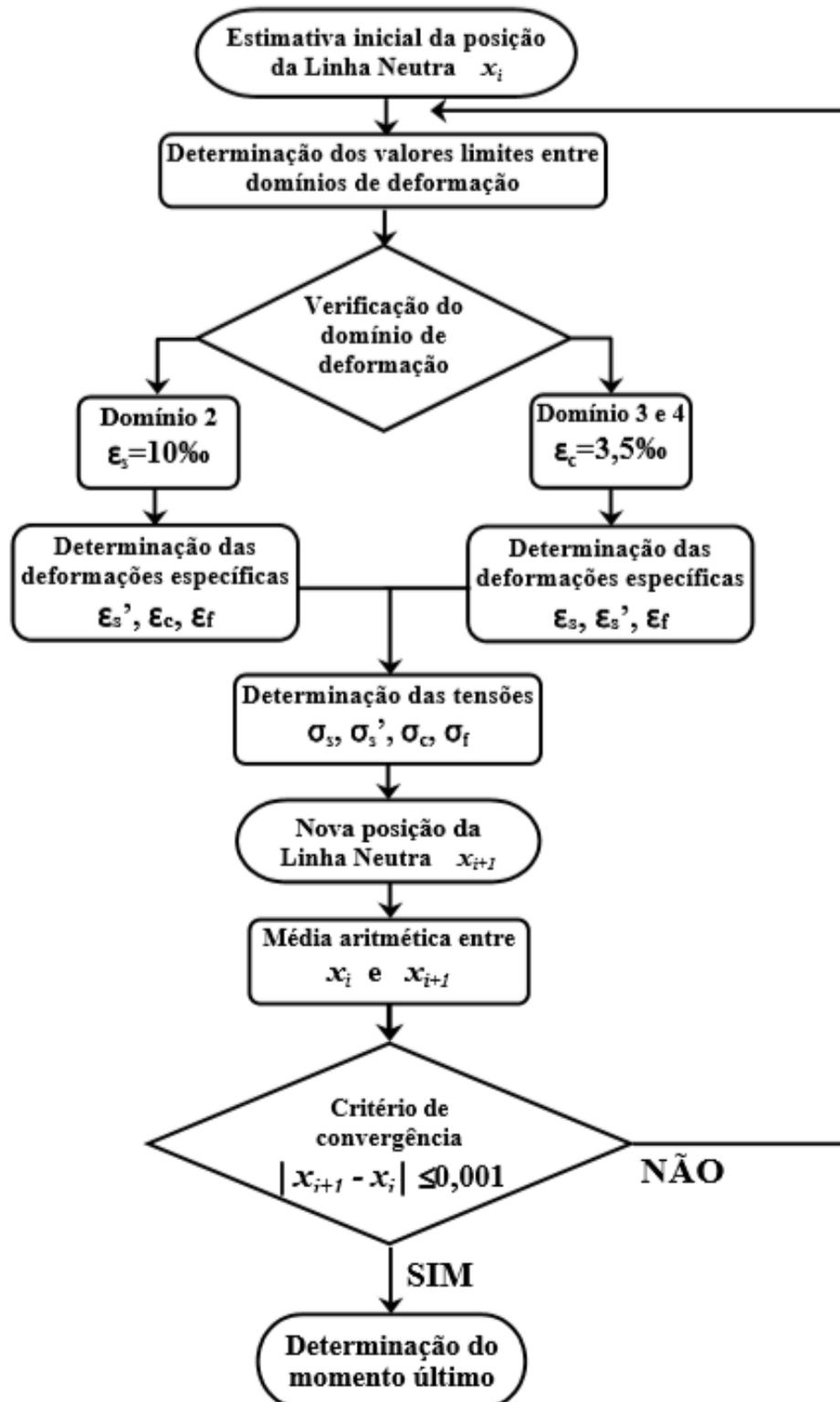
$$\text{Se } x < x_{23} = \frac{0,0035d}{0,0035+0,010}, \text{ então Domínio 2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\text{Se } x_{23} < x < x_{lim} = \frac{0,0035d}{0,0035+\varepsilon_y}, \text{ então Domínio 3} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{Se } x > x_{lim}, \text{ então Domínio 4} \quad (\text{Equação 6})$$

A seguir, na Figura 6, será apresentado o fluxograma sugerido por Beber (2003) para a determinação da capacidade resistente à flexão.

Figura 6 - Processo iterativo teórico



(fonte: Beber (2003), p.59)

Beber (2003) seguiu as recomendações da NBR 6118, em relação aos domínios de deformação, ou seja, nos casos em que a seção encontra-se no domínio 2, o valor de deformação específica para a armadura de tração é de ε_s de 10%. Para os domínios 3 e 4 a deformação específica no concreto ε_c é de 3,5%. A deformação específica no concreto ε_c , nas armaduras de aço ε'_s e ε_s e nas armaduras de reforço ε_f , de acordo com Beber (2003) são (Equações 7 a 10).

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \rightarrow \varepsilon_c = \left(\frac{x}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (\text{Equação 7})$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon'_s}{x - d'} \rightarrow \varepsilon'_s = \left(\frac{x - d'}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (\text{Equação 8})$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \rightarrow \varepsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) \varepsilon_c \quad (\text{Equação 9})$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon_f}{d_f - x} \rightarrow \varepsilon_f = \left(\frac{d_f - x}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

ε_s : deformação específica na armadura longitudinal de aço tracionada;

ε'_s : deformação específica na armadura longitudinal de aço comprimida;

ε_c : deformação específica no concreto;

ε_f : deformação específica na armadura longitudinal de reforço;

d : distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura de aço tracionada;

d' : distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura de aço comprimida;

d_f : distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura de reforço tracionada.

4.3 VERIFICAÇÃO QUANTO AOS MOMENTO ÚLTIMO E À CARGA ÚLTIMA

Após o cálculo da linha neutra, verifica-se o $M_{último}$ da seção transversal é obtido a partir do equilíbrio das forças na seção (Equação 11).

$$M_{último} = \sigma_s A_s + \sigma_f A_f d_f - 0,32 b_w \sigma_c (x)^2 - \sigma_{s'} A_{s'} d' \quad (\text{Equação 11})$$

A carga máxima (Equação 12) suportada foi obtida a partir dos valores de $M_{último}$ para as condições viga testemunho VT e vigas reforçadas mais a ação do peso próprio, que variou para a viga testemunho em relação às vigas reforçadas.

$$M_{último} = \frac{Pl}{6} + \frac{ql^2}{8} \rightarrow P = \frac{6}{l} \left(M_{último} - \frac{ql^2}{8} \right) \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

l : é o vão livre da viga;

q : peso-próprio da viga.

No Apêndice E.2 são apresentados os valores teóricos de carga última, encontrados com base no roteiro de cálculo elucidado, para cada configuração de viga. Q_{viga} representa o peso-próprio da viga de concreto armado, $Q_{reforço}$ representa o peso-próprio da argamassa estrutural e $Q_{viga+reforço}$ representa o peso-próprio da viga reforçada, considerando Q_{viga} e $Q_{reforço}$.

4.4 VERIFICAÇÃO QUANTO AO CISALHAMENTO

A verificação em relação à solicitação de cisalhamento dos estribos seguiu os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014), seguindo o Modelo I, que admite $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal e a parcela V_c com valor constante igual a zero.

De acordo do Bessa (2015), as etapas de verificação consistem em:

- (i) Verificação do não esmagamento do concreto para as diagonais comprimidas da treliça que se formam em seu interior;
- (ii) Determinação da área de aço do estribo necessária para absorver as solicitações de tração que surgem na treliça, surgidas a partir da solicitação cisalhante.

A resistência da peça deve atender à condição:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{(Equação 13)}$$

Sendo,

V_{Sd} : a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} : a força resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.

A verificação da compressão diagonal do concreto é realizada por intermédio das equações tal a seguir:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad \text{(Equação 14)}$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad \text{(Equação 15)}$$

A armadura transversal é verificada a partir das Equações 16 a 20:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad \text{(Equação 16)}$$

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \left(\frac{V_{Sd} - V_c}{0,9 d f_{ywd}}\right) \quad \text{(Equação 17)}$$

$$V_c = V_{c0} = 0,6f_{ctk}b_wd \quad \text{(Equação 18)}$$

$$f_{ctk} = 0,7f_{ctm} \quad \text{(Equação 19)}$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{(2/3)}, \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (\text{Equação 20})$$

Sendo:

s : espaçamento entre os elementos da armadura transversal A_{sw} em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural;

f_{ywd} : tensão na armadura transversal passiva, limitada ao valor f_y no caso de estribos, não se tomando valores acima de 435 MPa;

V_{sd} : a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} : a força resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} : força resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_c : parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça;

V_{sw} : parcela de força cortante resistida pela armadura transversal (estribos);

f_{ctk} : resistência característica do concreto à tração.

Os valores mínimos foram calculados em conformidade à NBR 6118 (ABNT, 2014) e adotados para as vigas, conforme está representado nas Equações 21 a 23:

$$\frac{A_{sw,min}}{s} = 0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}} b_w \times 100 \rightarrow 0,06 \frac{f_{ck}^{(2/3)}}{f_{ywk}} b_w \times 100 \quad (\text{Equação 21})$$

$$V_d \leq 0,67 V_{Rd2} \rightarrow s_{m\acute{a}x} = 0,6d \text{ ou } 30cm \quad (\text{Equação 22})$$

$$V_d > 0,67 V_{Rd2} \rightarrow s_{m\acute{a}x} = 0,3d \text{ ou } 20cm \quad (\text{Equação 23})$$

4.5 VERIFICAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM

De acordo com a NBR 6118 (ABNT,2014), as barras das armaduras devem ser ancoradas para que exista a transferência adequada dos esforços para o concreto. Sendo assim, o comprimento de ancoragem é definido pela Equação 24 a seguir.

$$l_b = \frac{\emptyset f_{yk}}{4 f_{bd}} \geq 25\emptyset \quad (\text{Equação 24})$$

Sendo:

\emptyset : diâmetro da barra (cm);

f_{bd} : resistência de aderência (kN/cm²).

A resistência de aderência depende do coeficiente de conformação superficial η_1 , que para barras nervuradas (CA-50) é igual a 2,25; do coeficiente η_2 que depende da posição da barra durante a concretagem, sendo igual a 1,0 para boa aderência; e do coeficiente η_3 que depende do diâmetro da barra, sendo igual a 1,0 para diâmetros que sejam menores a 32mm, a resistência característica do concreto à tração foi calculada nas Equação 19 e 20. A resistência de aderência é obtida a partir da Equação 25.

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctk} \quad (\text{Equação 25})$$

O comprimento de ancoragem básico pode ser reduzido, quando a armadura que efetivamente existe no elemento $A_{s,ef}$ é maior que a armadura necessária para resistir à força de tração na zona de ancoragem $A_{s,cal}$, ou fazendo-se a utilização de ganchos. O comprimento de ancoragem necessário, pode ser determinado pelas Equações 26 a 29 a seguir.

$$l_{b,nec} = \alpha l_b \frac{A_{s,cal}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,mín}, \text{ com } l_{b,mín} \text{ sendo o maior valor} \quad (\text{Equação 26})$$

entre $0,3l_b 10\emptyset$ e 10cm

$$A_{s,cal} = \frac{R_{st}}{f_{yk}} \quad (\text{Equação 27})$$

$$R_{st} = V_{Sd} \frac{a_1}{d} \geq 0,5V_{Sd} \quad (\text{Equação 28})$$

$$a_1 = \left(\frac{V_{sd}}{2(V_{sd} - V_c)} \right) d \rightarrow 0,5d < a_1 < d \quad (\text{Equação 29})$$

Sendo:

α : 0,7 para barras tracionadas com gancho;

$A_{s,ef}$: área efetivamente existente da armadura longitudinal tracionada (cm²);

V_c : parcela complementar, calculada pela equação tal (kN).

Obteve-se um comprimento de ancoragem necessário de 2,44 cm sendo menor que o comprimento de ancoragem mínimo de 10 cm, recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Sendo assim, este foi o valor adotado para as vigas.

4.6 AVALIAÇÃO DA FLECHA IMEDIATA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), os Estados Limites de Serviço (ELS) são caracterizados pelo fato das estruturas atuarem parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. O momento de fissuração, calculado pelas Equações 30 e 31, define a divisão entre esses comportamentos. A partir do valor do momento de fissuração, pode-se calcular a carga de fissuração utilizando a Equação 12.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ctm} I_c}{y_t} \quad (\text{Equação 30})$$

$$I_c = \frac{bh^3}{12} \quad \text{para seções retangulares} \quad (\text{Equação 31})$$

Onde:

α : 1,5 para seções retangulares;

f_{ctm} : resistência média à tração do concreto, calculada pela equação 20 (kN/cm²);

y_t : distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada (cm);

h : altura da seção transversal (cm).

Para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, utiliza-se a equação 32, onde se calcula a rigidez equivalente.

$$EI_{eq,t0} = E_{CS} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_C + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{CS} I_C \quad (\text{Equação 32})$$

Onde:

E_{CS} : módulo de elasticidade secante do concreto (kN/cm²);

M_r : momento de fissuração do elemento estrutural, calculado pela equação 30 (kN.cm);

M_a : momento fletor na seção crítica do vão considerado, calculado pela equação 11 (kN.cm);

I_C : momento de inércia da seção bruta de concreto, calculado pela equação 31 (cm⁴);

I_{II} : momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha_e = E_s/E_{CS}$ (cm⁴).

O módulo de elasticidade secante do concreto pode ser calculado pelas Equações 33 a 35.

$$E_{CS} = \alpha_i E_{ci} \quad (\text{Equação 33})$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (\text{Equação 34})$$

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Para C20 a C50} \quad (\text{Equação 35})$$

Onde:

α_E : 1,2 para basalto e diabásio.

Para a determinação do momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, deve-se, primeiramente, calcular a posição da linha neutra no estágio II pela Equação 36, ignorando o valor negativo; e, em seguida, calcular o momento de inércia pela Equação 37.

$$\frac{b}{2} x_{II}^2 + (\alpha_e - 1) [As' (x_{II} - d')] - \alpha_e A_s (d - x_{II}) = 0 \quad (\text{Equação 36})$$

$$I_{II} = \frac{b}{3} x_{II}^3 + (\alpha_e - 1) [As' (x_{II} - d')^2] - \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 \quad (\text{Equação 37})$$

A partir do valor da rigidez equivalente, pode-se determinar a flecha imediata pela Equação 38.

$$f_{t=0} = \beta \frac{ML^2}{(EI)_{eq,t0}} \quad (\text{Equação 38})$$

Onde: β : 5/48 para vigas biapoiadas com carga distribuída e $(1/8) - (1/6).(a/L)^2$ para vigas biapoiadas com duas cargas concentradas de mesma distância “a” do apoio mais próximo;

M: momento fletor devido à carga atuante (kN.cm).

5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Por apresentar um comportamento não-linear, a análise estrutural que melhor representa o comportamento de elementos de concreto armado, é o Método dos Elementos Finitos. Sendo assim, utilizou-se para a elaboração desse trabalho, um modelo numérico aplicado ao *software* ANSYS,

5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos surgiu com o intuito de realizar análise em estrutura com formas complexas, dividindo-as em várias partes menos complexas. Com partes menores é possível criar nós que, ao serem conectados por linhas, criem uma malha de elementos. De acordo com Soriano e Lima (2003), as reações nos apoios, as deformações e os esforços internos são obtidos por meio do cálculo dos deslocamentos nodais.

5.2 ANSYS

Para a simulação numérica foi utilizado o programa ANSYS (Analysis Systems Incorporated), versão 18.2 estudante. Esse *software* possibilita a realização de análises estáticas, dinâmicas, tanto de sólidos quanto de fluidos de materiais que podem apresentar comportamento elástico, plástico, viscoso ou a combinação desses comportamentos.

O ANSYS apresenta duas interfaces: o sistema *workbench*, com interface gráfica menos complexa e de fácil manuseio; e o sistema APDL (*Ansys Parametric Design Language*), que apesar de apresentar uma interface gráfica mais complexa, fornece maior domínio, por parte do programador, sobre a simulação numérica, sendo esse o principal motivo para a escolha dessa interface.

A seguir serão abordadas as propriedades dos elementos finitos adotados para representar as vigas em concreto armado testemunho e reforçadas com barras de fibra de vidro. Para a modelagem do concreto armado e da argamassa estrutural empregou-se o elemento SOLID65, para as armaduras de aço e de fibra de vidro o elemento LINK180, já para os apoios e pontos de aplicação de aplicação de carga, o elemento SOLID185.

5.3 MODELAGEM DO CONCRETO E ARGAMASSA ESTRUTURAL

Para a modelagem do concreto e da argamassa estrutural escolheu-se o elemento SOLID65. A seguir serão elucidadas as descrições deste elemento, bem como os modelos de comportamento que caracterizam o material.

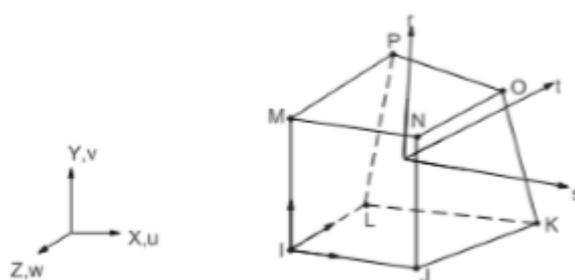
5.3.1 SOLID 65

Composto por oito nós e três graus de liberdade em cada nó (Figura 6), é o elemento indicado para simular a ruptura de materiais frágeis em modelagem tridimensional de estruturas de concreto, ou de materiais que possuem características parecidas com as do concreto, como é o caso da argamassa estrutural.

Este elemento simula a fissuração, quando a estrutura se encontra submetida a uma solicitação de tração, assim como o esmagamento do concreto, quando esse se encontra submetido a uma solicitação de compressão. Simula, também, as deformações por fluência e as deformações plásticas.

Adotaram-se quatro modelos para a representação do comportamento do concreto e da argamassa estrutural. O *Linear Isotropic, Multi-Linear Elastic (MELAS), Concrete e Density*.

Figura 7 - Geometria do elemento SOLID 65



(fonte: ANSYS, 2019)

5.3.1.1 Modelo Linear Isotropic

Este modelo é utilizado para representar materiais elástico-lineares, sendo imperativo determinar duas variáveis para simular seu comportamento: o módulo de elasticidade do material, definido pela Equação 39, conforme o Código Modelo *FIB* 2010 (2012), e o coeficiente de Poisson, para o qual se utilizou o valor de 0,2.

$$E_{ci} = E_{c0} * \alpha_E * f_{cm}^{1/3} \quad (\text{Equação 39})$$

Onde:

E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto (kN/cm²);

E_{c0} : 2150 kN/cm²;

α_E : adotado 1,2 para agregado tipo basalto;

f_{cm} : resistência média a compressão do concreto (kN/cm²).

5.3.1.2 Modelo Multilinear Elástico (MELAS)

O Modelo utiliza uma análise numérica elástica não-linear para simular o comportamento do concreto e da argamassa à compressão uniaxial e reproduzir sua plastificação, e consequente perda de sua capacidade resistiva, após exceder sua resistência limite.

A modelagem da curva tensão-deformação é feita com a entrada dos valores referentes a tensão-deformação em acordo ao código modelo *FIB* 2010 (2012), conforme as Equações 40 a 42 e representada na Figura 8.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left(\frac{\kappa \cdot \eta - \eta^2}{1 + (\kappa - 2) \cdot \eta} \right) \text{ para } |\varepsilon_y| < |\varepsilon_{c,lim}| \quad (\text{Equação 40})$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (\text{Equação 41})$$

$$\kappa = \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \quad (\text{Equação 42})$$

Onde:

f_{cm} : resistência média à compressão (kN/cm²);

κ : número plástico;

ε_c : deformação de compressão;

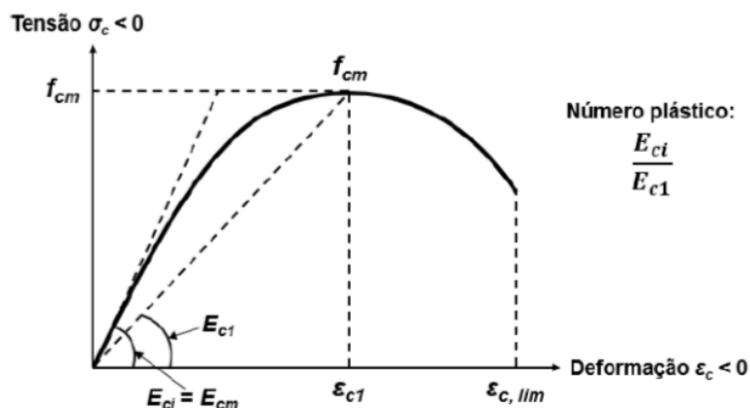
ε_{c1} : deformação na máxima tensão de compressão;

$\varepsilon_{c,lim}$: deformação última de compressão;

E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto (kN/cm²);

E_{c1} : módulo secante da origem do pico de tensão de compressão (kN/cm²).

Figura 8 - Diagrama tensão-deformação do concreto comprimido



(fonte: Código Modelo FIB 2010,2012)

Os valores apresentados na Tabela 2(a) foram obtidos interpolando-se linearmente os valores fornecidos pelo Código Modelo FIB 2010 (2012) contidos nas Tabelas 2(b) e 2(c). Nas Tabelas 3 a 6 são apresentados os valores da curva tensão x deformação obtidos conforme Código Modelo.

Tabela 2 (a) - Valores das propriedades para o concreto C40 e argamassas C62,7 C63 e C71,35

CONCRETO	f_{ck} (kN/cm ²)	E_{ci} (kN/cm ²)	E_{c1} (kN/cm ²)	ε_{c1} (‰)	$\varepsilon_{c,lim}$ (‰)	κ
C40	4,00	3630	2000	-2,40	-3,50	1,820
ARGAMASSA						
C62,7	6,27	4121,3	2692,3	-2,70	-3,27	1,528
C63	6,30	4127	2701	-2,70	-3,27	1,526
C71,35	7,14	4285,2	2925	-2,714	-3,186	1,462

(fonte: Código Modelo FIB 2010,2012)

Tabela 2 (b) - Valores dos coeficientes para concretos C12 a C50

CONCRETO	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{ck} (kN/cm ²)	1,2	1,6	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
E_{ci} (kN/cm ²)	2710	2880	3030	3200	3360	3500	3630	3750	3860
E_{c1} (kN/cm ²)	1110	1220	1330	1490	1650	1820	2000	2160	2320
ε_{c1} (‰)	-1,9	-2	-2,1	-2,2	-2,3	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6
$\varepsilon_{c,lim}$ (‰)	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,4
κ	2,44	2,36	2,28	2,15	2,04	1,92	1,82	1,74	1,66

(fonte: Código Modelo FIB 2010,2012)

Tabela 2 (c) – Valores dos coeficientes para concretos C55 a C120

CONCRETO	C55	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
f_{ck} (kN/cm ²)	5,5	6	7	8	9	10	11	12
E_{ci} (kN/cm ²)	3970	4070	4260	4440	4600	4750	4890	5030
E_{c1} (kN/cm ²)	2470	2620	2890	3140	3380	3600	3930	4270
ϵ_{c1} (%)	-2,6	-2,7	-2,7	-2,8	-2,9	-3	-3	-3
$\epsilon_{c,lim}$ (%)	-3,4	-3,3	-3,2	-3,1	-3	-3	-3	-3
k	1,61	1,55	1,47	1,41	1,36	1,32	1,24	1,18

(fonte: Código Modelo FIB 2010,2012)

Tabela 3 - Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial do concreto conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012)

σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c
0,314	0,0001	3,226	0,0013	4,196	0,0025
0,618	0,0002	3,389	0,0014	4,168	0,0026
0,911	0,0003	3,538	0,0015	4,122	0,0027
1,194	0,0004	3,674	0,0016	4,057	0,0028
1,467	0,0005	3,795	0,0017	3,971	0,0029
1,728	0,0006	3,901	0,0018	3,865	0,003
1,978	0,0007	3,992	0,0019	3,738	0,0031
2,217	0,0008	4,067	0,002	3,590	0,0032
2,443	0,0009	4,127	0,0021	3,419	0,0033
2,658	0,001	4,170	0,0022	3,225	0,0034
2,860	0,0011	4,196	0,0023	3,007	0,0035
3,049	0,0012	4,205	0,0024		

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 4 - Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C62,7 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012)

σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c
0,353	0,0001	4,090	0,0013	6,210	0,0025
0,700	0,0002	4,347	0,0014	6,256	0,0026
1,042	0,0003	4,593	0,0015	6,271	0,0027
1,379	0,0004	4,827	0,0016	6,254	0,0028
1,709	0,0005	5,048	0,0017	6,202	0,0029
2,033	0,0006	5,255	0,0018	6,109	0,003
2,351	0,0007	5,447	0,0019	5,971	0,0031
2,661	0,0008	5,623	0,002	5,784	0,0032
2,964	0,0009	5,782	0,0021	5,540	0,0033
3,259	0,001	5,922	0,0022	5,233	0,0034
3,545	0,0011	6,041	0,0023	4,855	0,0035
3,822	0,0012	6,138	0,0024		

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 5 - Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C63 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012)

σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c
0,354	0,0001	4,111	0,0013	6,247	0,0025
0,703	0,0002	4,369	0,0014	6,292	0,0026
1,047	0,0003	4,617	0,0015	6,308	0,0027
1,385	0,0004	4,852	0,0016	6,291	0,0028
1,717	0,0005	5,075	0,0017	6,238	0,0029
2,043	0,0006	5,284	0,0018	6,144	0,003
2,362	0,0007	5,477	0,0019	6,005	0,0031
2,674	0,0008	5,655	0,002	5,815	0,0032
2,979	0,0009	5,815	0,0021	5,568	0,0033
3,275	0,001	5,956	0,0022	5,256	0,0034
3,563	0,0011	6,076	0,0023	4,872	0,0035
3,842	0,0012	6,174	0,0024		

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 6 - Valores da curva tensão-deformação de compressão uniaxial da argamassa C71,3 conforme o Código Modelo FIB 2010 (2012)

σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c	σ_c (kN/cm ²)	ϵ_c
0,382	0,0001	4,525	0,0013	7,047	0,0025
0,760	0,0002	4,819	0,0014	7,109	0,0026
1,133	0,0003	5,102	0,0015	7,134	0,0027
1,501	0,0004	5,374	0,0016	7,119	0,0028
1,864	0,0005	5,632	0,0017	7,056	0,0029
2,221	0,0006	5,876	0,0018	6,939	0,003
2,572	0,0007	6,105	0,0019	6,760	0,0031
2,917	0,0008	6,316	0,002	6,508	0,0032
3,255	0,0009	6,509	0,0021	6,172	0,0033
3,585	0,001	6,681	0,0022	5,734	0,0034
3,907	0,0011	6,829	0,0023	5,177	0,0035
4,221	0,0012	6,952	0,0024		

(fonte: elaborada pela autora)

5.3.1.3 Modelo Concrete

O modelo se baseia no critério de ruptura de Willam & Warnke para representar o concreto à tração. Para tanto, é necessário a definição de alguns parâmetros que controlam a superfície de ruptura.

- a) coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta;

- b) coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada;
- c) resistência última uniaxial à tração;
- d) resistência última uniaxial à compressão;
- e) resistência última biaxial à compressão;
- f) coeficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração.

De acordo com Kunzler (2013), a transferência de cisalhamento é definida por meio dos coeficientes 0,2 para fissuras abertas e 0,4 para fissuras fechadas. A resistência última à tração foi definida em acordo ao Código Modelo FIB 2010, conforme consta nas Equações 43 e 44.

$$f_t = 0,03 * (10 * f_{ck})^{2/3} \quad \text{(Equação 43)}$$

$$f_{ck} = f_{cm} - (1,65 * \sigma) \quad \text{(Equação 44)}$$

Sendo,

f_t : resistência à tração do concreto (kN/cm²);

f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias (kN/cm²);

f_{cm} : a resistência média à compressão;

σ : desvio-padrão da resistência à compressão das amostras.

Ao início do rompimento do concreto, é possível que ocorram problemas de convergência entre os modelos escolhidos. Sendo assim, aplica-se o valor -1 para desativar o limite à compressão do concreto. Todavia, caso não sejam utilizados outros modelos, é possível utilizar valores pré-estabelecidos pelo programa, permitindo, assim, que o usuário escolha outras formas de análise.

5.3.1.4 Massa Específica do Concreto

Adotou-se para representação da massa específica do concreto armado e argamassa estrutural o modelo *Density*, cujo valor é 2,54e-8 t/cm³. Adotou-se para a aceleração da gravidade o valor de 981 cm/s² para a definição do peso específico do concreto, encontrando-se o valor de

25e-6 kN/cm³. Para massa específica da argamassa estrutural, adotou-se o valor de 2,15e-8 t/cm³ fornecido pela fabricante.

5.4 MODELAGEM DA ARMADURA

Tanto as barras de aço, quanto as barras de fibra de vidro, são empregadas para resistir os esforços axiais. Sendo assim, para descrever seu comportamento, é necessário apenas um modelo uniaxial.

De acordo com Lazzari, 2015 as barras podem ser modeladas de três formas: discreta, incorporada e distribuída. A forma discreta representa as armaduras por elementos unidimensionais e parte do pressuposto que os nós dos elementos das armaduras estejam sobrepostos aos nós dos elementos de concreto, o que limita à malha dos elementos de concreto a distribuição das barras. A forma incorporada caracteriza a armadura como um material rígido no interior do elemento de concreto, o que possibilita a inserção da armadura em qualquer local da malha. A forma distribuída, adotada para representar as armaduras de aço e fibra de vidro, considera o concreto armado de forma uniforme dentro de cada elemento finito, sendo apropriado para modelos de grande escala.

5.4.1 LINK 180

Na modelagem das armaduras longitudinais de aço e fibra de vidro, bem como nos estribos de aço, empregou-se o elemento LINK180 (Figura 9), que possui uma única dimensão e é composto por dois nós com três graus de liberdade em cada nó. Este elemento considera aderência perfeita entre os elementos de aço e de concreto.

Figura 9 - Geometria do elemento LINK180



(fonte: ANSYS, 2019)

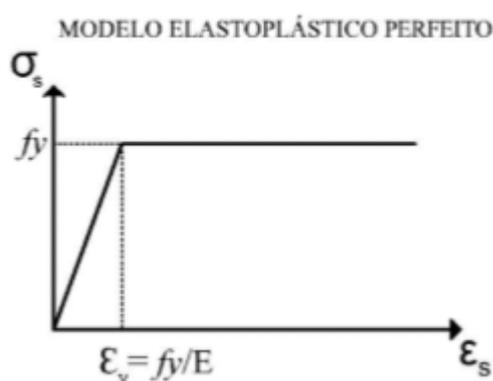
Utilizou-se dois parâmetros de comportamento para representar as armaduras: o *Linear Isotropic* e *Bilinear*. O modelo Linear Isotropic já foi abordado anteriormente na

representação do concreto, fazendo-se necessário definir duas variáveis: o coeficiente de Poisson, adotado 0,3 para as barras de aço e 0,26 para as barras de fibra de vidro, e o módulo de elasticidade do material.

5.4.1.1 Modelo Bilinear (BISO)

O modelo (*Bilinear Isotropic Hardening*), denominado BISO, é um modelo de análise elastoplástica com endurecimento linear. A representação das armaduras de aço e de fibra de vidro foi realizada por meio do modelo elastoplástico perfeito, conforme podemos ver na Figura 10. As barras de fibra de vidro possuem comportamento elástico-linear até atingirem sua ruptura brusca, a uma tensão de escoamento mais elevada que o aço. Por não terem alcançado o patamar de escoamento durante os ensaios e nem nas verificações numéricas, adotou-se o modelo BISO para representar as armaduras de fibra de vidro.

Figura 10 - Modelos elastoplástico perfeito

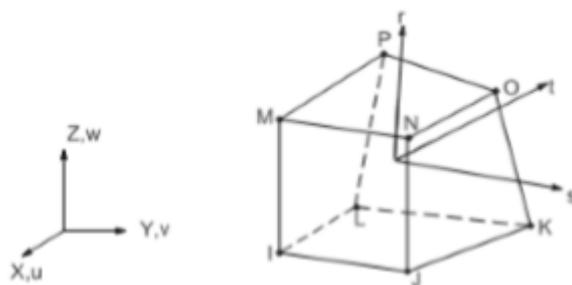


(fonte: elaborado pela autora)

5.5 MODELO DO PONTO DE APLICAÇÃO DAS CARGAS E APOIOS

Utilizou-se para a modelagem dos apoios e pontos de aplicação de carga o elemento SOLID185 (Figura 11). Composto por oito nós, três graus de liberdade em cada nó, simula deformações praticamente incompressíveis, reproduzindo as estruturas acima citadas sem modificar os resultados em análise, representando, de forma fiel, o modelo experimental.

Figura 11 - Geometria do elemento SOLID 185



(fonte: ANSYS, 2019)

Adotou-se apenas o modelo Linear Isotropic como parâmetro de comportamento dos elementos e definiu-se duas variáveis: o coeficiente de Poisson, adotado como 0,2 e o Módulo de Elasticidade do material, $E_{ci} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ - valor extremamente alto, evitando que o material influencie nas simulações.

5.5 ENTRADA DE DADOS NO ANSYS

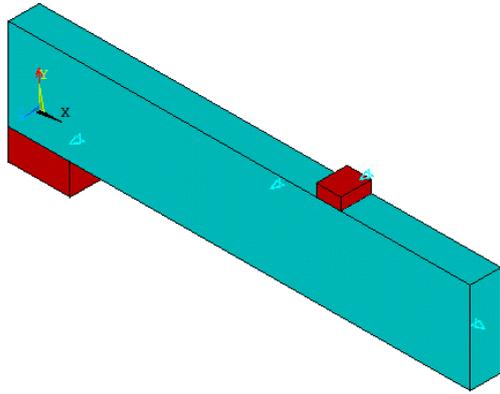
A inserção dos dados e dos comandos é realizada em formato (.txt). Sendo feito o lançamento da estrutura, quanto os carregamento e condições de contorno, baseados nos estudos de Koch (2017) acerca das vigas de Leonhardt e Walther (1962). Empregou-se uma malha de elementos finitos cúbicos, com dimensão de 1 cm^3 , para a modelagem das vigas, totalizando elementos para representação. Para a modelagem das vigas foi utilizada uma malha de elementos finitos cúbicos com dimensões de 1 cm^3 , sendo necessários 6207 elementos finitos para a representação da viga testemunho e 6871 elementos finitos para as vigas reforçadas.

Visto que existe simetria na geometria e no carregamento da viga, buscou-se reduzir o esforço computacional representando-se apenas um quarto da estrutura para simulação.

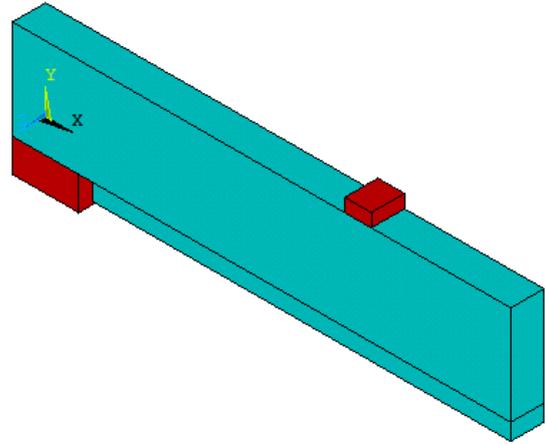
Restringiram-se os deslocamentos na direção X e Z, das regiões de descontinuidade, além de restringir o deslocamento em Y nos nós do centro do apoio, como se vê na Figura 12(a) e 12(b).

O carregamento foi realizado em duas etapas. Começou-se com a deformação instantânea em função do peso próprio, modelada pelo Density juntamente com a aceleração da gravidade e, posteriormente, foram realizados uma série de incrementos de deslocamento, que simularam a ação das cargas pontuais, reproduzindo o ensaio experimental até a ruptura da viga.

Figura 12 - (a) Volume de concreto da viga VT e (b) Volume de concreto das vigas reforçadas



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

6 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Serão apresentadas a seguir informações referentes a todos os materiais utilizados para execução das vigas testemunhos e vigas reforçadas. A exceção das barras de fibra de vidro, todos os demais materiais foram obtidos por doação por parte dos professores do laboratório LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) e da empresa ArcelorMittal.

6.1 MATERIAIS

Na seção a seguir serão apresentados todos os materiais utilizados para a execução das vigas estudadas.

6.1.1 Cimento

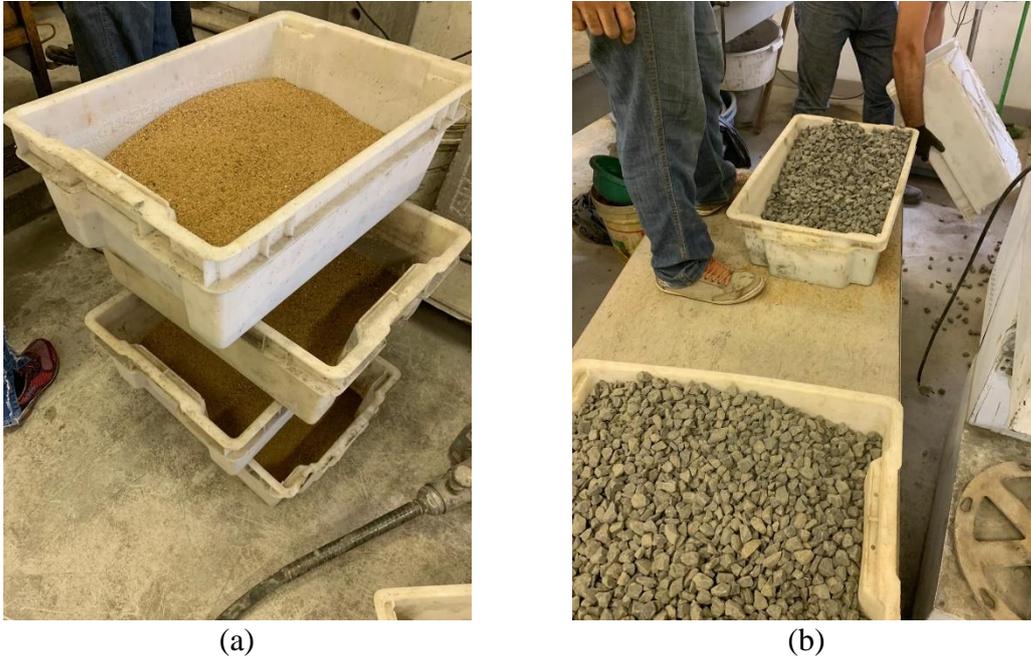
O cimento utilizado para a preparação das vigas foi o cimento Portland CP V-ARI de alta resistência inicial. Adotou-se esse aglomerante, para que o concreto alcançasse uma resistência inicial à compressão elevada, e a condição de resistência mínima de 35 MPa fosse alcançada nas primeiras idades.

Caso não fosse atingida tal resistência mínima, o traço deveria sofrer variações da relação água/cimento, que satisfizessem as condições necessárias para evitar o esmagamento do concreto no momento do teste.

6.1.2 Agregado miúdo e agregado graúdo

O agregado miúdo utilizado para o concreto foi areia, de granulometria média, vinda do rio Jacuí, com dimensões maiores que 4,5 mm e menores que 5 mm. O agregado graúdo utilizado foi a brita 1 de basalto, com diâmetro máximo característico de 19 mm, advindo da região metropolitana de Porto Alegre/RS, como mostra a Figura 13(a) e 13(b) e Quadros 4 e 5 respectivamente .

Figura 13 - (a) Areia média; (b) Brita 1, respectivamente, utilizadas no concreto



(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 4 - Caracterização física do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	% Retido	% Retido Acumulado
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	4	4
1,18	10	14
0,6	30	44
0,3	45	89
0,15	0	89
<0,15	11	100
Diâmetro máximo característico = 2,36		
Módulo de finura = 2,40		
Massa específica = 2,63 g/cm³		

(fonte: ALMEIDA, 2017)

Quadro 5 - Caracterização física do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	% Retido	% Retido Acumulado
25	0	0
19	5	5
12,5	75	80
9,5	19	99
6,3	1	100
<6,3	0	100
Diâmetro máximo característico = 19		
Módulo de finura = 7,04		
Massa específica = 2,90 g/cm³		

(fonte: ALMEIDA, 2017)

6.1.3 Armaduras de aço

As armaduras de aço utilizadas nas vigas foram verificadas para atingirem o estado limite último por deformação plástica excessiva das barras, não sendo verificada a ruptura do concreto na zona comprimida: domínio dois de deformação. Ao fixar esse domínio para o aço, é possível realizar nova verificação para que as armaduras de reforço de fibra de vidro atinjam o estado limite último no domínio três. De acordo com Beber (2003), a aplicação do reforço gera o rompimento das vigas no domínio três, dado que as tensões de tração das barras de aço e do reforço são somadas.

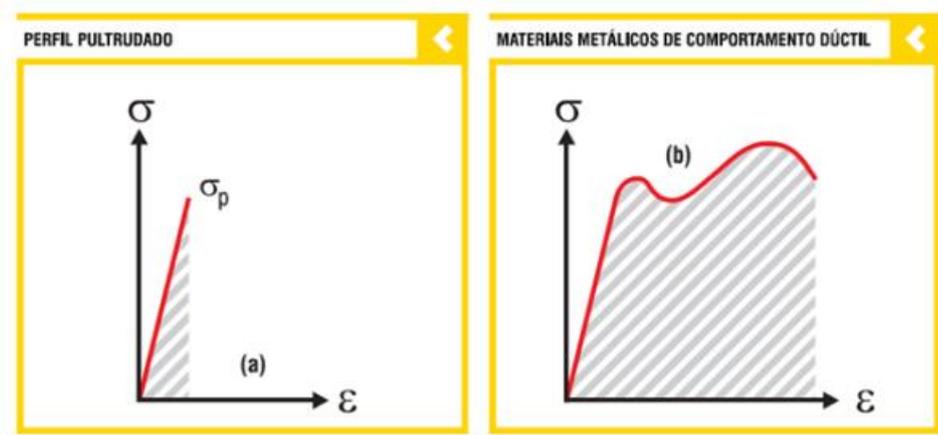
6.1.4 Barras de fibra de vidro

As barras de fibra de vidro da Stratus são materiais compósitos álcali resistentes formados pela combinação de uma matriz, no caso a resina epóxi éster vinílica, com alta resistência a ambientes ácidos e alcalinos, em conjunto a fibras de vidro. A fabricação se baseia no processo de pultrusão com ranhuras helicoidais na superfície, que proporcionam boa aderência ao concreto. Elementos como estribos e dobras em armaduras são produzidos de forma manual, sem polimerizar a resina e com fibras pré-impregnadas, o que permite a maleabilidade do material para colocação em um gabarito de dobra; esta peça, então, é conduzida a uma câmara de cura onde permanece até o processo ser completado.

O desempenho mecânico das barras de fibra de vidro sobressaem-se ao das barras de aço, principalmente em função da elevada resistência à tração. Para as barras de fibra de vidro existe uma deformação máxima de 3%. Após ultrapassar esse valor, o material apresenta

deformação plástica, sendo o alongamento máximo de 1 mm¹, com seu posterior rompimento. O coeficiente de Poisson das barras, segundo o fabricante, é de $\nu=0,26$. A Figura 14 apresenta os gráficos tensão x deformação para materiais frágeis e materiais dúcteis.

Figura 14 - Comparação curva tensão x deformação entre materiais frágeis e materiais dúcteis



(fonte: Manual Técnico Stratus, 2015)

As propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro podem ser verificadas nas Figuras 15 e 16 serão apresentadas algumas das principais propriedades mecânicas das barras de acordo com os dados fornecidos pela fabricante. Os valores adotados para o estudo desse trabalho foram obtidos por interpolação linear. Para as barras com diâmetro de 8 mm, a tensão nominal de tração adotada foi 1054,67 MPa, para as barras de 10 mm a tensão de 1027,67 MPa e para as barras de 12 mm 989 MPa.

Figura 15 – Propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro

REBAR STRATUS - Propriedades Mecânicas

Propriedades	Un.	Diâmetros padrões (mm)*							
		ø6	ø9	ø12	ø14	ø18	ø20	ø25	ø32
Tensão nominal de Tração	Mpa	1070	1047	989	953	903	876	831	727
Força de tração	Kgf	2500	5500	9300	12200	19100	22900	34000	42900
Coefficiente de Poisson		0,25	0,21	0,26	0,25	0,25	0,25	0,28	0,26
Módulo de elasticidade	Gpa	48	48	48	48	47	47	46	46
Tensão nominal de compressão	Mpa	553	541	494	483	514	516	505	493
Alongamento	%	2,12	2,11	2,05	2,03	2,08	2,1	2,07	2,15
Tensão nominal de cisalhamento	Mpa	210	210	210	210	204	204	200	200
Coefficiente longitudinal de dilatação	10 ⁻⁵ /°C	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	6	6
Coefficiente transversal de dilatação	10 ⁻⁵ /°C	27,3	27,3	28,7	29,3	27,9	26	23,2	22,1
Absorção de umidade	%	0,65	0,515	0,43	0,39	0,31	0,27	0,17	0,14

* Diâmetros especiais podem ser fabricados, sob consulta.

(fonte: Manual Técnico Stratus, 2015)

¹ Valor obtido em ensaio, pela fabricante Stratus, em barras de 40 cm de fibra de vidro e diâmetro 6,2mm.

verificou-se que a viga testemunho apresentaria ruptura no domínio 2, as vigas reforçadas com barras de 8 mm e 10 mm, no domínio 3 e as vigas reforçadas com barras de 12 mm no domínio 4. As tabelas de verificação das armaduras podem ser observadas no Apêndice E.1 e E.2.

6.1.5 Manta de fibra de vidro

As mantas de fibra de vidro foram utilizadas para realizar a ancoragem das armaduras de fibra de vidro na argamassa estrutural e promover a transferência dos esforços para esta. Por se tratar de um material do laboratório adquirido há algum tempo, não foram encontradas informações acerca das especificações técnicas do material.

6.1.6 Primer

Antes da aplicação da resina e da fibra de vidro, utilizou-se, na região em que foi aplicada a manta, uma camada de resina epóxi bi componente para impregnação. A finalidade desse primer é preparar a superfície impregnando-a, como também possibilitar uma melhor aderência da resina. O *primer* utilizado foi o S&P RESIN 50 PRIMER. De acordo com o fabricante, o rendimento é de 150 g/m² e proporção 2:1 (primer:endurecedor). As propriedades dos materiais encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades do Primer RESIN 50

CARACTERÍSTICAS PRIMER		
	COMPONENTE A	COMPONENTE B
VISCOSIDADE A 25°C (cPS)	1.000 a 1.500	200 a 600
PESO ESPECÍFICO A 25°C (g/cm ³)	1,12 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02
COR	TRANSPARENTE	AMARELO ESCURO
ASPECTO FÍSICO	LÍQUIDO VISCOSO	LÍQUIDO

(fonte: S&P, 2018)

6.1.7 Resina Epóxi

Para efetuar a colagem da manta de fibra de vidro utilizou-se a resina epóxi bi componente para laminação de compósitos S&P RESIN 55 LAMINAÇÃO, com rendimento de 600 g/m² e proporção 2:1 (resina:endurecedor). As propriedades do material pode ser observado na Tabela 8. O *primer* e a resina estão apresentados na Figura 18.

Tabela 8- Propriedades da Resina Laminação

CARACTERÍSTICAS RESINA LAMINAÇÃO		
	COMPONENTE A	COMPONENTE B
VISCOSIDADE A 25°C (cPS)	4.000 a 7.000	200 a 600
PESO ESPECÍFICO A 25°C (g/cm ³)	1,10 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02
COR	TRANSPARENTE	AMARELO ESCURO
ASPECTO FÍSICO	LÍQUIDO VISCOSO	LÍQUIDO
ÍNDICE TIXOTRÓPICO	MÍN. 1,5	MÍN 1,0

(fonte: S&P, 2018)

Figura 18 - Resinas Primer e Laminação utilizadas nas vigas



(fonte: elaborada pela autora)

6.1.8 Argamassa Estrutural

Na seção de reforço das barras de fibra de vidro foi utilizada a argamassa polimérica cimentícia ZENTRIFIX CR, composta por fibras sintéticas e aditivos. Na Tabela 9, é indicada a sua utilização em reparos estruturais em elementos de concreto, como vigas, pilares e lajes; reparos estruturais de até 60 mm; reconstituição da superfície de concreto e/ou aumento da espessura do cobrimento.

Tabela 9- Tabela com dados técnicos da argamassa estrutural ZENTRIFIX CR

DADOS TÉCNICOS	
CARACTERÍSTICA	VALOR
Densidade	2,15 kg/L
Consumo	1849 kg/m ³
Proporção de mistura	13 - 14%
Aderência (28 dias)	≥ 2MPa
Trabalhabilidade após adição de água	30 min

(fonte: BAUCHEMIE, 2019)

Anteriormente à utilização dessa argamassa, testou-se a argamassa estrutural Sika MonoTop 622, entretanto os valores de resistência se mostraram mais baixas. Não satisfazendo as condições de resistência mínima 35 MPa, aos 28 dias, pré-estabelecidas para garantir uma melhor aderência entre as barras e a argamassa. Será apresentada na Tabela 10, apenas os valores obtidos à compressão aos vinte oito dias.

Tabela 10 - Resistência à compressão simples da argamassa SIKA MonoTop-622 aos 28 dias

ENSAIO À COMPRESSÃO 28 dias SIKA				
	CP1	CP2	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
CARGA (kN)	59,8	56	57,90	2,69
RESIST. MÉDIA (MPa)	30,48	28,47	29,48	1,42
φ (mm)	50	49,7	49,85	0,21
L (mm)	95,5	96,9	96,20	0,99

(fonte: elaborada pela autora)

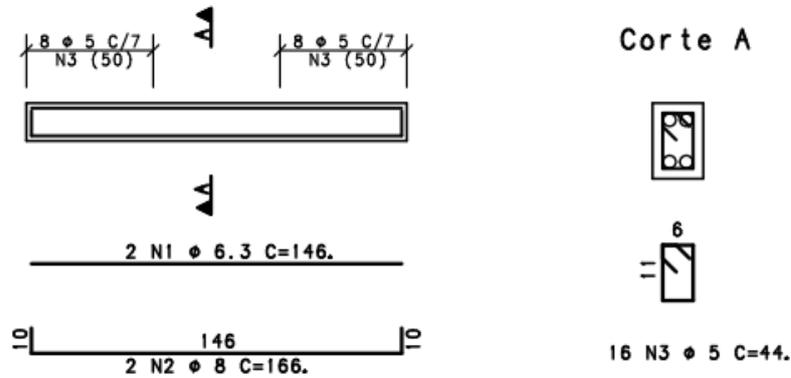
6.2 EXECUÇÃO DAS VIGAS

Para a execução das vigas, procurou-se utilizar as medidas próximas às utilizadas nas aulas de Patologia e Instrumentação das Construções, na tentativa de reaproveitar – ou realizar pequenas modificações – nas formas disponibilizadas pelo laboratório.

As dimensões das viga podem ser observadas na Figura 19, sendo o comprimento utilizado foi de 150 cm, a largura 10 cm e a altura 15 cm. Para tentar evitar que a viga rompa ao cisalhamento antes de romper à flexão, buscou-se manter a altura da viga próxima a dez por cento do valor do comprimento.

Vale ressaltar que essas medidas representam a metade das dimensões de vigas reais utilizadas em obras, cuja seção média é 15x30 cm². A adoção de valores menores nos testes está relacionada ao transporte desses elementos dentro do laboratório, geralmente realizado por duas pessoas de forma manual. Segundo Nora (2018), a representação de vigas em tamanho menor que o usualmente utilizado nas construções, pode causar resultados diferentes ao obtidos em situações reais de reforço.

Figura 19 - Dimensões vigas testemunho e vigas a serem reforçadas



(fonte: elaborada pela autora no software TQS)

6.2.1 Amarração das armaduras

As armaduras doadas pela ArcelorMittal já vieram cortadas e dobradas, sendo necessário utilizar uma torquês e arame recozido n° 18 para amarração dos estribos nas armaduras longitudinais. Na Figura 20 está representada a amarração das armaduras.

Figura 20 - Amarração dos estribos nas armaduras longitudinais

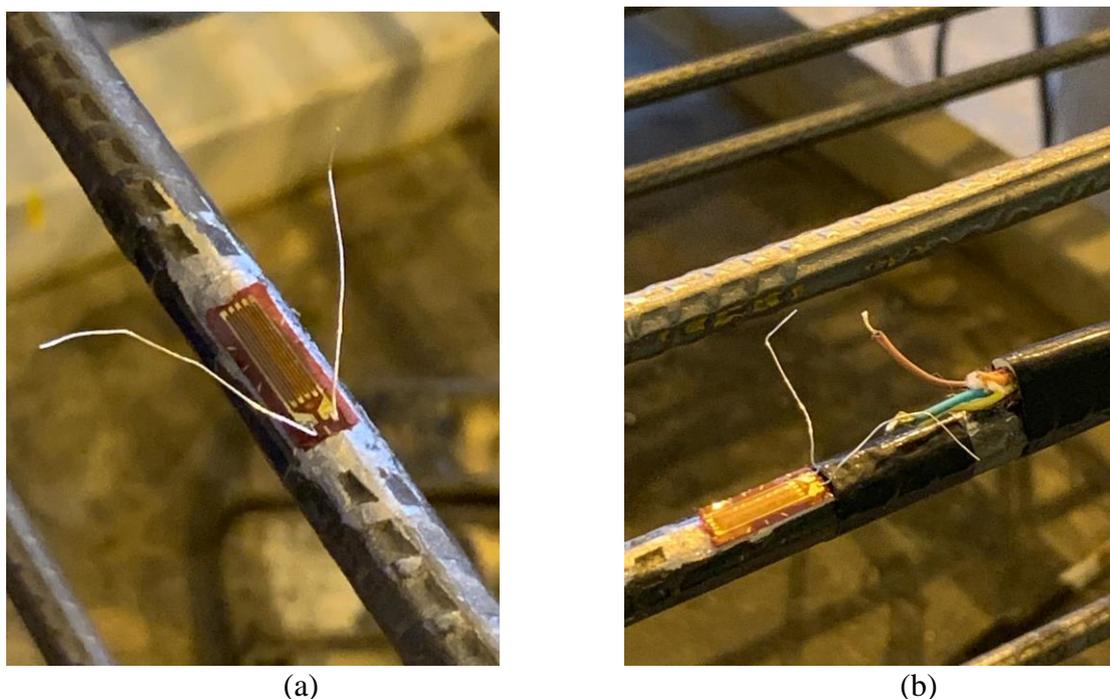


(fonte: elaborada pela autora)

Nas armaduras das vigas de reforço VR1, VR2, VR3 e VRR3 foram instalados extensômetros para medir a deformação das barras de aço durante o ensaio. Primeiramente, lixou-se a parte onde o extensômetro foi aplicado, no centro da barra longitudinal principal. Após, realizou-se a colagem da base extensômetro. Concluído esse processo, montaram-se as conexões elétricas, com ajuda de uma máquina de solda, responsáveis pela transmissão de informações dos extensômetro ao sistema de aquisição de dados *SPIDER8*. O *software* CATMAN V3.5.1 foi o responsável por transmitir as informações dos ensaios para planilhas compatíveis com o programa *Excel*.

Para a colação dos extensômetros foi necessário utilizar uma lixa para aço, máquina de solda (Figuras 21a e 21b) e adesivo instantâneo.

Figura 21 – (a) Colocação do extensômetro; (b) Conexões elétricas do extensômetro



(fonte: elaborada pela autora)

6.2.2 Concreto

O concreto utilizado é do tipo convencional com traço 1:2,9:3,6 proporção para cimento:areia:brita em massa. O fator água cimento (a/c) é igual a 0,5. Este traço, para o concreto, foi baseado no utilizado na disciplina de Patologia e Instrumentação das Construções que alcança, para resistência média à compressão, valores em torno dos 30 MPa.

Com a alteração na relação água/cimento, conseguiu-se elevar a resistência média à compressão, conforme indicado na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 - Comparação entre as resistências médias do concreto com alteração na relação água-cimento

RELAÇÃO DOS TRAÇOS E RESISTÊNCIAS MÉDIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO			
		a/c	RESIST. MÉDIA À COMPRESSÃO
TRAÇO ORIGINAL	1:2,9:3,6	0,6	30 MPa
TRAÇO MODIFICADO 26/04	1:2,9:3,6	0,5	42 MPa
TRAÇO MODIFICADO 29/04	1:2,9:3,6	0,5	36 MPa

(fonte: elaborada pela autora)

O ensaio de flexão em quatro pontos foi realizado seguindo-se a recomendação da NBR 5739:2007 (ABNT,2007), com velocidade constante de carregamento de 0,45 MPa/s. A seguir serão apresentadas nas Tabelas 12 e 13 as resistências no teste de compressão simples do concreto dos corpos-de-prova.

Tabela 12 - Ensaios dos corpos-de-prova da primeira betonada

DADOS REFERENTES ÀS VIGAS CONCRETADAS DIA 26/04							
	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO	
7 dias	L (cm)	18,90	19,10	19,30	-	19,10	0,20
	Carga (kN)	288,80	286,00	291,00	-	288,60	2,51
	Rêsistência (MPa)	36,77	36,41	37,04	-	36,74	0,32
14 dias	L (cm)	18,70	19,20	19,10	-	19,00	0,26
	Carga (kN)	289,40	316,00	306,00	-	303,80	13,44
	Rêsistência (MPa)	36,50	40,24	39,05	-	38,60	1,91
28 dias	L (cm)	19,40	19,40	19,50	18,90	19,30	0,27
	Carga (kN)	319,50	329,00	344,50	332,00	331,25	10,32
	Rêsistência (MPa)	40,67	41,91	43,35	42,25	42,05	1,10

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 13 - Ensaios dos corpos-de-prova da segunda betonada

		DADOS REFERENTES ÀS VIGAS CONCRETA DIA 29/04					
		CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
8 dias	L (cm)	19,80	19,30	19,70	-	19,60	0,26
	Carga (kN)	265,60	279,00	273,20	-	272,60	6,72
	Rêsistência (MPa)	33,81	35,52	34,77	-	34,70	0,86
14 dias	L (cm)	18,60	19,10	19,10	-	18,93	0,29
	Carga (kN)	289,00	235,20	260,80	-	261,67	26,91
	Rêsistência (MPa)	36,75	29,83	33,20	-	33,26	3,46
29 dias	L (cm)	19,30	19,40	19,10	19,30	19,28	0,13
	Carga (kN)	259,60	289,80	294,80	298,20	285,60	17,67
	Rêsistência (MPa)	33,05	36,90	37,54	37,95	36,36	2,25

(fonte: elaborada pela autora)

6.2.3 Formas

As formas de compensado naval utilizadas para a moldagem das vigas foram executadas pelos técnicos do laboratório LEME. Ao todo, fizeram-se duas estruturas que comportavam duas vigas cada, como é possível observar na Figura 22.

Figura 22 - Formas das vigas



(fonte: elaborada pela autora)

6.3 CONCRETAGEM

A concretagem das vigas ocorreu em duas etapas, em função da grande quantidade. Foram concretadas quatro vigas – uma testemunho e três para reforço – no dia 26 de abril de 2019 e o segundo lote concretado, também composto por uma viga testemunho e três para reforço, no dia 29 de abril de 2019. Totalizando oito vigas: duas testemunho e seis para reforço. Em cada betonada, também foram moldados dez corpos-de-prova cilíndricos, para serem testados em três idades com dimensões de 10 cm por 20 cm.

Como foi reduzida a relação água:cimento (a/c) comparando-se ao traço utilizado na aula de Patologia e Instrumentação das Construções, para dar melhor trabalhabilidade ao concreto, adicionou-se aditivo plastificante nas duas betonadas, conforme indica a Tabela 14.

Tabela 14 - Quantidade adicionada de aditivo em cada betonada

BETONADA	MASSA DE ADITIVO
26/04/2019	85,5g
29/04/2019	57g

(fonte: elaborada pela autora)

A concretagem de cada viga aconteceu em duas camadas, sendo feita vibração em cada uma delas, com o auxílio do vibrador de imersão, para reduzir o número de vazios.

6.3.1 Ensaio de Abatimento de cone (*slump*)

Realizou-se, nas duas betonadas, o ensaio de abatimento de cone, em acordo à NBR 7223:1992 (ABNT, 1992). Os valores encontrados nos ensaios podem ser observados na Tabela 15. Na Figura 23 é possível observar o ensaio de abatimento de cone para a primeira betonada.

Tabela 15 - Valores de abatimento de cone por betonada

BETONADA	ABATIMENTO DE CONE
26/04/2019	11 cm
29/04/2019	10 cm

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 23 - Abatimento de cone referente à betonada do dia 26/04/2019



(fonte: elaborada pela autora)

6.3.2 Cura

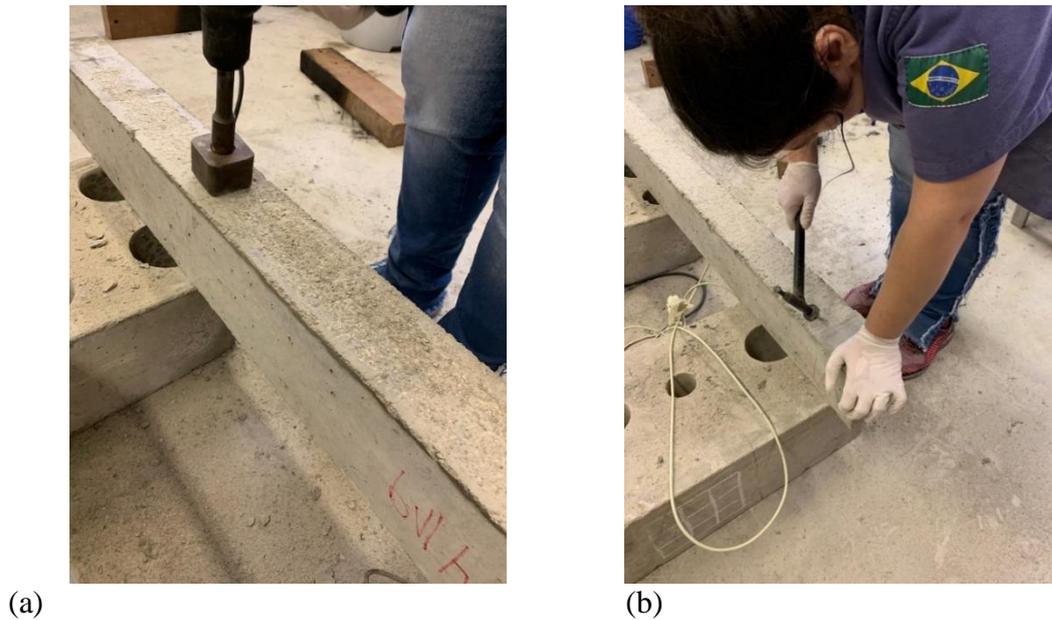
As vigas foram desmoldadas aos três dias de idade, tanto em função do reaproveitamento das formas da primeira betonada para a realização da segunda, quanto pela utilização de cimento de alta resistência inicial.

A cura das vigas e de seus respectivos corpos-de-prova aconteceu em temperatura ambiente, ao abrigo de luz solar, sob lonas plásticas durante quatorze dias.

6.4 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para poder ter aderência entre a superfície de concreto e a argamassa estrutural, a face inferior das vigas, as quais foram reforçadas, precisaram ser apicoadas. Neste processo, retirou-se a nata de cimento até os agregados graúdos ficarem aparentes na superfície e, conseqüentemente, essa região ficar mais rugosa. Utilizou-se martetele para um apicoamento nas regiões mais centrais da viga (figura 24a), deixando-se o martetele com prego, para ajuste fino das regiões mais periféricas (figura 24b). Cuidou-se para não quebrar as laterais das vigas com o martetele, pois nessas situações a argamassa não apresentaria uma boa aderência.

Figura 24 – (a) Apicoamento da região central da viga; (b) Ajuste fino realizado com martelo com prego

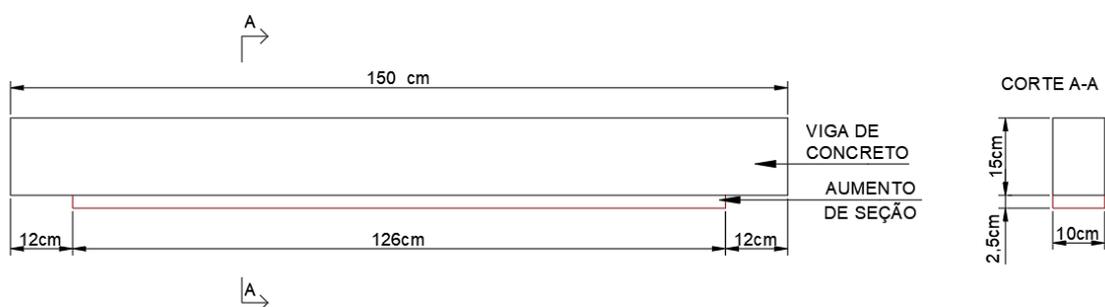


(fonte: elaborada pela autora)

6.5 EXECUÇÃO DA CAMADA DE REFORÇO

O aumento de seção na zona de reforço das vigas possuem dimensões de 126 cm de largura, 2,5 cm de altura e 10 cm de profundidade, conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Detalhe do aumento de seção para reforço na viga



(fonte: elaborada pela autora)

6.5.1 Formas

As formas utilizadas para o aumento de seção, também são feitas de compensado e foram executadas pelos técnicos do laboratório LEME. Ao todo, fizeram-se quatro estruturas, uma para cada viga, sendo reaproveitada duas no segundo lote do dia 28 de maio, como se pode observar na Figura 26.

Figura 26 - Forma para execução de reforço de uma das vigas



(fonte: elaborada pela autora)

6.5.2 Colocação das barras

O fundo das vigas foi molhado, antes da aplicação da argamassa, para facilitar a aderência entre as duas interfaces. Após essa etapa, as barras de fibra de vidro foram colocadas no fundo das vigas e, para garantir uma distância mínima lateral, utilizou-se dois pedaços de tubo de PVC de 20mm de diâmetro. As barras foram colocadas, conforme é possível ver na Tabela 16.

Tabela 16 - Diâmetros das barras de reforço por vigas

VIGAS	ϕ das barras de reforço
VR1	8 mm
VR2	10 mm
VR3	12 mm
VRR1	8 mm
VRR2	10 mm
VRR3	12 mm

(fonte: elaborada pela autora)

6.5.3 Preparação da Argamassa

O fabricante indicava opções de traço que variassem a proporção de 0,13 a 0,14 de massa de água, para massa de argamassa. Na tentativa de se conseguir maior resistência à compressão

para que a aderência entre as barras de fibra de vidro e argamassa estrutural fosse maior, utilizou-se o traço 1:0,13 (argamassa:água).

Para a preparação da argamassa foi necessário um bom planejamento das etapas que englobavam, desde a mistura com água até o lançamento, em função da trabalhabilidade da argamassa ser limitada a trinta minutos. Sendo assim, realizou-se uma betonada por viga, totalizando seis betonadas.

Para cada betonada fez-se o teste de abatimento de cone para a argamassa e moldaram-se corpos-de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm, para ensaio a compressão, em diferentes proporções para cada betonada. Essa variação ocorreu, pois houveram muitas perdas durante o lançamento da argamassa, ultrapassando a margem calculada de 10% de perdas. A velocidade de carregamento adotado foi de 0,25 MPa/s, em acordo à NBR 7215 (ABNT, 2019). Não foi possível moldar os corpos-de-prova para o teste de tração, pelo mesmo motivo anteriormente expresso. As betonadas foram divididas em dois dias, sendo realizadas quatro no dia 27 de maio e duas no dia 28 de maio. É possível observar as informações referentes a cada betonada na Tabela 17.

Tabela 17 - Quantidade de corpos-de-prova por viga

CP's	nº de CP's	DIA DA BETONADA
VR1	6	27/05/2019
VR2	6	27/05/2019
VR3	5	27/05/2019
VRR1	5	27/05/2019
VRR2	5	28/05/2019
VRR3	5	28/0/2019

(fonte: elaborada pela autora)

6.5.3.1 Índice de Consistência

Por não haver uma Norma específica para análise de argamassa estrutural, o índice de consistência foi calculado baseado na NBR 7215:2019 (ABNT,2019) e os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 18. É interessante ressaltar para a viga VR2 o índice de consistência ficou bem abaixo das demais vigas, o que dificultou um pouco mais a execução dessa viga.

Tabela 18 - Índice de Consistência da Argamassa Estrutural por vigas

VIGAS	VR1	VR2	VR3	VRR1	VRR2	VRR3
$\phi 1$ (mm)	230	160	235	215	230	240
$\phi 2$ (mm)	235	165	235	220	230	240
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)	232,5	162,5	235	217,5	230	240

(fonte: elaborada pela autora)

6.5.3.2 Resistência à compressão

Nas Tabelas 19 e 20 e 21 são apresentados os valores de resistências médias à compressão e desvio-padrão (σ) encontrados nas idades catorze e quinze dias. As vigas foram rompidas três dias após o ensaio dessas idades, sendo assim, para fins de cálculos analíticos, esses foram os valores adotados.

Tabela 19 - Ensaio à compressão realizado dia 11 de junho de 2019

11 de junho de 2019				
CP's	L cm	ϕ (cm)	F (kN)	RESIST. MÉDIA À COMP. (MPa)
VR1 15dias	9,60	5,00	127	64,71
	9,70	5,00	118,6	60,44
	8,85	5,05	125,8	64,1
VR2 15dias	9,90	5,00	137	69,73
	9,30	5,00	139,6	71,14
	9,80	5,00	82,6	42,01
VR3 15dias	9,85	5,05	144,6	73,65
	9,90	5,00	119,4	60,7
	9,98	5,10	156,4	79,69
VRR1 15dias	9,99	5,00	141,8	72,17
	9,95	5,05	70,4	36,85
	9,79	5,00	141,6	72,12

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 20 - Ensaio à compressão realizado dia 11 de junho de 2019

CP's	L cm	ϕ (cm)	F (kN)	RESIST. MÉDIA À COMP. (MPa)
VRR2 14dias	9,42	5,00	120,6	61,45
	9,42	5,05	148,2	75,50
	9,40	5,10	100,6	51,19
VRR3 14dias	9,59	5,05	83,2	42,38
	9,49	5,00	146,2	74,41
	9,42	5,00	87,4	44,46

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 21 - Resistência média à compressão e desvio-padrão da argamassa das vigas reforçadas

VIGA	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	RESIST. MÉDIA À COMPRESSÃO (MPa)	DESVIO-PADRÃO
VR1	64,71	60,44	64,1	63,08	1,89
VR2	69,73	71,14	42,01	60,96	13,41
VR3	73,65	60,7	79,69	71,35	7,92
VRR1	72,17	36,85	72,12	60,38	16,64
VRR2	61,45	75,50	51,19	62,71	9,96
VRR3	42,38	74,41	44,46	53,75	14,63

(fonte: elaborada pela autora)

6.5.4 Lançamento da Argamassa

As barras foram fixadas apenas com o peso-próprio da argamassa durante o lançamento, não sendo utilizados materiais ou resinas para prendê-las à viga. O método de aplicação pode ser observado na Figura 27(a), assim como a viga acabada Figura 27(b).

Figura 27 – (a) Lançamento da Argamassa Estrutural e (b) Viga acabada



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

6.6 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para diminuir a concentração de tensões nos cantos da superfície que receberia a manta de fibra de vidro para ancoragem, foi realizada o esmerilhamento dos cantos das seis vigas que receberam reforço. O esmerilhamento consiste em realizar o arredondamento dos cantos, para evitar o acúmulo de tensões que poderiam causar a ruptura da manta. Para a execução dessa etapa foi necessário utilizar uma esmerilhadeira com disco diamantado como é possível observar nas Figuras 28(a) e 28(b).

Figura 28 - (a) Esmerilhadeira com disco diamantado e (b) Execução do arredondamento dos cantos das vigas



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

Feito o esmerilhamento das vigas, utilizou-se uma broxa para fazer a limpeza do excesso de pó de cimento resultante do processo, para se poder aplicar o primer na região que receberia a manta.

A etapa seguinte consistiu em cortar a manta de GFRP para posteriormente ser colocada nas vigas. Ao todo, foram recortados doze partes medindo 35 cm de largura por 55 cm de altura, como é possível observar na Figura 29 a seguir.

Figura 29 - Corte da manta de fibra de vidro



(fonte: elaborada pela autora)

Para a aplicação do *primer*, realizou-se sua dosagem em balança de precisão. Misturou-se os dois componentes, durante cinco minutos, de forma manual, até estarem com aspecto homogêneo. A aplicação se sucedeu com rolo de lã sintética, de forma que toda a superfície, que receberia a manta, ficasse recoberta, como é possível ver na Figura 30.

Figura 30 - Aplicação do primer na superfície onde a manta foi colocada



(fonte: elaborada pela autora)

6.7 APLICAÇÃO DA MANTA DE GFRP PARA ANCORAGEM

Dada a aplicação do *primer*, foi necessário aguardar cerca de cinquenta minutos para o material penetrar na superfície. Para a aplicação da resina, igualmente foi necessário realizar a dosagem dos materiais componentes. A mistura também se deu de forma manual, durante o intervalo de tempo de cinco minutos, conforme é possível observar na Figura 31.

Figura 31 - Mistura manual dos materiais bi componentes da resina



(fonte: elaborada pela autora)

Montada a resina, aplicou-se uma primeira camada na superfície a fim de saturá-la, para assim melhor aderir a manta de fibra de vidro. Passada essa etapa, a manta foi colocada em contato

com a resina, envolvendo todos os quatro lados da viga, encontrando-se na parte superior, como é possível observar na Figura 32.

Figura 32 - Aplicação da manta de fibra de vidro



(fonte: elaborada pela autora)

Assim como o *primer*, a resina também foi aplicada com o auxílio de um rolo de lã sintética. Colocada a camada de manta, aplicou-se mais resina a fim de impregná-la bem à manta, formando um sistema triplo resina-manta-resina. Essa saturação deve acontecer de modo que não seja tão espessa a camada de resina aplicada, o que poderia prejudicar a resistência do reforço, nem muito delgada, o que poderia comprometer a aderência do material à viga. Para ajudar na fixação da manta, utilizou-se um rolo de metal (Figura 33a), que ajudava a reduzir os espaços vazios que surgiam durante o processo. Finalizada essa etapa, embalagens plásticas para proteger as superfícies foram colocadas e, para ajudar o processo de colagem, tábuas de madeira foram utilizadas para conter as extremidades das vigas (Figura 33b).

Figura 33 – (a) Passagem de rolo de metal para reduzir os vazios e (b) Tábuas de madeiras colocadas para ajudar na fixação da manta



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

6.8 ENSAIO

Os ensaios apresentados neste trabalho foram realizados nas dependências do laboratório LEME, sendo feito o sistema de carregamento por meio da prensa de ensaios universal, com capacidade de 2000 kN da marca Shimadzu. As vigas foram ensaiadas à flexão pura em quatro pontos, como será descrito no desenvolver desse capítulo.

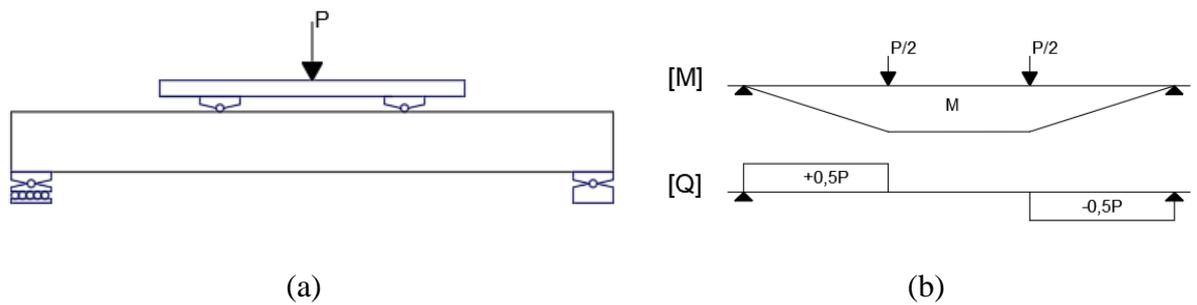
Como não existe uma Norma que apresente as diretrizes a se seguir nesse ensaio, o carregamento nas vigas ocorreu com duas taxas distintas. Até os primeiros 15 mm de flecha das vigas, a taxa de carregamento foi de 1mm/min. A partir de então, a taxa de carregamento foi aumentada para 5 mm/min. Essa metodologia foi adotada, em função da variação da flecha ser muito pequena nos instantes iniciais. A adoção inicial da taxa de 1 mm/min foi na tentativa de se obter mais dados para análise.

As vigas foram colocadas sobre um apoio de primeira ordem e um de segunda ordem com dimensões de 10 cm de largura para ambos, dessa forma, em todas as vigas, o vão livre considerado foi 140 cm. Os elementos foram todos ensaiados com cargas concentradas aplicadas nos terços médios.

Nas Figuras 34(a), 34(b), 35(a) e 35(b), é possível observar o esquema do ensaio e o posicionamento da viga testemunho VT sobre o apoio de primeira ordem, à esquerda, e sobre

o de segunda ordem à direita. Utilizou-se para medir os deslocamentos verticais dois equipamentos LVDT's (linear variation displacement transducer). Ambos ficaram posicionados um de cada lado da viga na parte central. Na Figura 35(b) é apresentada a viga VR1 sendo testada. É possível ver na imagem os equipamentos LVDT's, bem como os pontos de aplicação da carga e os cabos de aquisição de dados do extensômetro.

Figura 34 - (a) Esquema do ensaio para a viga VT e (b) Esquema das solicitações



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 35 – (a) Posicionamento da viga VT para ensaio; (b) Ensaio da viga VR1



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo dedica-se a apresentar e comparar os resultados obtidos na análise numérica, bem como nos ensaios experimentais, com os valores obtidos nos cálculos analíticos. No Quadro 6 são apresentados os valores das cargas em que ocorreram as primeiras três fissuras nas vigas, observadas visualmente durante o ensaio experimental, assim como a carga de ruptura das vigas.

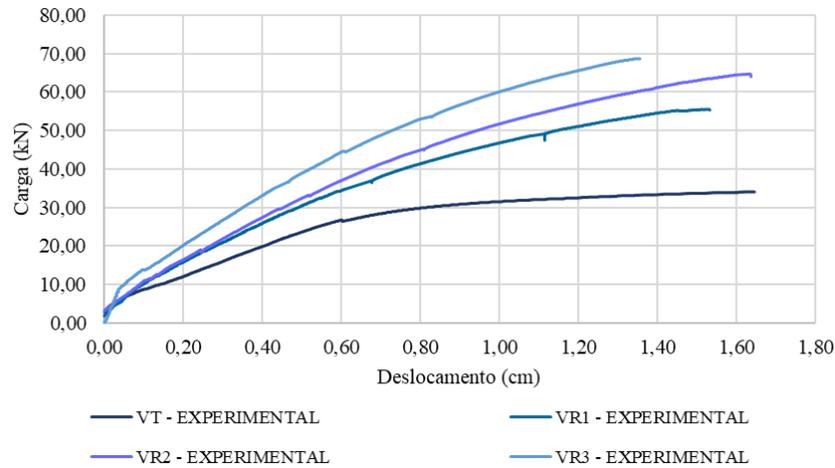
Quadro 6 - Cargas das vigas no ensaio experimental

VIGAS	CARGA DA 1ª FISSURA (kN)	CARGA DE RUPTURA (kN)
VT	5,51	36,03
VT1	7,85	36,51
VR1	8,24	55,07
VRR1	8,01	59,27
VR2	5,45	62,64
VRR2	7,89	57,83
VR3	7,98	68,66
VRR3	8,01	75,62

(fonte: elaborado pela autora)

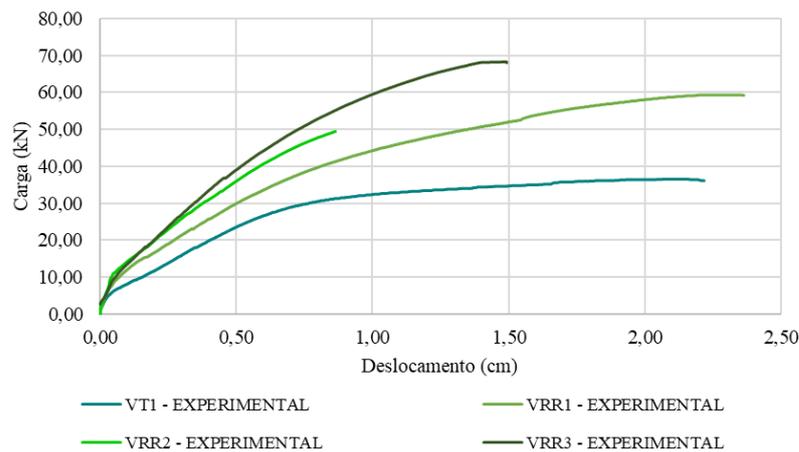
Observa-se uma certa semelhança nos resultados referentes à elevação na carga ruptura da estrutura e que este comportamento é estendido, quando utiliza-se a armadura não-metálica como reforço. Para se ter conhecimento acerca da capacidade portante das barras de fibra de vidro nas vigas reforçadas, buscou-se aplicar a carga teste até que a estrutura colapsasse; o que ocorreu sem que as barras de fibras de vidro alcançassem sua tensão de ruptura. O deslocamento das vigas durante o ensaio está representado nos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Carga x Deslocamento das vigas VT, VR1, VR2 e VR3



(fonte: elaborada pela autora)

Gráfico 2 - Carga x Deslocamento das vigas VT1, VRR1, VRR2 e VRR3



(fonte: elaborada pela autora)

É possível verificar que, com o aumento do diâmetros das barras de reforço, a rigidez das vigas aumenta, dada a inclinação das curvas observadas nos Gráficos 1 e 2. Os Quadros 7 e 8 apresentam o aumento de carga que as vigas reforçadas suportaram, em função da configuração do reforço. A análise foi realizada comparando-se vigas de mesma betonada, em função da resistência média do concreto à compressão ter sido diferente em cada concretagem.

Quadro 7 - Aumento de carga das vigas da primeira betonada

VIGAS	CARGA RUPTURA (kN)	AUMENTO DE CARGA (%)
VT	36,03	-
VR1	55,07	52,84
VR2	62,64	73,86
VR3	68,66	90,56

(fonte: elaborado pela autora)

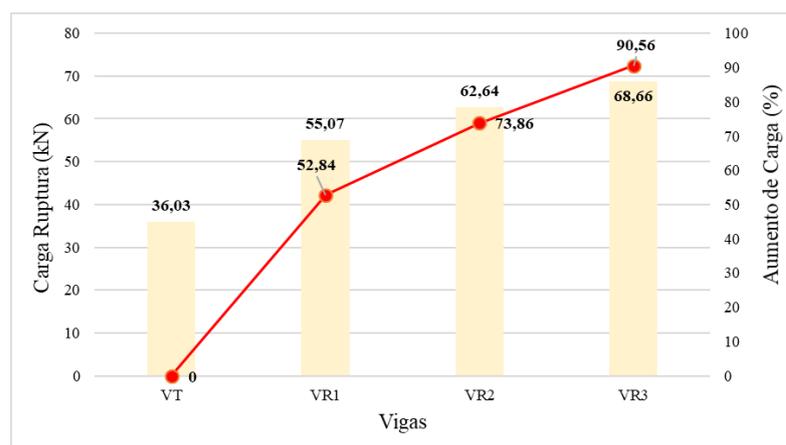
Quadro 8 - Aumento de carga das vigas da segunda betonada

VIGAS	CARGA RUPTURA (kN)	AUMENTO DE CARGA (%)
VT1	36,51	-
VRR1	59,27	62,34
VRR2	57,83	58,39
VRR3	75,62	107,12

(fonte: elaborado pela autora)

A partir dos dados obtidos no Quadro 6, traçou-se o gráfico contido no Quadro 9 para e comparar o ganho na capacidade de carga que as vigas da primeira betonada tiveram em relação à viga testemunho VT. A carga máxima suportada pela viga teste foi de 36,03 kN, sendo os valores das cargas de ruptura das vigas reforçadas indicadas na forma de diagrama de barras e o aumento de resistência na reta superior.

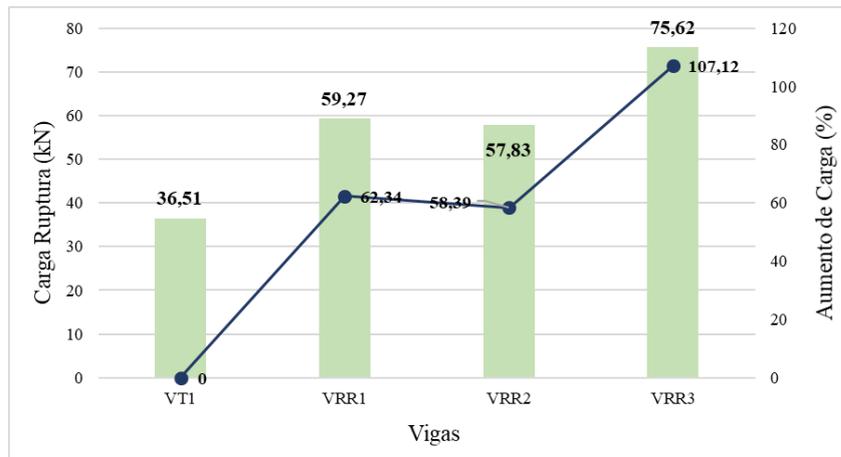
Quadro 9 - Relação do aumento da carga de ruptura em relação à viga testemunho VT



(fonte: elaborado pela autora)

A mesma relação foi realizada para as vigas pertencentes à segunda betonada. Para a viga testemunho VT1, a carga de ruptura foi de 36,51 kN e o valores de carga de ruptura das vigas reforçadas e do aumento da capacidade de carga podem ser verificados no Quadro 10.

Quadro 10 - Relação do aumento da carga de ruptura em relação à viga testemunho VT1



(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados obtidos no ensaio mostram que houve aumento na carga de ruptura das vigas, com o aumento do diâmetro das barras de reforço. Na viga VRR2 ocorreu o descolamento da camada de reforço, o que corroborou para que a viga não alcançasse uma carga de ruptura maior, como era previsto. É possível observar nas Figuras 36(a) e 36(b) o descolamento da camada de reforço na viga.

Figura 36 - (a) Descolamento do reforço na extremidade e (b) Descolamento do reforço na região central da viga



(a)



(b)

(fonte: elaborada pela autora)

7.1 FISSURAÇÃO

Na Figura 37 é possível observar as armaduras de aço e de fibra de vidro após a realização do ensaio. Observando-se armadura longitudinal na zona comprimida da viga VR2, que flambou durante o ensaio, com a barra de fibra de vidro de 8 mm da viga VR1, pode-se avaliar que a armadura de reforço não alcançou a tensão de ruptura.

Figura 37 - Flambagem da armadura de aço na zona comprimida e barra de fibra de vidro intacta

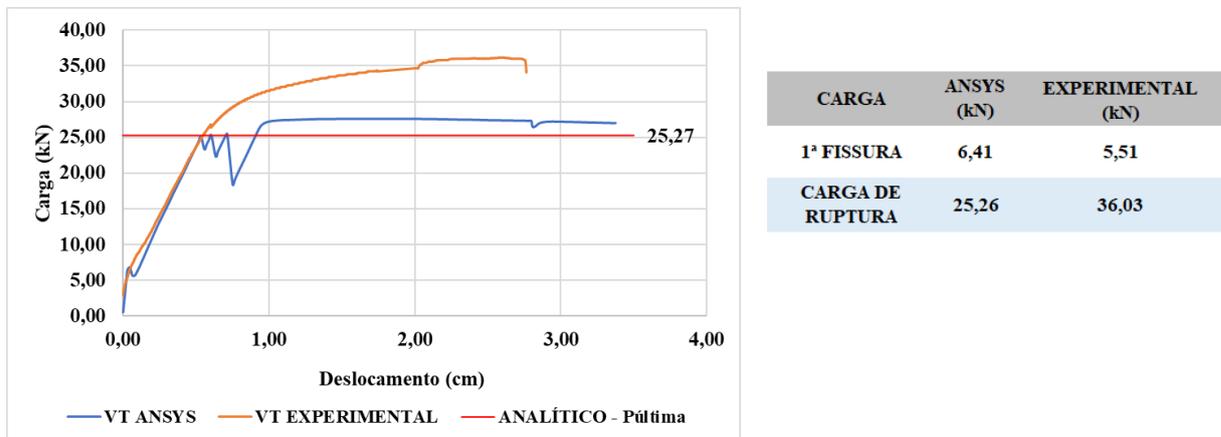


(fonte: elaborada pela autora)

7.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

O diagrama de carga versus deslocamento obtido a partir do ANSYS, foi gerado multiplicando por quatro os resultados obtidos como reações no nó de apoio. Os deslocamentos foram medidos no nó interno da viga oposto ao apoio, na metade da estrutura. No Quadro 11 é possível observar as curvas de carga x deslocamento da viga VT e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento.

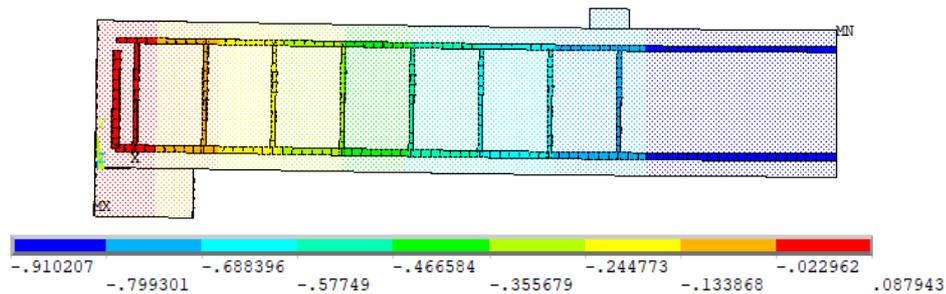
Quadro 11 - Comparação da flecha da viga VT experimentais com o modelo computacional



(fonte: elaborado pela autora)

Na Figura 38, é apresentada a deformação máxima atingida na viga VT no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. Tal deformada representa a flecha atingida no momento do seu colapso. A carga de ruptura foi de 25,26 kN, com uma deformação de aproximadamente 9,1 mm no centro do vão.

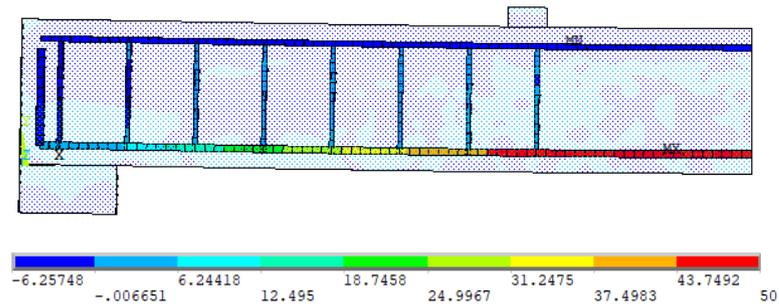
Figura 38 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VT



(fonte: elaborada pela autora)

A Figura 39 apresenta as tensões nas armaduras longitudinais da viga VT na carga de ruptura. É possível observar que a barra atinge a tensão de escoamento nessa carga, sendo considerada assim a ruptura por flexão.

Figura 39 - Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VT

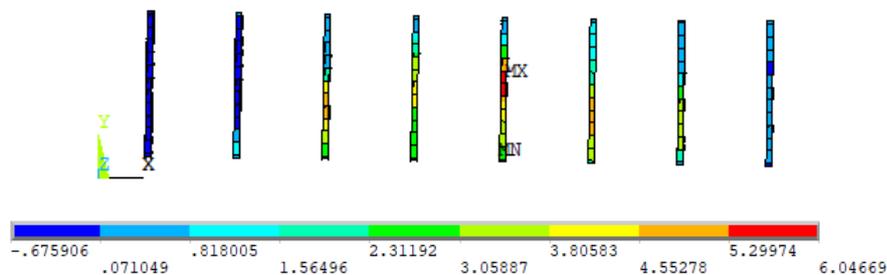


(fonte: elaborada pela autora)

Na Figura 40, estão representadas as tensões que ocorrem nos estribos da viga VT, durante a aplicação da carga de ruptura. Observa-se que os estribos não atingiram a tensão de escoamento de 50 kN/cm², o que comprova que não houve ruptura por cisalhamento.

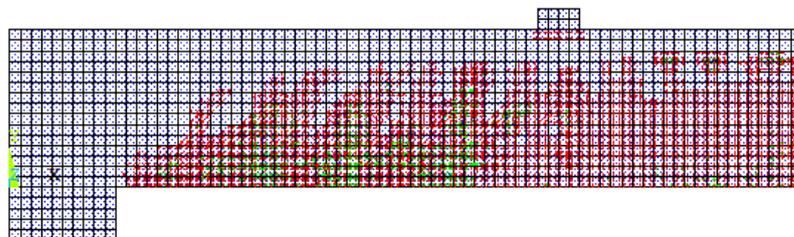
Na Figura 41, tem-se o diagrama de abertura de fissuras para a viga VT. É possível constatar o comportamento das vigas a partir da direção das fissuras no instante em que a carga de ruptura é alcançada.

Figura 40 - Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VT



(fonte: elaborada pela autora)

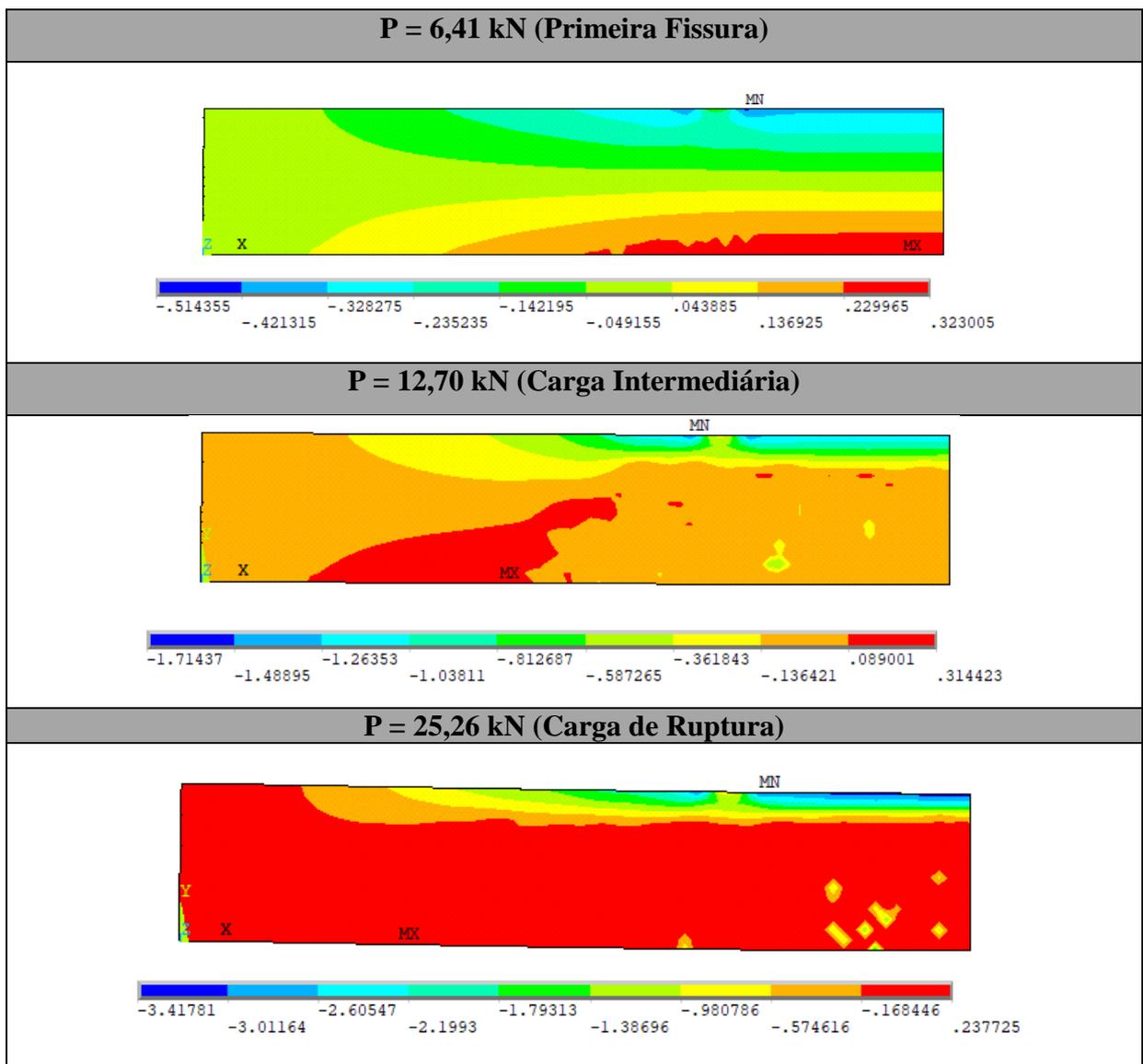
Figura 41 – Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VT



(fonte: elaborada pela autora)

No Quadro 12, foram apresentados o comportamento da tensão no concreto da viga VT. Analisou-se o comportamento da estrutura em três cargas, para que fosse possível observar a evolução das tensões no concreto e como a linha neutra se deslocava a partir de cada incremento de carga. As cargas analisadas são a da primeira fissura, carga intermediária e carga de ruptura, todas encontradas numericamente.

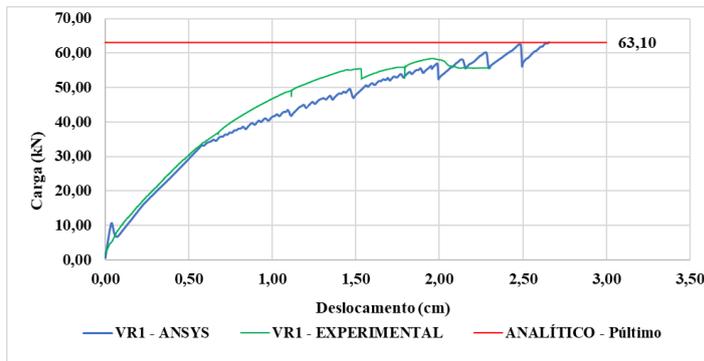
Quadro 12 - Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VT (em kN/cm²)



(fonte: elaborada pela autora)

No Quadro 13 é possível observar as curvas de carga x deslocamento da viga VR1 e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento. O modelo proposto se mostrou satisfatório para simular o comportamento da viga, como é possível observar.

Quadro 13 - Comparação da flecha das viga experimental VR1 com o modelo computacional



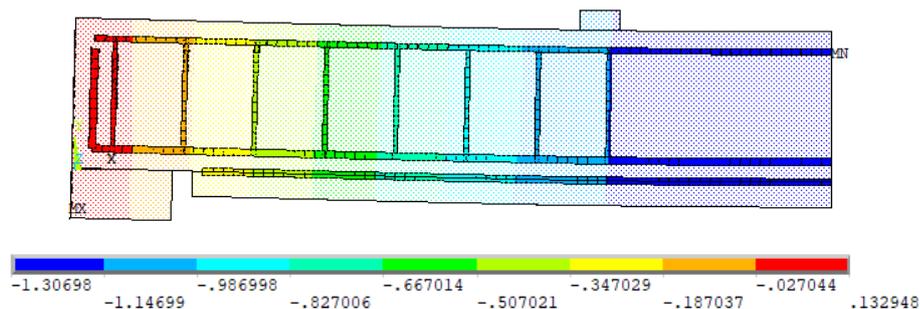
CARGA	ANSYS (kN)	EXPERIMENTAL (kN)
1ª FISSURA	8,41	8,24
CARGA DE RUPTURA	46,98	55,07

(fonte: elaborado pela autora)

A curva traçada no ANSYS ficou um pouco abaixo da experimental, devido à posição das barras de fibra de vidro no modelo numérico, que ficaram um pouco acima do que no modelo experimental, trabalhando com uma altura útil um pouco menor.

Na Figura 42, é apresentada a deformação máxima atingida na viga VR1 no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. A carga de ruptura atingida pela viga foi de 46,98 kN, com uma deformação de aproximadamente 1,31 cm no centro do vão.

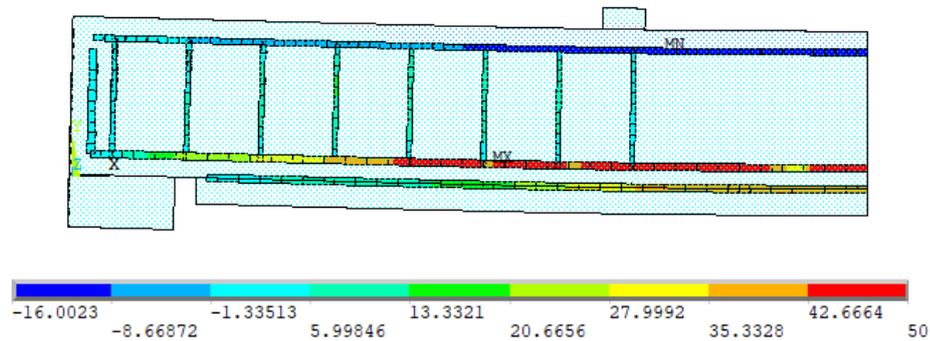
Figura 42 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR1



(fonte: elaborada pela autora)

A Figura 43 apresenta as tensões impostas nas armaduras longitudinais da viga VR1 na carga de ruptura. A barra atinge a tensão de escoamento caracterizando-se, assim, ruptura por flexão. Observa-se que para a barra de fibra de vidro, neste instante, a tensão está perto de 35,33 kN/cm². Na Figura 37 é possível observar que a barra de fibra de vidro de 8 mm não rompeu.

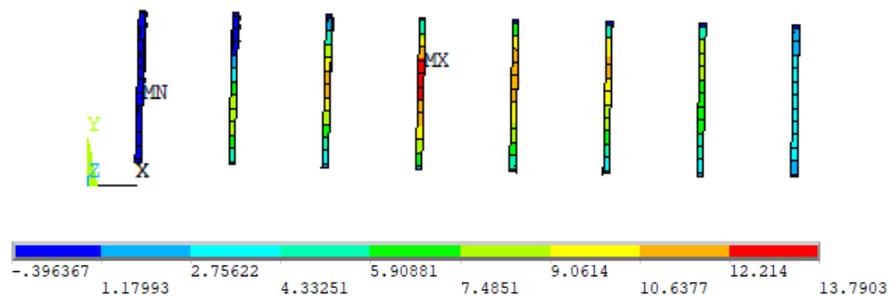
Figura 43 - Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR1



(fonte: elaborada pela autora)

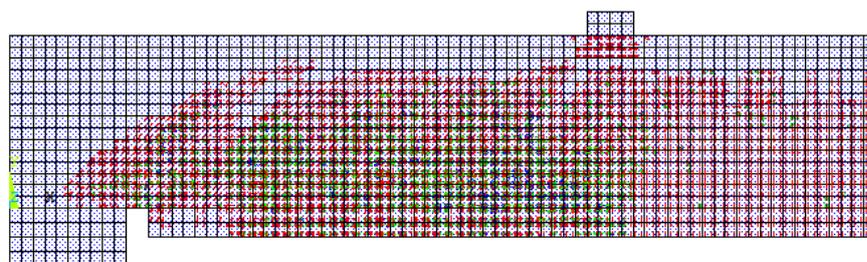
Na Figura 44 estão representadas as tensões atuantes somente nos estribos da viga VR1 na carga de ruptura. Da mesma forma que a viga VT, os estribos não atingiram a tensão de escoamento de 50 kN/cm², constatando que na viga reforçada VR1 também não sofreu falha por cisalhamento. O diagrama de abertura de fissuras para a viga VR1 está representado na Figura 45.

Figura 44 - Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR1



(fonte: elaborada pela autora)

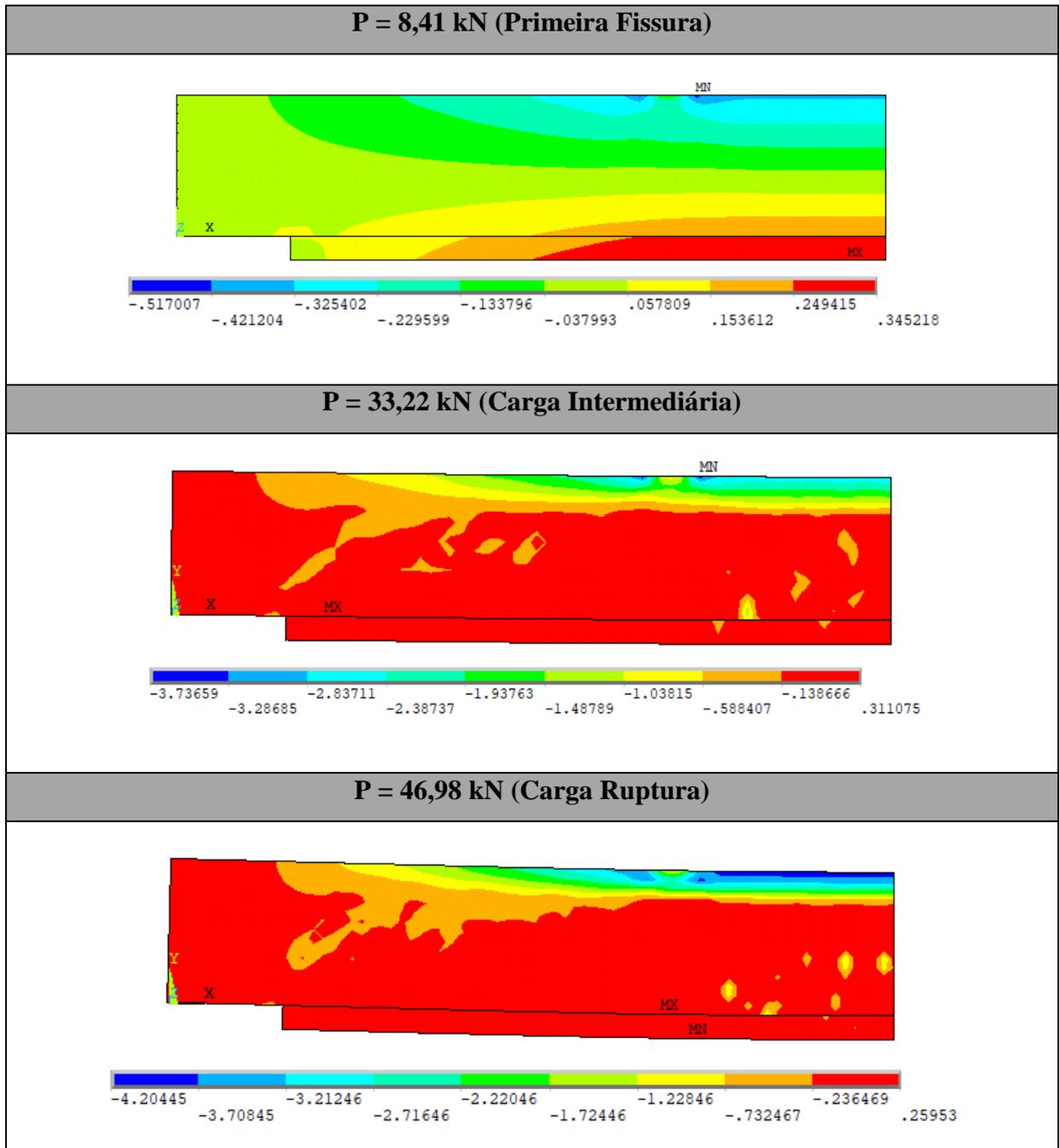
Figura 45 - Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR1



(fonte: elaborada pela autora)

Os dados de tensão dos elementos de concreto e de argamassa da viga VR1 estão apresentados no Quadro 14. Para esta viga, igualmente foram analisadas três cargas, para demonstrar a evolução das tensões nesses elementos. As cargas analisadas são a da primeira fissura, intermediária e carga de ruptura, todas encontradas numericamente.

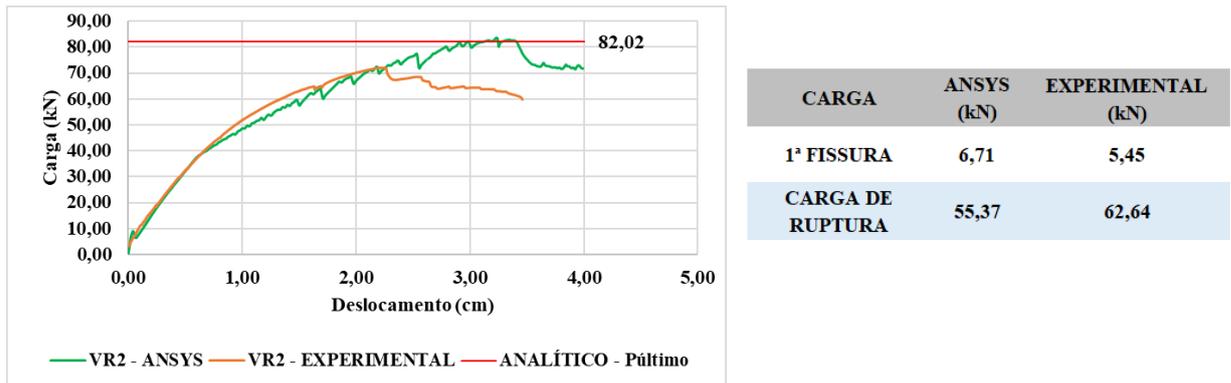
Quadro 14 - Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR1 (em kN/cm²)



(fonte: elaborada pela autora)

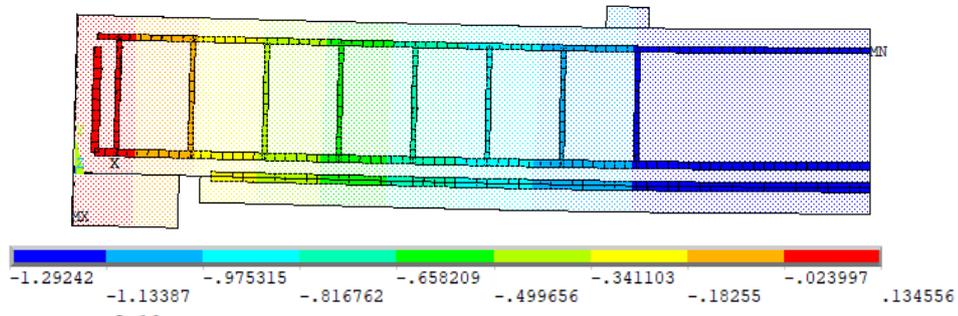
A viga VR2 seguiu o mesmo padrão de comportamento da viga reforçada VR1, como fica evidenciado no Quadro 15, Quadros 16 e Figuras 46 a 50. Em todas os elementos, a análise numérica acompanhou os resultados experimentais até o limite de escoamento do aço, o que, mais uma vez, indica que o modelo adotado possui boa representatividade.

Quadro 15 - Comparação da flecha das viga experimental VR2 com o modelo computacional



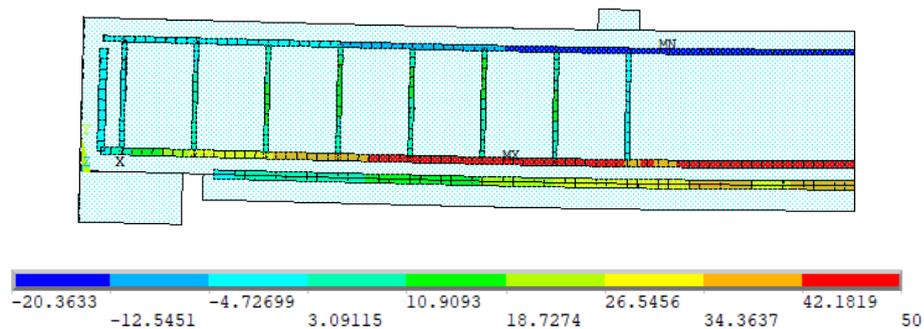
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 46 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR2



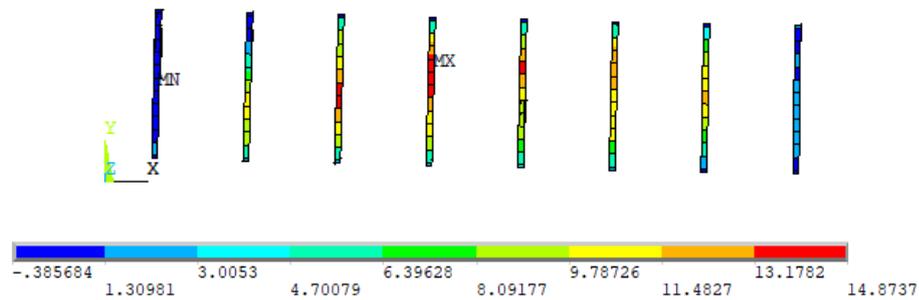
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 47 - Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR2



(fonte: elaborada pela autora)

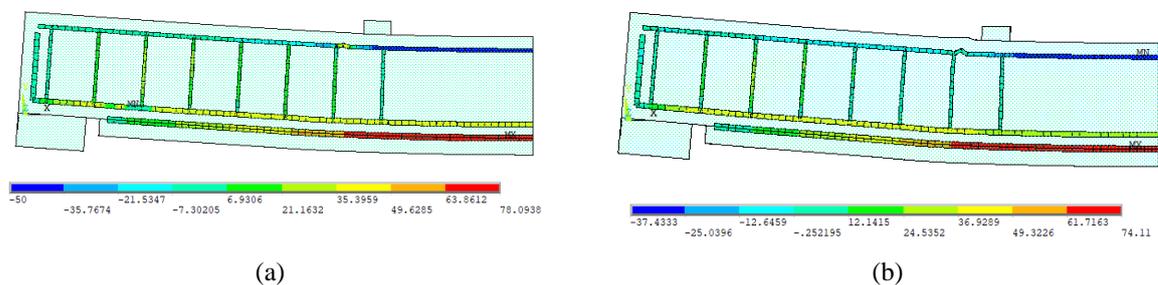
Figura 48 - Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR2



(fonte: elaborada pela autora)

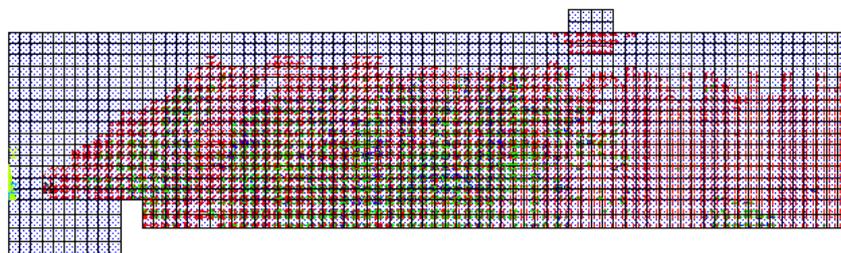
Nas Figuras 49(a) e 49(b) serão apresentadas as tensões nas armaduras da viga VR2, no instante em que ocorre a flambagem na armadura de aço, na região comprimida, e no instante próximo ao final do ensaio. Comparando-se à Figura 37, é possível observar que o local em que ocorreu a flambagem no modelo numérico é muito próximo à região em que houve a flambagem no ensaio.

Figura 49 - (a) Ocorrência da flambagem na armadura superior de aço e (b) Instante próximo ao final do ensaio

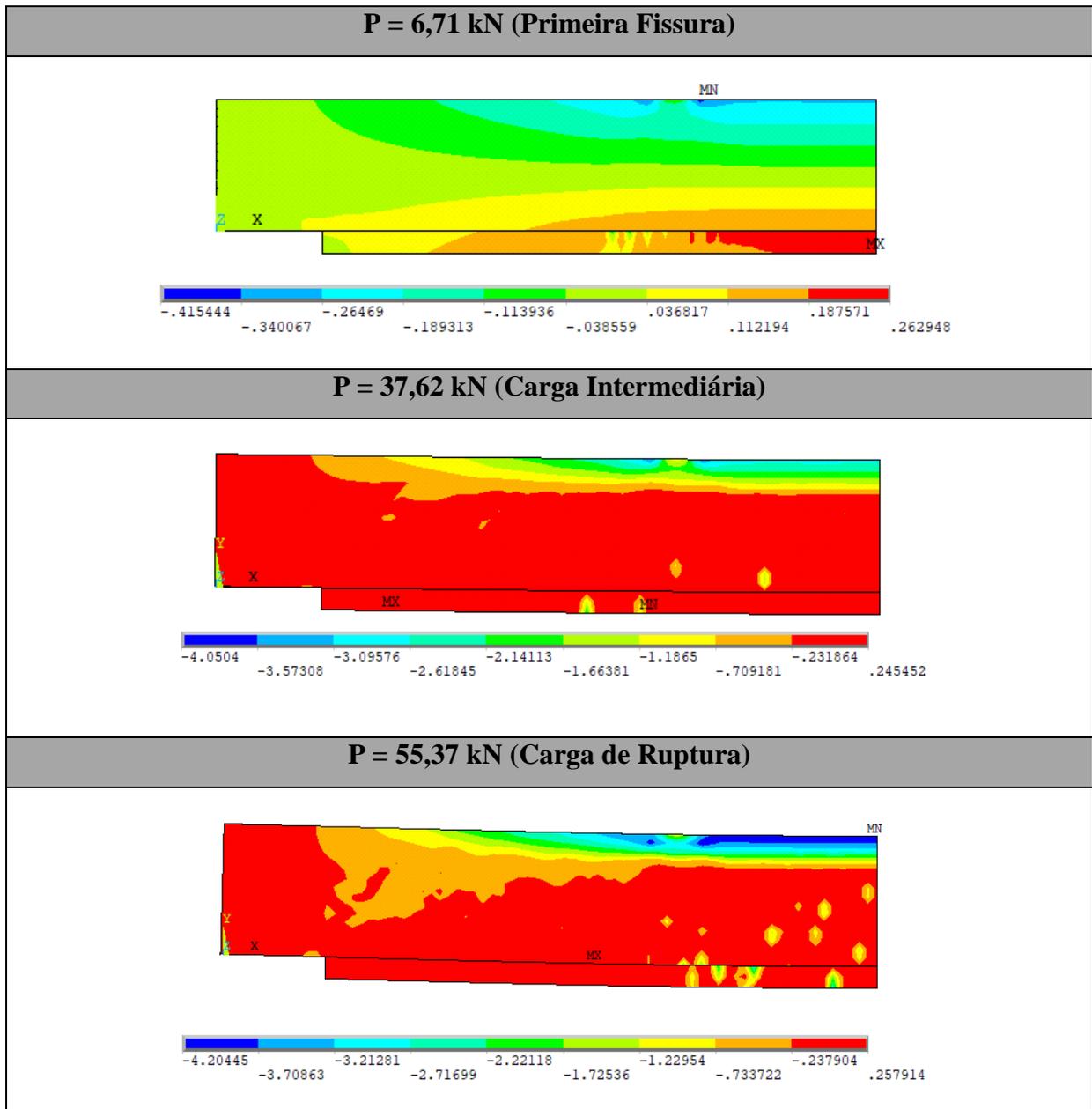


(fonte: elaborada pela autora)

Figura 50 - Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR2



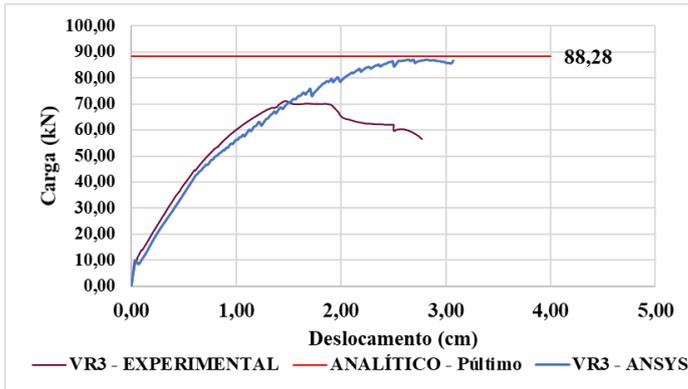
(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 16 - Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR2 (em kN/cm²)

(fonte: elaborada pela autora)

A viga VR3 seguiu o mesmo padrão de comportamento das vigas reforçadas VR1 e VR2, como fica evidenciado no Quadro 17, Figuras 51 a 54 e Quadro 18. Em todas os elementos, a análise numérica acompanhou os resultados experimentais, o que, mais uma vez, indica que o modelo adotado possui boa representatividade.

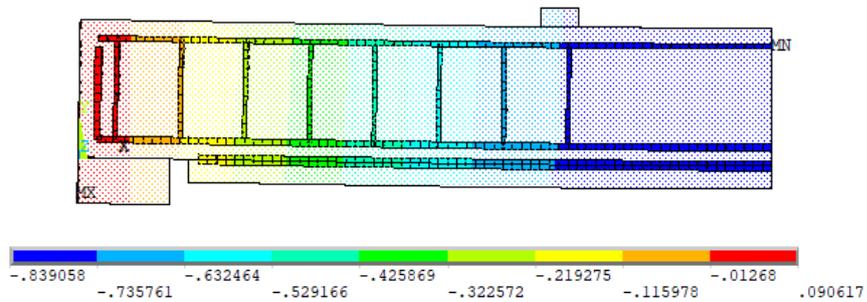
Quadro 17 - Comparação da flecha das viga experimental VR3 com o modelo computacional



CARGA	ANSYS (kN)	EXPERIMENTAL (kN)
1ª FISSURA	5,43	7,98
CARGA DE RUPTURA	51,03	68,66

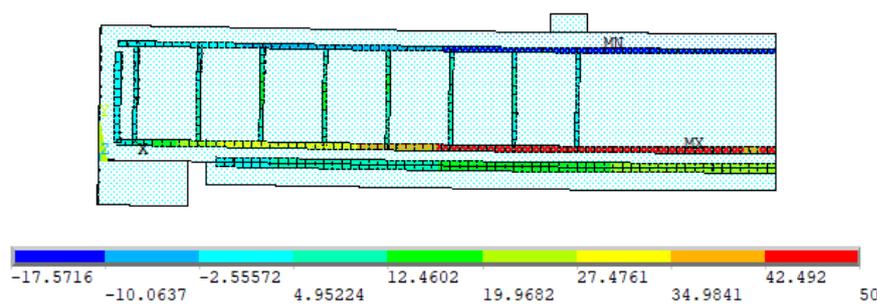
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 51 – Deslocamento vertical na carga de ruptura da VR3



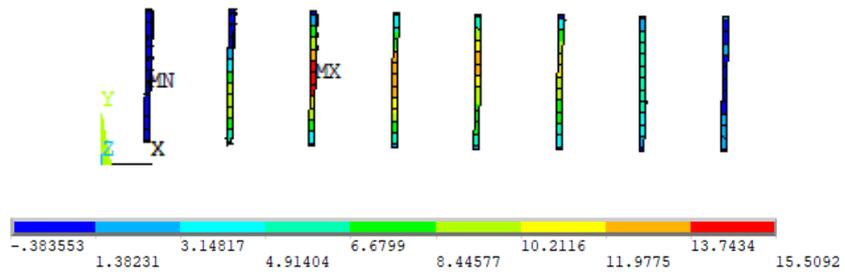
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 52 -Tensão nas armaduras longitudinais na carga de ruptura da viga VR3



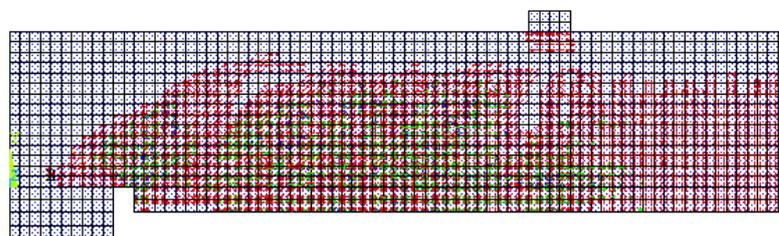
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 53 - Tensão nas armaduras transversais na carga de ruptura da viga VR3



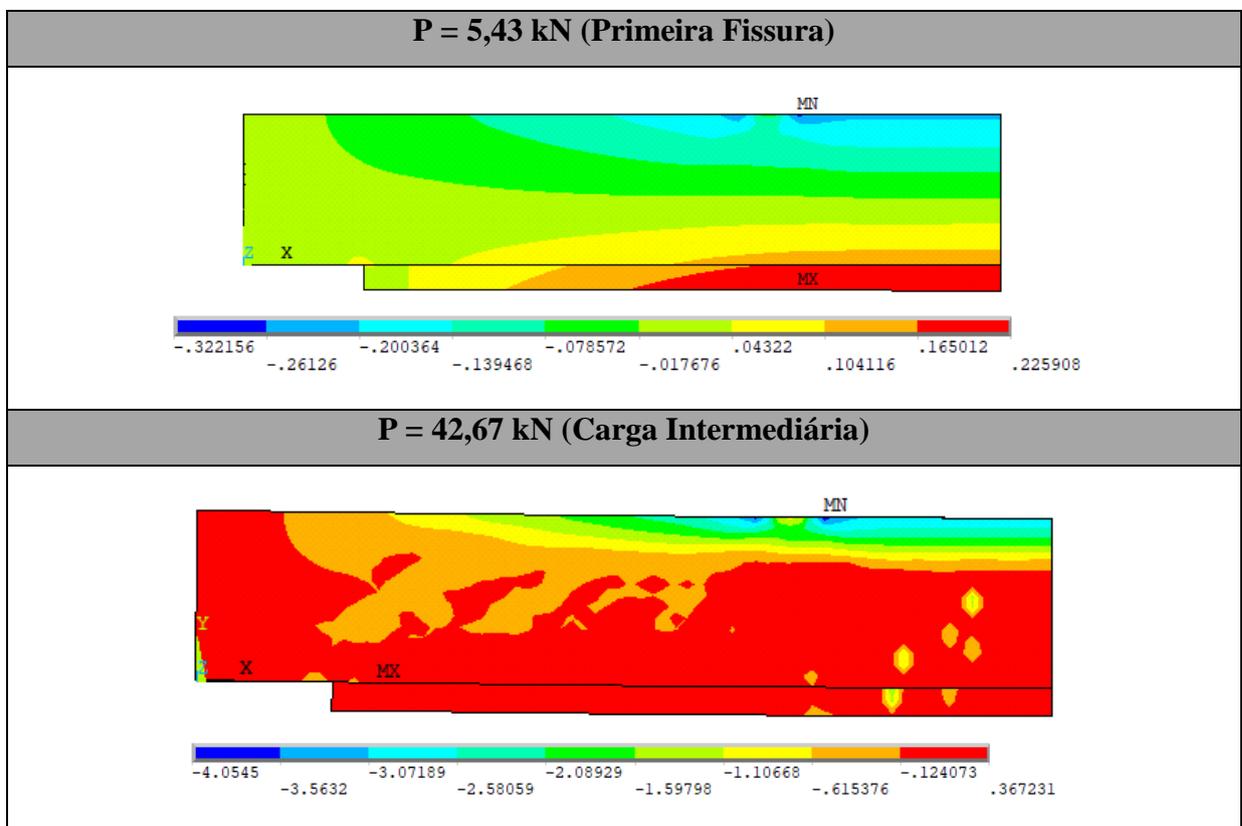
(fonte: elaborada pela autora)

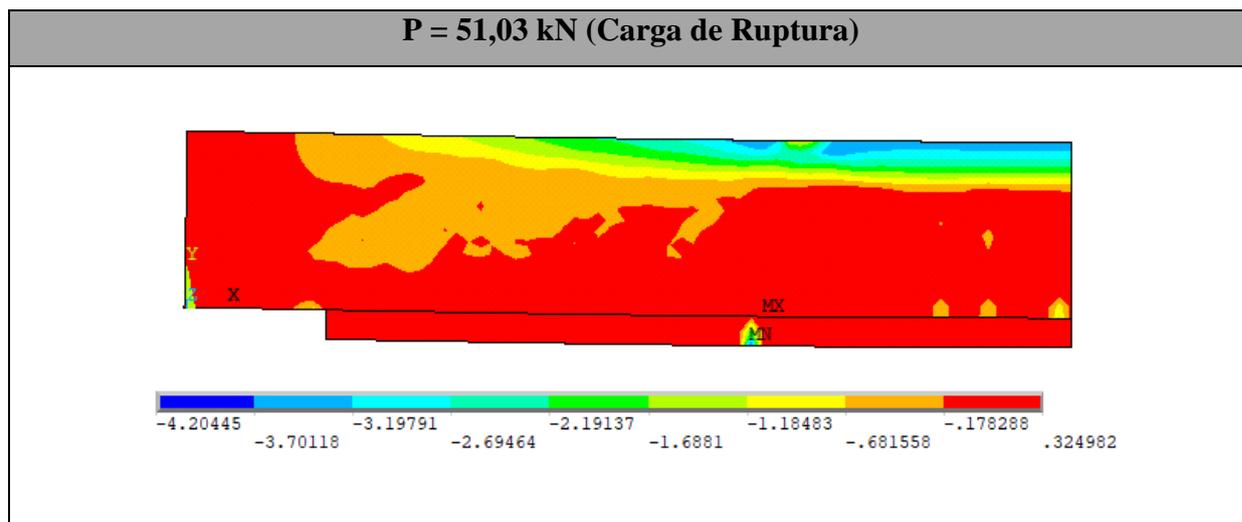
Figura 54 - Diagrama de fissuração na carga de ruptura da viga VR3



(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 18 - Evolução da tensão σ_x no concreto para a viga VR3 (em kN/cm^2)





A partir das análises numéricas realizadas, é possível observar os mecanismos de ruptura para cada viga; em todas, o colapso ocorre por flexão, visto que a armadura longitudinal inferior se encontra no patamar de escoamento enquanto os estribos estão com um baixo solicitação. A partir da evolução das cargas nas vigas, observa-se o deslocamento da linha neutra e o aumento da tensão de tração na estrutura.

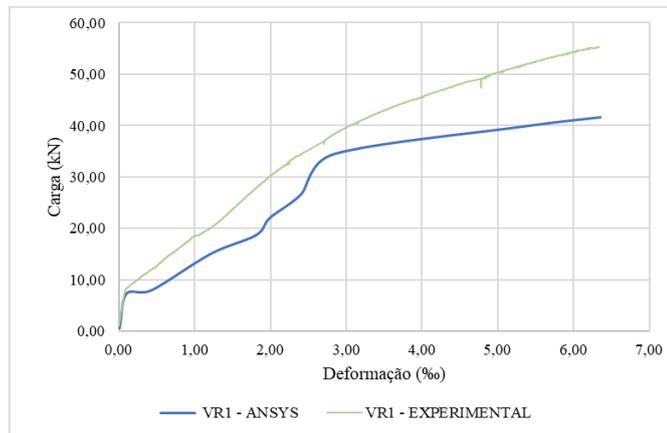
O *software* retrata as fissuras com cor vermelha, como é possível observar nas Figuras 41, 45, 50 e 54. As fissuras por flexão são representadas por retas verticais e ocorrem, principalmente, no centro da viga; já as fissuras inclinadas são características do cisalhamento, observadas mais próximas do apoio. Os trechos com círculos azuis representam o esmagamento do concreto e os círculos verdes mostram aberturas na estrutura.

7.3 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL X NUMÉRICO

Comparou-se a deformação do aço encontrada numericamente com a deformação do aço nas vigas reforçadas. Para tanto, utilizou-se extensômetros nas vigas VR1, VR2, VR3 e VRR3. A partir dos dados encontrados, traçaram-se os gráficos carga x deformação das vigas.

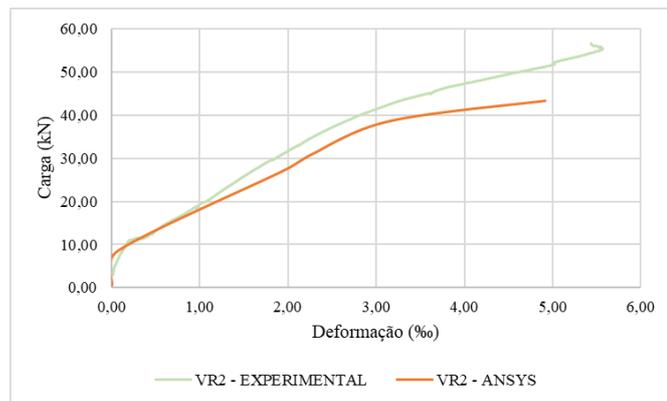
As vigas VR1, VR2 e VR3 experimentais apresentaram maiores cargas para as mesmas deformações, isso pode ser explicado pela fixação da tensão de escoamento do aço em 50 kN/cm² no código numérico. Adotou-se esse valor, por não ter sido possível realizar o ensaio de tração das barras. Geralmente, os aços da ArcelorMittal alcançam valores maiores que os normalizados para escoamento. Devido à análise numérica englobar apenas as vigas VR1, VR2 e VR3, para a viga VRR3 foi apresentado o gráfico carga x deformação para o aço experimental. Os resultados podem ser observados nos Gráficos 3 a 6.

Gráfico 3 - Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VR1 experimental vs. VR1 numérica



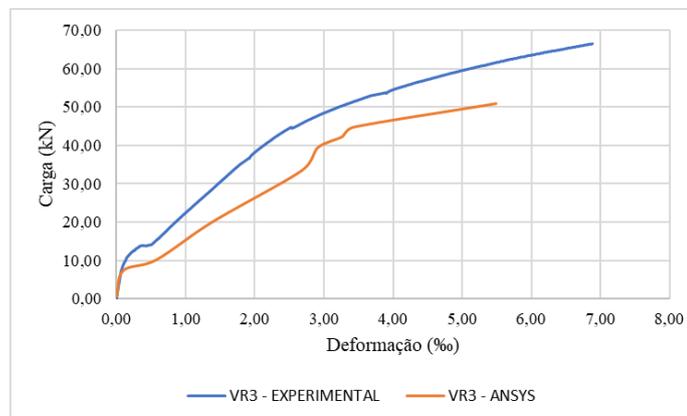
(fonte: elaborada pela autora)

Gráfico 4 - Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VR2 experimental vs. VR2 numérica



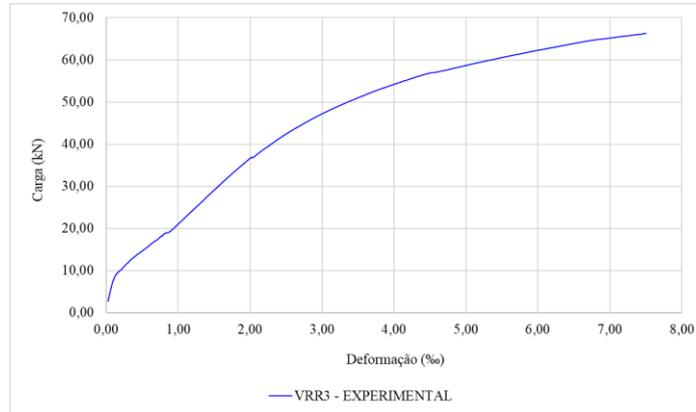
(fonte: elaborada pela autora)

Gráfico 5 - Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VR3 experimental vs. VR3 numérica



(fonte: elaborada pela autora)

Gráfico 6 - Carga x Deformação do aço longitudinal tracionado da viga VRR3 experimental



(fonte: elaborada pela autora)

8 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais relacionadas ao estudo realizado, a relação custo x benefício de utilizar as barras de fibra de vidro como reforço e algumas sugestões para estudos futuros.

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos estudos realizados no *software* ANSYS, foi possível elaborar um modelo computacional considerado satisfatório para simular as tensões e deformações que ocorrem nas vigas testemunho e reforçadas, visto que ao ser exposto às falhas por flexão se obteve um desempenho muito próximo aos resultados experimentais. Um dos aspectos positivos desse programa é possuir uma biblioteca vasta de elementos e com grande capacidade de simular vários comportamentos, tanto estruturais, como em outras análises. Por se tratar de uma ferramenta que demanda grande esforço computacional, para o estudo analisou-se um quarto das estruturas, afim de se reduzir o tempo de processamento de dados.

A avaliação experimental individual dos materiais utilizados é necessária para que se possa entender seus reais comportamentos frente às solicitações; para o cálculo analítico utilizou-se os valores teóricos de tensão de escoamento e módulo de elasticidade das armaduras de aço, as barras de fibra de vidro seguiram os valores disponibilizados pelo fabricante e foi considerada uma aderência perfeita entre elas e a argamassa estrutural. A argamassa estrutural foi ensaiada à compressão simples para se obter a resistência média para a análise numérica. Para a manta de fibra de vidro, também não foram realizadas avaliações mais específicas, sendo considerada uma aderência perfeita entre ela e a superfície da viga; A diferença encontrada nos resultados experimentais e numérico se deu em função das variáveis utilizadas serem embasadas em dados teóricos, nos casos em que não foi possível realizar os ensaios dos materiais.

De um modo geral, as barras de fibra de vidro apresentaram um bom desempenho estrutural como reforço, ratificando que seu uso proporciona elevação na carga de ruptura suportada nas vigas reforçadas, entretanto, essa carga, foi menor que o valor obtido analiticamente, o que corrobora para haja normas específicas de dimensionamento de materiais frágeis.

8.2 RELAÇÃO CUSTO x BENEFÍCIO

É sabido que por se tratar de um material relativamente novo no mercado brasileiro, seu custo elevado ainda é um aspecto importante que reflete no valor percebido por profissionais da área de engenharia. Atualmente, as barras de fibra de vidro são vendidas a R\$ 26,00/kg², podendo esse valor variar em função da demanda. Já as barras de aço são vendidas a R\$ 3,80/kg³, ou seja, as barras de fibra de vidro custam aproximadamente sete vezes mais que às de aço.

A seguir, na Tabela 22(a) e 22(b), serão apresentados o quantitativo das barras não-metálicas utilizadas no reforço e o quantitativo teórico, caso o reforço fosse realizado com as barras de aço. Para a realizar esse estudo, comparou-se barras de diâmetros semelhantes e considerou-se que as barras de fibra de vidro possuem um quarto da massa do aço.

Tabela 22 - (a) Custo de duas barras de aço em função do diâmetro e comprimento e (b) Custo de duas barras de fibra de vidro em função do diâmetro e comprimento

DIÂMETRO	COMPRIMENTO (cm)	MASSA DE 2 BARRAS (kg)	CUSTO (R\$)	DIÂMETRO	COMPRIMENTO (cm)	MASSA DE 2 BARRAS (kg)	CUSTO (R\$)
8 mm	124	1,00	3,80	8 mm	124	0,25	6,50
10 mm	124	2,00	7,60	10 mm	124	0,50	13,00
12,5 mm	124	2,00	7,60	12 mm	124	0,50	13,00

(a)

(b)

(fonte: elaborada pela autora)

É notório que o custo das barras de fibra de vidro é um aspecto extremamente relevante a se considerar, quando da escolha do tipo de material para realizar o reforço estrutural. Para barras de mesmo diâmetro, como as de aço e de fibra de vidro de 8 mm, as Tabelas 22(a) e 22(b) evidencia que as barras de fibra de vidro são, aproximadamente, setenta e um por cento mais caras que às de aço, o que, ainda, não as torna a alternativa mais viável economicamente para se adotar como reforço de vigas de uso comum.

8.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestão de estudo futuro, propõem-se análises que considerem vigas com dimensões mais próximas à realidade e que levem em conta a aderência entre as barras não-metálicas e a manta de fibra de vidro com o material de reforço. Outro aspecto relevante a ser estudado se trata do comprimento de ancoragem e traspasse das barras de fibra de vidro, no reforço, que

² Valor fornecido pela Stratus referente ao mês de junho de 2019.

³ Valor fornecido pela ArcelorMittal de Canoas-RS, referente ao mês de junho de 2019.

não foram abordadas nesse estudo. Sugere-se, também, estudos que avaliem a utilização de estribos de fibra de vidro para reforço de vigas, para teste de sua resistência ao cisalhamento. Visto que é extremamente importante conhecer os mecanismos de colapso estrutural em relação a incêndios, sugere-se verificar o comportamento das barras de fibra de vidro, quando essas são expostas ao fogo e a ambientes com elevadas temperaturas

Estudos vêm sendo realizados por Dalfré na Universidade Federal de São Carlos, acerca dos mecanismos de degradação das estruturas reforçadas com fibras FRP, para tanto, sugere-se uma investigação experimental mais aprofundada direcionada às barras de GFRP, devido a algumas resinas utilizadas nas barras não serem álcali resistentes.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- ALMEIDA, M. A. J.; **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinzas de casca de arroz**. 2017. 344p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (1996) **ACI COMMITTEE 440R** State-of-Report on FIBer Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1996.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (2002) **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, ACI 440.2R-02, Farmington Hills, MI.
- ANSYS, Inc. **Theory reference** (Version 18.2), 2019.
- AURICH, M.; **Modelo da ligação entre concreto e armadura na análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos**. 2001. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- BEBER, A. J.; **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
- BESSA, D. V.; **Estruturas de Concreto Armado I**. Apostila, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.
- CENCI, S.; **Estudo Comparativo de vigas biapoiadas em concreto armado utilizando concreto leve e concreto convencional**, 2018. 72p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model code for concrete structures**. Bulletin D'Information, Paris, July, 1990.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model code 2010**. Bulletin N° 65, 2012.

HELENE, P.; **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

KOCH, C. H.; **Análise por elementos finitos de vigas em concreto armado através do software Ansys**, 2017. 45p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

KUMAHARA, S., MASUDA, Y. & TANANO Y.; **Tensile Strenght of Continuos FIBer Bar under High Temperature**, InternacionaI Symposium on FIBer-Reinforcement-Plastic Reinforcement Concrete Structures, 1993.

KUNZLER, P.S. **Análise paramétrica por elementos finitos de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LAZZARI, B.M.; **Análise por elementos finitos de peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MACHADO, de P. A.; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com fibras de Carbono**, 1. ed. São Paulo, Pini, 2002.

NORA, B. J.; **Análise experimental do concreto têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado**, 2018. 118p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

OLIVEIRA, F. A.; **Análise experimental de Ancoragens de polímeros reforçados com fibras em elementos de concreto armado submetidos à flexão**. 2018. 79p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PARDELA, M. L. S. & DEL AGUILA, A.; **El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas com fibras de vidro**. Revista Materiales de Construcción, vol. 42. N. 226. Abril / mayo / junio, 1992.

PERUZI, de P. A.; **Estudo das alternativas de uso da fibra de vidro sem características álcali resistentes em elementos construtivos de cimento Portland**. 2007. 182f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SORIANO, H. L.; LIMA; S. S. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: EDUSP, 2003.

STRATUS, R.; Especificações e características de vergalhões em fibra de vidro, estribos e estruturas armadas. Stratus, São José dos Campos, 2015.

TAVARES, H. D.; Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de FRP. 2006. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

APÊNDICE A.1 - Exemplo de *script* para viga VT

```

! *****
!
! Programador: Rhaissa Salamoni Vares
! Data: 15/07/19
! unidades: cm, kN
!
! *****
!
/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/title, VIGA RHAISSA RHA1 - VIGA TESTEMUNHO
!
!-----
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
!-----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
!
/GO
!
!-----
!           DEFINIÇÃO ELEMENTOS
!-----
/PREP7
!*
ET,1,SOLID65
!*
ET,2,LINK180
!*
ET,3,SOLID185
!
!-----
!           PARAMETROS DOS MATERIAIS
!-----
!
!-----
! CONCRETO - material 1
!-----
!

```

```

! MATERIAL MODEL - LINEAR ISOTROPIC
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4164.1
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,1,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.313896
TBPT,,0.0002,0.617751
TBPT,,0.0003,0.911333
TBPT,,0.0004,1.194405
TBPT,,0.0005,1.466721
TBPT,,0.0006,1.728027
TBPT,,0.0007,1.978063
TBPT,,0.0008,2.216557
TBPT,,0.0009,2.443232
TBPT,,0.001,2.6578
TBPT,,0.0011,2.859964
TBPT,,0.0012,3.049418
TBPT,,0.0013,3.225844
TBPT,,0.0014,3.388916
TBPT,,0.0015,3.538294
TBPT,,0.0016,3.673629
TBPT,,0.0017,3.794558
TBPT,,0.0018,3.900707
TBPT,,0.0019,3.991687
TBPT,,0.002,4.067098
TBPT,,0.0021,4.126523
TBPT,,0.0022,4.169532
TBPT,,0.0023,4.195679
TBPT,,0.0024,4.2045
TBPT,,0.0025,4.195516
TBPT,,0.0026,4.168229
TBPT,,0.0027,4.122123
TBPT,,0.0028,4.056662
TBPT,,0.0029,3.97129
TBPT,,0.003,3.865427
TBPT,,0.0031,3.738475
TBPT,,0.0032,3.589807
TBPT,,0.0033,3.418775
TBPT,,0.0034,3.224704
TBPT,,0.0035,3.006891
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,1,1,9,

```

```

TBTEMP,0
TBDATA,,0.20,0.40,0.35,-1,,
TBDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! -----
! ARMADURA ATIVA (INFERIOR) - material 2
! -----
!
v1=0.3
ES2 = 21000
FY2 = 50
ES22 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,v1
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY2,ES22,,,,
!
! -----
! ARMADURA PASSIVA (SUPERIOR) - material 3
! -----
!
v2=0.3
ES3 = 21000
FY3 = 50
ES33 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,v2
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!

```

```

TB,BISO,3,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY3,ES33,,,,
!
!-----
! ARMADURA ESTRIBOS - material 4
!-----
!
v3=0.3
ES4 = 21000
FY4 = 60
ES44 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,v3
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,4,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY4,ES44,,,,
!
!-----
! APOIOS E PONTOS DE CARGA - material 5
!-----
v4=0.2
ES5 = 20000
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,ES5
MPDATA,PRXY,5,,v4
!
!-----
!
! GEOMETRIA
!-----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z)
!
BLC4,0,0,75,15,5
BLC4,0,0,10,-5,5
BLC4,50,15,4,2,5
!
K,1000,2,2,3 ! keypoint 1000 em x=2, y=2 e z=3
K,1010,2,13,3
K,1020,2,12,3

```

!
 K,2000,4,2,0 ! keypoint 2000 em x=4, y=2 e z=0
 K,2010,4,2,3
 K,2020,4,13,3
 K,2030,4,13,0
 !
 K,3000,11,2,0 ! keypoint 3000 em x=11, y=2 e z=0
 K,3010,11,2,3
 K,3020,11,13,3
 K,3030,11,13,0
 !
 K,4000,18,2,0 ! keypoint 4000 em x=18, y=2 e z=0
 K,4010,18,2,3
 K,4020,18,13,3
 K,4030,18,13,0
 !
 K,5000,25,2,0 ! keypoint 5000 em x=25, y=2 e z=0
 K,5010,25,2,3
 K,5020,25,13,3
 K,5030,25,13,0
 !
 K,6000,32,2,0 ! keypoint 6000 em x=32, y=2 e z=0
 K,6010,32,2,3
 K,6020,32,13,3
 K,6030,32,13,0
 !
 K,7000,39,2,0 ! keypoint 7000 em x=39, y=2 e z=0
 K,7010,39,2,3
 K,7020,39,13,3
 K,7030,39,13,0
 !
 K,8000,46,2,0 ! keypoint 8000 em x=46, y=2 e z=0
 K,8010,46,2,3
 K,8020,46,13,3
 K,8030,46,13,0
 !
 K,9000,53,2,0 ! keypoint 9000 em x=53, y=2 e z=0
 K,9010,53,2,3
 K,9020,53,13,3
 K,9030,53,13,0
 !
 K,10000,75,2,3
 K,10010,75,13,3
 !
 ! Trançar linhas entre os pontos criados
 !
 ! ESTRIBOS
 !
 LSTR,2000,2010
 LSTR,2010,2020

```

LSTR,2020,2030
!
LSTR,3000,3010
LSTR,3010,3020
LSTR,3020,3030
!
LSTR,4000,4010
LSTR,4010,4020
LSTR,4020,4030
!
LSTR,5000,5010
LSTR,5010,5020
LSTR,5020,5030
!
LSTR,6000,6010
LSTR,6010,6020
LSTR,6020,6030
!
LSTR,7000,7010
LSTR,7010,7020
LSTR,7020,7030
!
LSTR,8000,8010
LSTR,8010,8020
LSTR,8020,8030
!
LSTR,9000,9010
LSTR,9010,9020
LSTR,9020,9030
!
! BARRAS
!
LSTR,1020,1000
LSTR,1000,10000
LSTR,1010,10010
!
! -----
!                               SECTION
! -----
! Definição das espessuras de barras em cm2
!
SECTYPE,2,LINK, ,2
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,3,LINK, ,3
SECDATA,0.312,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,4,LINK, ,4

```

```

SECDATA,0.196,
SECCONTROL,0,0
!
!-----
!                               MESH
!-----
!
!-----
! MESH CONCRETO:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,2, , ,75, , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 75 partes
LESIZE,4, , ,75, , , ,1
LESIZE,5, , ,75, , , ,1
LESIZE,7, , ,75, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,1, , ,15, , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 15 partes
LESIZE,3, , ,15, , , ,1
LESIZE,6, , ,15, , , ,1
LESIZE,8, , ,15, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,9, , ,5, , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,10, , ,5, , , ,1
LESIZE,11, , ,5, , , ,1
LESIZE,12, , ,5, , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,1 !aplica a mesh 1
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----

```

```

!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,14, , ,10, , , , ,1
LESIZE,16, , ,10, , , , ,1
LESIZE,17, , ,10, , , , ,1
LESIZE,19, , ,10, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,13, , ,5, , , , ,1
LESIZE,15, , ,5, , , , ,1
LESIZE,18, , ,5, , , , ,1
LESIZE,20, , ,5, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,21, , ,5, , , , ,1
LESIZE,22, , ,5, , , , ,1
LESIZE,23, , ,5, , , , ,1
LESIZE,24, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,2 !aplica a mesh 2
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x

```

```

!
LESIZE,26, , ,4, , , , ,1
LESIZE,28, , ,4, , , , ,1
LESIZE,29, , ,4, , , , ,1
LESIZE,31, , ,4, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,25, , ,2, , , , ,1
LESIZE,27, , ,2, , , , ,1
LESIZE,30, , ,2, , , , ,1
LESIZE,32, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,33, , ,5, , , , ,1
LESIZE,34, , ,5, , , , ,1
LESIZE,35, , ,5, , , , ,1
LESIZE,36, , ,5, , , , ,1
!
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,3 !aplica a mesh 3
!
!-----
! MESH ARMADURAS - BARRAS LONGITUDINAIS:
!-----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 2
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 2
!
! x
!
LESIZE,61, , ,10, , , , ,1
LESIZE,62, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro

```

```

MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
LMESH,61
LMESH,62
!
! ARMADURA SUPERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 3
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 3
!
! x
!
LESIZE,63, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,63
!
! ESTRIBOS:
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 4
!
! y
!
LESIZE,38, , ,11, , , , ,1
LESIZE,41, , ,11, , , , ,1
LESIZE,44, , ,11, , , , ,1
LESIZE,47, , ,11, , , , ,1
LESIZE,50, , ,11, , , , ,1
LESIZE,53, , ,11, , , , ,1
LESIZE,56, , ,11, , , , ,1
LESIZE,59, , ,11, , , , ,1
!

```

```

! z
!
LESIZE,37, , ,3, , , , ,1
LESIZE,39, , ,3, , , , ,1
LESIZE,40, , ,3, , , , ,1
LESIZE,42, , ,3, , , , ,1
LESIZE,43, , ,3, , , , ,1
LESIZE,45, , ,3, , , , ,1
LESIZE,46, , ,3, , , , ,1
LESIZE,48, , ,3, , , , ,1
LESIZE,49, , ,3, , , , ,1
LESIZE,51, , ,3, , , , ,1
LESIZE,52, , ,3, , , , ,1
LESIZE,54, , ,3, , , , ,1
LESIZE,55, , ,3, , , , ,1
LESIZE,57, , ,3, , , , ,1
LESIZE,58, , ,3, , , , ,1
LESIZE,60, , ,3, , , , ,1
!
LMESH,37
LMESH,38
LMESH,39
LMESH,40
LMESH,41
LMESH,42
LMESH,43
LMESH,44
LMESH,45
LMESH,46
LMESH,47
LMESH,48
LMESH,49
LMESH,50
LMESH,51
LMESH,52
LMESH,53
LMESH,54
LMESH,55
LMESH,56
LMESH,57
LMESH,58
LMESH,59
LMESH,60
LMESH,61
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!

```

```

! Esse comando executa um merge dos nos - elimina nos repetidos
! Faz a renumeracao dos nos
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
! Inspect newly created reinforcing elements
!
esel,s,type,,1
! adjust the translucency level of the
! base element to reveal the embedded reinforcing
! elements
/trlcy,elem,0.9
esel,all
/view,1,1,1,1
! Turn on the expaned element shapes
/eshape,1
eplot
!
! -----
!                               RESTRIÇÕES NOS APOIOS
! -----
!
nset,s,loc,x,5
nset,r,loc,y,-5
d,all,uy
!
DA,6,UX,
DA,1,UZ,
DA,7,UZ,
DA,13,UZ,
allsel
!
! -----
!                               CARREGAMENTO
! -----
! -----
!                               1o CASO DE CARGA - Etapa 1 - Peso Próprio
! -----
!
/PREP7
!
ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
!
! dados da análise:
!
antype,0                !Análise estática
solcontrol,on

```

```

!
autots,on
nlgeom,on
NCNV,2,0,0,0,0      !criterio de parada para terminar a analise
neqit,100
CNVTOL,F, ,0.1,2, ,
CNVTOL,U, ,0.1,2, ,
NSUBST,1,100,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,1
LSWRITE,1,
!
!-----
!      2o CASO DE CARGA - Etapa 2 - Incremento de DESLOCAMENTO
!-----
!
/PREP7
!
nset,s,loc,x,52
nset,r,loc,y,17
nset,r,loc,z,0
d,all,uy,-2.76
allsel
!
antype,0
solcontrol,on
!
autots,on
CNVTOL,F, ,0.6,2, ,
CNVTOL,U, ,0.6,2, ,
NSUBST,200,1000,200
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
time,200
LSWRITE,2,
!

```

APÊNDICE A.2 - *Script* para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento para a viga VT

```

/POST26
!
! Rotina para se fazer o gráfico carga-deslocamento quando se usa incremento de
deslocamento
!
!
*SET,FATOR1,-1.00 ! Fator para multiplicar o deslocamento se necessário (por exemplo:
torna positivos os deslocamentos)
*SET,FATOR2,4.00 ! Fator para multiplicar a carga se necessário (por exemplo: Ptotal =
4xP)
*SET,NNUY,92          ! Número do nó do qual se quer fazer o gráfico carga-
deslocamento (ver listagem dos nós com coordenadas)
!
/AXLAB,Y,CARGA P      ! Label Y
/AXLAB,X,FLECHA UY   ! Label X
NSOL,2,NNUY,U,y      ! Especifica o nó cujo deslocamento Uy vai ser plotado.
NSOL,3,1,U,Z         ! Variável muda, serve para armazenar a soma das reações
(corresponde ao deslocamento UZ do nó 1).
!
NSEL,S,LOC,x,5        ! (escolher a coordenada de onde estão as reações).
NSEL,R,LOC,y,-5
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT ! Captura os números dos nós de onde estão as reações.
*GET,CURNOD,NODE,0,NUM,MIN !Captura as coordenadas dos nós onde estão as
reações de apoio.
!
*DO,I,1,NUMNOD        ! Laço que faz a soma das reações Fy dos nós selecionados
antes.
RFORCE,4,CURNOD,F,y
ADD,3,3,4,SOMA
CURNOD=NDNEXT(CURNOD)
*ENDDO
!
PROD,2,2,,,,,FATOR1   ! Ajuste dos deslocamentos pelo fator FATOR1
PROD,3,3,,,,,FATOR2   ! Ajuste das cargas pelo fator FATOR2
!
XVAR,2                ! Plota os deslocamentos no eixo X
PLVAR,3               ! Plota a carga total no eixo Y Y
!
ALLSEL,ALL
FINISH

```

APÊNDICE B.1 - Exemplo de *script* para viga VR1

```

! *****
!
! Programador: Rhaissa Salamoni Vares
! Data: 15/07/19
! unidades: cm, kN
!
! *****
!
/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/title, VIGA RHAISSA VR1 8mm
!
! -----
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! -----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
!
/GO
!
! -----
!           DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! -----
/PREP7
!*
ET,1,SOLID65
!*
ET,2,LINK180
!*
ET,3,SOLID185
!*
! -----
!           PARAMETROS DOS MATERIAIS
! -----
!
! -----
! CONCRETO - material 1
! -----
!
! MATERIAL MODEL - LINEAR ISOTROPIC

```

```

!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4164.1
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,1,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.313896
TBPT,,0.0002,0.617751
TBPT,,0.0003,0.911333
TBPT,,0.0004,1.194405
TBPT,,0.0005,1.466721
TBPT,,0.0006,1.728027
TBPT,,0.0007,1.978063
TBPT,,0.0008,2.216557
TBPT,,0.0009,2.443232
TBPT,,0.001,2.6578
TBPT,,0.0011,2.859964
TBPT,,0.0012,3.049418
TBPT,,0.0013,3.225844
TBPT,,0.0014,3.388916
TBPT,,0.0015,3.538294
TBPT,,0.0016,3.673629
TBPT,,0.0017,3.794558
TBPT,,0.0018,3.900707
TBPT,,0.0019,3.991687
TBPT,,0.002,4.067098
TBPT,,0.0021,4.126523
TBPT,,0.0022,4.169532
TBPT,,0.0023,4.195679
TBPT,,0.0024,4.2045
TBPT,,0.0025,4.195516
TBPT,,0.0026,4.168229
TBPT,,0.0027,4.122123
TBPT,,0.0028,4.056662
TBPT,,0.0029,3.97129
TBPT,,0.003,3.865427
TBPT,,0.0031,3.738475
TBPT,,0.0032,3.589807
TBPT,,0.0033,3.418775
TBPT,,0.0034,3.224704
TBPT,,0.0035,3.006891
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,0

```

```

TBDATA,,0.20,0.40,0.35,-1,,
TBDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
!-----
! ARMADURA LONGITUDINAL (INFERIOR) - material 2
!-----
!
v1=0.3
ES2 = 21000
FY2 = 50
ES22 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,v1
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY2,ES22,,,,
!
!-----
! ARMADURA LONGITUDINAL (SUPERIOR) - material 3
!-----
!
v2=0.3
ES3 = 21000
FY3 = 50
ES33 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,v2
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,3,1,2,

```

```

TBTEMP,0
TBDATA,,FY3,ES33,,
!
!-----
! ARMADURA ESTRIBOS - material 4
!-----
!
v3=0.3
ES4 = 21000
FY4 = 60
ES44 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,v3
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,4,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY4,ES44,,
!
!-----
! APOIOS E PONTOS DE CARGA - material 5
!-----
!
v4 = 0.2
ES5 = 20000
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,ES5
MPDATA,PRXY,5,,v4
!
!-----
! ARGAMASSA ESTRUTURAL - material 6
!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,6,,4767.1
MPDATA,PRXY,6,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,6,1,35,0
TBTEMP,0

```

```

TBPT,,0.0001,0.354101
TBPT,,0.0002,0.70315
TBPT,,0.0003,1.046867
TBPT,,0.0004,1.38495
TBPT,,0.0005,1.717074
TBPT,,0.0006,2.042887
TBPT,,0.0007,2.362012
TBPT,,0.0008,2.674037
TBPT,,0.0009,2.978519
TBPT,,0.001,3.274976
TBPT,,0.0011,3.562885
TBPT,,0.0012,3.841674
TBPT,,0.0013,4.110722
TBPT,,0.0014,4.369348
TBPT,,0.0015,4.616808
TBPT,,0.0016,4.852283
TBPT,,0.0017,5.074873
TBPT,,0.0018,5.283588
TBPT,,0.0019,5.477329
TBPT,,0.002,5.654883
TBPT,,0.0021,5.814897
TBPT,,0.0022,5.955868
TBPT,,0.0023,6.076114
TBPT,,0.0024,6.173747
TBPT,,0.0025,6.246646
TBPT,,0.0026,6.292413
TBPT,,0.0027,6.308333
TBPT,,0.0028,6.291314
TBPT,,0.0029,6.237821
TBPT,,0.003,6.143797
TBPT,,0.0031,6.004557
TBPT,,0.0032,5.814668
TBPT,,0.0033,5.567788
TBPT,,0.0034,5.256472
TBPT,,0.0035,4.871918
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,6,1,9,
TBTEMP,0
TBDATA,,0.20,0.40,0.46,-1,,
TBDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,6,,2.15E-8
!
! -----

```

```

! BARRA NÃO METÁLICA (FIBRA DE VIDRO - 8 mm) - material 7
!-----
!
v5=0.26
ES7 = 4844
FY7 = 105.47
ES77 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,7,,ES7
MPDATA,PRXY,7,,v5
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,7,1,5,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY7,ES77,,,,
!
!-----
!                               GEOMETRIA
!-----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z)
!
BLC4,0,0,75,15,5
BLC4,0,0,10,-5,5
BLC4,12,0,63,-2.5,5
BLC4,50,15,4,2,5
!
K,1000,2,2,3 ! keypoint 1000 em x=2, y=2 e z=3
K,1010,2,13,3
K,1020,2,12,3
K,1030,13,0,3
!K,1030,13,-1,3
!
K,2000,4,2,0 ! keypoint 2000 em x=4, y=2 e z=0
K,2010,4,2,3
K,2020,4,13,3
K,2030,4,13,0
!
K,3000,11,2,0 ! keypoint 3000 em x=11, y=2 e z=0
K,3010,11,2,3
K,3020,11,13,3
K,3030,11,13,0
!
K,4000,18,2,0 ! keypoint 4000 em x=18, y=2 e z=0
K,4010,18,2,3

```

K,4020,18,13,3
K,4030,18,13,0
!
K,5000,25,2,0 ! keypoint 5000 em $x=25$, $y=2$ e $z=0$
K,5010,25,2,3
K,5020,25,13,3
K,5030,25,13,0
!
K,6000,32,2,0 ! keypoint 6000 em $x=32$, $y=2$ e $z=0$
K,6010,32,2,3
K,6020,32,13,3
K,6030,32,13,0
!
K,7000,39,2,0 ! keypoint 7000 em $x=39$, $y=2$ e $z=0$
K,7010,39,2,3
K,7020,39,13,3
K,7030,39,13,0
!
K,8000,46,2,0 ! keypoint 8000 em $x=46$, $y=2$ e $z=0$
K,8010,46,2,3
K,8020,46,13,3
K,8030,46,13,0
!
K,9000,53,2,0 ! keypoint 9000 em $x=53$, $y=2$ e $z=0$
K,9010,53,2,3
K,9020,53,13,3
K,9030,53,13,0
!
K,10000,75,2,3
K,10010,75,13,3
K,10020,75,0,3
!K,10020,75,-1,3
!
! Trançar linhas entre os pontos criados
!
! ESTRIBOS
!
LSTR,2000,2010
LSTR,2010,2020
LSTR,2020,2030
!
LSTR,3000,3010
LSTR,3010,3020
LSTR,3020,3030
!
LSTR,4000,4010
LSTR,4010,4020
LSTR,4020,4030
!
LSTR,5000,5010

```

LSTR,5010,5020
LSTR,5020,5030
!
LSTR,6000,6010
LSTR,6010,6020
LSTR,6020,6030
!
LSTR,7000,7010
LSTR,7010,7020
LSTR,7020,7030
!
LSTR,8000,8010
LSTR,8010,8020
LSTR,8020,8030
!
LSTR,9000,9010
LSTR,9010,9020
LSTR,9020,9030
!
! BARRAS
!
LSTR,1020,1000
LSTR,1000,10000
LSTR,1010,10010
LSTR,1030,10020
!
!-----
!                               SECTION
!-----
! Definição das espessuras de barras em cm2
!
SECTYPE,2,LINK, ,2
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,3,LINK, ,3
SECDATA,0.312,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,4,LINK, ,4
SECDATA,0.196,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,7,LINK, , 7
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
!-----
!                               MESH
!-----

```

```

!
!-----
! MESH CONCRETO:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,2, , ,75, , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 75 partes
LESIZE,4, , ,75, , , ,1
LESIZE,5, , ,75, , , ,1
LESIZE,7, , ,75, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,1, , ,15, , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 15 partes
LESIZE,3, , ,15, , , ,1
LESIZE,6, , ,15, , , ,1
LESIZE,8, , ,15, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,9, , ,5, , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,10, , ,5, , , ,1
LESIZE,11, , ,5, , , ,1
LESIZE,12, , ,5, , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,1 !aplica a mesh 1
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1

```

```

ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,14, , ,10, , , , ,1
LESIZE,16, , ,10, , , , ,1
LESIZE,17, , ,10, , , , ,1
LESIZE,19, , ,10, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,13, , ,4, , , , ,1
LESIZE,15, , ,4, , , , ,1
LESIZE,18, , ,4, , , , ,1
LESIZE,20, , ,4, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,21, , ,5, , , , ,1
LESIZE,22, , ,5, , , , ,1
LESIZE,23, , ,5, , , , ,1
LESIZE,24, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,2 !aplica a mesh 2
!
!-----
! MESH ARGAMASSA:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 6
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,26, , ,63, , , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 63 partes
LESIZE,28, , ,63, , , , ,1
LESIZE,29, , ,63, , , , ,1
LESIZE,31, , ,63, , , , ,1
!

```

```

! y
!
LESIZE,25, , ,2, , , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 2 partes
LESIZE,27, , ,2, , , , ,1
LESIZE,30, , ,2, , , , ,1
LESIZE,32, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,33, , ,5, , , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,34, , ,5, , , , ,1
LESIZE,35, , ,5, , , , ,1
LESIZE,36, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,3 !aplica a mesh 3
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,38, , ,4, , , , ,1
LESIZE,40, , ,4, , , , ,1
LESIZE,41, , ,4, , , , ,1
LESIZE,43, , ,4, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,37, , ,2, , , , ,1
LESIZE,39, , ,2, , , , ,1
LESIZE,42, , ,2, , , , ,1
LESIZE,44, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,45, , ,5, , , , ,1

```

```

LESIZE,46, , ,5, , , , ,1
LESIZE,47, , ,5, , , , ,1
LESIZE,48, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,4 !aplica a mesh 4
!
!-----
! MESH ARMADURAS - BARRAS LONGITUDINAIS:
!-----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 2
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 2
!
! x
!
LESIZE,73, , ,10, , , , ,1
LESIZE,74, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,73
LMESH,74
!
! ARMADURA SUPERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 3
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 3
!
! x
!

```

```

LESIZE,75, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,75
!
!-----
! MESH BARRAS NÃO METÁLICAS - FIBRA DE VIDRO 8mm:
!-----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 7
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 7
!
! x
!
LESIZE,76, , ,62, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,76
!
!-----
! ESTRIBOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 4
!
! y
!
LESIZE,50, , ,11, , , , ,1
LESIZE,53, , ,11, , , , ,1

```

```
LESIZE,56, , ,11, , , , ,1
LESIZE,59, , ,11, , , , ,1
LESIZE,62, , ,11, , , , ,1
LESIZE,65, , ,11, , , , ,1
LESIZE,68, , ,11, , , , ,1
LESIZE,71, , ,11, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,49, , ,3, , , , ,1
LESIZE,51, , ,3, , , , ,1
LESIZE,52, , ,3, , , , ,1
LESIZE,54, , ,3, , , , ,1
LESIZE,55, , ,3, , , , ,1
LESIZE,57, , ,3, , , , ,1
LESIZE,58, , ,3, , , , ,1
LESIZE,60, , ,3, , , , ,1
LESIZE,61, , ,3, , , , ,1
LESIZE,63, , ,3, , , , ,1
LESIZE,64, , ,3, , , , ,1
LESIZE,66, , ,3, , , , ,1
LESIZE,67, , ,3, , , , ,1
LESIZE,69, , ,3, , , , ,1
LESIZE,70, , ,3, , , , ,1
LESIZE,72, , ,3, , , , ,1
!
LMESH,49
LMESH,50
LMESH,51
LMESH,52
LMESH,53
LMESH,54
LMESH,55
LMESH,56
LMESH,57
LMESH,58
LMESH,59
LMESH,60
LMESH,61
LMESH,62
LMESH,63
LMESH,64
LMESH,65
LMESH,66
LMESH,67
LMESH,68
LMESH,69
LMESH,70
LMESH,71
LMESH,72
```

```

LMESH,73
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
! Esse comando executa um merge dos nos - elimina nos repetidos
! Faz a renumeracao dos nos
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
! Inspect newly created reinforcing elements
!
esel,s,type,,1
! adjust the translucency level of the
! base element to reveal the embedded reinforcing
! elements
/trlcy,elem,0.9
esel,all
/view,1,1,1,1
! Turn on the expaned element shapes
/eshape,1
eplot
!
! -----
!                               RESTRIÇÕES NOS APOIOS
! -----
!
nset,s,loc,x,5
nset,r,loc,y,-5
d,all,uy
!
DA,6,UX,
DA,18,UX,
DA,1,UZ,
DA,19,UZ,
DA,7,UZ,
DA,13,UZ,
allsel
!
! -----
!                               CARREGAMENTO
! -----
!
! -----
!                               1o CASO DE CARGA - Etapa 1 - Peso Próprio
! -----
!

```

```

/PREP7
!
ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
!
! dados da análise:
!
antype,0           !Análise estática
solcontrol,on
!
autots,on
nlgeom,on
NCNV,2,0,0,0      !criterio de parada para terminar a analise
neqit,100
CNVTOL,F, ,0.1,2, ,
CNVTOL,U, ,0.1,2, ,
NSUBST,1,100,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQLV,SPAR
LNSRCH,0
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,1
LSWRITE,1,
!
! -----
!      2o CASO DE CARGA - Etapa 2 - Incremento de DESLOCAMENTO
! -----
!
/PREP7
!
nset,s,loc,x,52
nset,r,loc,y,17
nset,r,loc,z,0
d,all,uy,-2.31
allsel
!
antype,0
solcontrol,on
!
autots,on
CNVTOL,F, ,0.6,2, ,
CNVTOL,U, ,0.6,2, ,
NSUBST,200,1000,200
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQLV,SPAR

```

```
LNSRCH,0  
NCNV,2,0,0,0,0  
NEQIT,100  
!  
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1  
time,200  
LSWRITE,2,  
!
```

APÊNDICE B.2 – *Script* para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR1

```

/POST26
!
! Rotina para se fazer o gráfico carga-deslocamento quando se usa incremento de
deslocamento
!
!
*SET,FATOR1,-1.00 ! Fator para multiplicar o deslocamento se necessário (por exemplo:
torna positivos os deslocamentos)
*SET,FATOR2,4.00 ! Fator para multiplicar a carga se necessário (por exemplo: Ptotal =
4xP)
*SET,NNUY,7563 ! Número do nó do qual se quer fazer o gráfico carga-
deslocamento (ver listagem dos nós com coordenadas)
!
/AXLAB,Y,CARGA P ! Label Y
/AXLAB,X,FLECHA UY ! Label X
NSOL,2,NNUY,U,y ! Especifica o nó cujo deslocamento Uy vai ser plotado.
NSOL,3,1,U,Z ! Variável muda, serve para armazenar a soma das reações
(corresponde ao deslocamento UZ do nó 1).
!
NSEL,S,LOC,x,5 ! (escolher a coordenada de onde estão as reações).
NSEL,R,LOC,y,-5
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT ! Captura os números dos nós de onde estão as reações.
*GET,CURNOD,NODE,0,NUM,MIN ! Captura as coordenadas dos nós onde estão as
reações de apoio.
!
*DO,I,1,NUMNOD ! Laço que faz a soma das reações Fy dos nós selecionados
antes.
RFORCE,4,CURNOD,F,y
ADD,3,3,4,SOMA
CURNOD=NDNEXT(CURNOD)
*ENDDO
!
PROD,2,2,,,,,FATOR1 ! Ajuste dos deslocamentos pelo fator FATOR1
PROD,3,3,,,,,FATOR2 ! Ajuste das cargas pelo fator FATOR2
!
XVAR,2 ! Plota os deslocamentos no eixo X
PLVAR,3 ! Plota a carga total no eixo Y Y
!
ALLSEL,ALL
FINISH

```

APÊNDICE C.1 – Exemplo de *script* para viga VR2

```

! *****
!
! Programador: Rhaissa Salamoni Vares
! Data: 20/07/19
! unidades: cm, kN
!
! *****
!
/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/title, VIGA RHAISSA VR2 10mm
!
! -----
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! -----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
!
/GO
!
! -----
!           DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! -----
/PREP7
!*
ET,1,SOLID65
!*
ET,2,LINK180
!*
ET,3,SOLID185
!*
! -----
!           PARAMETROS DOS MATERIAIS
! -----
!
! -----
! CONCRETO - material 1
! -----
!
! MATERIAL MODEL - LINEAR ISOTROPIC
!

```

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4164.1
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,1,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.313896
TBPT,,0.0002,0.617751
TBPT,,0.0003,0.911333
TBPT,,0.0004,1.194405
TBPT,,0.0005,1.466721
TBPT,,0.0006,1.728027
TBPT,,0.0007,1.978063
TBPT,,0.0008,2.216557
TBPT,,0.0009,2.443232
TBPT,,0.001,2.6578
TBPT,,0.0011,2.859964
TBPT,,0.0012,3.049418
TBPT,,0.0013,3.225844
TBPT,,0.0014,3.388916
TBPT,,0.0015,3.538294
TBPT,,0.0016,3.673629
TBPT,,0.0017,3.794558
TBPT,,0.0018,3.900707
TBPT,,0.0019,3.991687
TBPT,,0.002,4.067098
TBPT,,0.0021,4.126523
TBPT,,0.0022,4.169532
TBPT,,0.0023,4.195679
TBPT,,0.0024,4.2045
TBPT,,0.0025,4.195516
TBPT,,0.0026,4.168229
TBPT,,0.0027,4.122123
TBPT,,0.0028,4.056662
TBPT,,0.0029,3.97129
TBPT,,0.003,3.865427
TBPT,,0.0031,3.738475
TBPT,,0.0032,3.589807
TBPT,,0.0033,3.418775
TBPT,,0.0034,3.224704
TBPT,,0.0035,3.006891
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,0
TBDATA,,0.20,0.40,0.35,-1,,
```

```

TBDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! -----
! ARMADURA LONGITUDINAL (INFERIOR) - material 2
! -----
!
v1=0.3
ES2 = 21000
FY2 = 50
ES22 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,v1
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY2,ES22,,
!
! -----
! ARMADURA LONGITUDINAL (SUPERIOR) - material 3
! -----
!
v2=0.3
ES3 = 21000
FY3 = 50
ES33 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,v2
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,3,1,2,
TBTEMP,0

```

```

TBDATA,,FY3,ES33,,
!
!-----
! ARMADURA ESTRIBOS - material 4
!-----
!
v3=0.3
ES4 = 21000
FY4 = 60
ES44 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,v3
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,4,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY4,ES44,,
!
!-----
! APOIOS E PONTOS DE CARGA - material 5
!-----
!
v4 = 0.2
ES5 = 20000
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,ES5
MPDATA,PRXY,5,,v4
!
!-----
! ARGAMASSA ESTRUTURAL - material 6
!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,6,,4713.04
MPDATA,PRXY,6,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,6,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.34565

```

```

TBPT,,0.0002,0.686128
TBPT,,0.0003,1.021154
TBPT,,0.0004,1.350432
TBPT,,0.0005,1.673643
TBPT,,0.0006,1.990442
TBPT,,0.0007,2.300459
TBPT,,0.0008,2.603294
TBPT,,0.0009,2.898518
TBPT,,0.001,3.185662
TBPT,,0.0011,3.464222
TBPT,,0.0012,3.733649
TBPT,,0.0013,3.993347
TBPT,,0.0014,4.242666
TBPT,,0.0015,4.480898
TBPT,,0.0016,4.707269
TBPT,,0.0017,4.920931
TBPT,,0.0018,5.120952
TBPT,,0.0019,5.306308
TBPT,,0.002,5.47587
TBPT,,0.0021,5.62839
TBPT,,0.0022,5.762483
TBPT,,0.0023,5.876612
TBPT,,0.0024,5.969063
TBPT,,0.0025,6.037922
TBPT,,0.0026,6.08104
TBPT,,0.0027,6.096
TBPT,,0.0028,6.080073
TBPT,,0.0029,6.030166
TBPT,,0.003,5.942757
TBPT,,0.0031,5.813822
TBPT,,0.0032,5.638738
TBPT,,0.0033,5.41217
TBPT,,0.0034,5.127929
TBPT,,0.0035,4.778791
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,6,1,9,
TBTEMP,0
TBDDATA,,0.20,0.40,0.34,-1,,
TBDDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDDATA,DENS,6,,2.15E-8
!
! -----
! BARRA NÃO METÁLICA (FIBRA DE VIDRO - 10 mm) - material 7

```

```

!-----
!
v5=0.26
ES7 = 4844
FY7 = 102.77
ES77 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,7,,ES7
MPDATA,PRXY,7,,v5
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,7,1,5,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY7,ES77,,,,
!
!-----
!
!-----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z)
!
BLC4,0,0,75,15,5
BLC4,0,0,10,-5,5
BLC4,12,0,63,-2.5,5
BLC4,50,15,4,2,5
!
K,1000,2,2,3 ! keypoint 1000 em x=2, y=2 e z=3
K,1010,2,13,3
K,1020,2,12,3
K,1030,13,0,3
!K,1030,13,-1,3
!
K,2000,4,2,0 ! keypoint 2000 em x=4, y=2 e z=0
K,2010,4,2,3
K,2020,4,13,3
K,2030,4,13,0
!
K,3000,11,2,0 ! keypoint 3000 em x=11, y=2 e z=0
K,3010,11,2,3
K,3020,11,13,3
K,3030,11,13,0
!
K,4000,18,2,0 ! keypoint 4000 em x=18, y=2 e z=0
K,4010,18,2,3
K,4020,18,13,3

```

K,4030,18,13,0
!
K,5000,25,2,0 ! keypoint 5000 em x=25, y=2 e z=0
K,5010,25,2,3
K,5020,25,13,3
K,5030,25,13,0
!
K,6000,32,2,0 ! keypoint 6000 em x=32, y=2 e z=0
K,6010,32,2,3
K,6020,32,13,3
K,6030,32,13,0
!
K,7000,39,2,0 ! keypoint 7000 em x=39, y=2 e z=0
K,7010,39,2,3
K,7020,39,13,3
K,7030,39,13,0
!
K,8000,46,2,0 ! keypoint 8000 em x=46, y=2 e z=0
K,8010,46,2,3
K,8020,46,13,3
K,8030,46,13,0
!
K,9000,53,2,0 ! keypoint 9000 em x=53, y=2 e z=0
K,9010,53,2,3
K,9020,53,13,3
K,9030,53,13,0
!
K,10000,75,2,3
K,10010,75,13,3
K,10020,75,0,3
!K,10020,75,-1,3
!
! Traçar linhas entre os pontos criados
!
! ESTRIBOS
!
LSTR,2000,2010
LSTR,2010,2020
LSTR,2020,2030
!
LSTR,3000,3010
LSTR,3010,3020
LSTR,3020,3030
!
LSTR,4000,4010
LSTR,4010,4020
LSTR,4020,4030
!
LSTR,5000,5010
LSTR,5010,5020

```

LSTR,5020,5030
!
LSTR,6000,6010
LSTR,6010,6020
LSTR,6020,6030
!
LSTR,7000,7010
LSTR,7010,7020
LSTR,7020,7030
!
LSTR,8000,8010
LSTR,8010,8020
LSTR,8020,8030
!
LSTR,9000,9010
LSTR,9010,9020
LSTR,9020,9030
!
! BARRAS
!
LSTR,1020,1000
LSTR,1000,10000
LSTR,1010,10010
LSTR,1030,10020
!
! -----
!                               SECTION
! -----
! Definição das espessuras de barras em cm2
!
SECTYPE,2,LINK, ,2
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,3,LINK, ,3
SECDATA,0.312,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,4,LINK, ,4
SECDATA,0.196,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,7,LINK, , 7
SECDATA,0.785,
SECCONTROL,0,0
!
! -----
!                               MESH
! -----
!

```

```

!-----
! MESH CONCRETO:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,2, , ,75, , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 75 partes
LESIZE,4, , ,75, , , ,1
LESIZE,5, , ,75, , , ,1
LESIZE,7, , ,75, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,1, , ,15, , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 15 partes
LESIZE,3, , ,15, , , ,1
LESIZE,6, , ,15, , , ,1
LESIZE,8, , ,15, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,9, , ,5, , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,10, , ,5, , , ,1
LESIZE,11, , ,5, , , ,1
LESIZE,12, , ,5, , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,1 !aplica a mesh 1
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL,1
ESYS, 0

```

```

SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,14, , ,10, , , ,1
LESIZE,16, , ,10, , , ,1
LESIZE,17, , ,10, , , ,1
LESIZE,19, , ,10, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,13, , ,4, , , ,1
LESIZE,15, , ,4, , , ,1
LESIZE,18, , ,4, , , ,1
LESIZE,20, , ,4, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,21, , ,5, , , ,1
LESIZE,22, , ,5, , , ,1
LESIZE,23, , ,5, , , ,1
LESIZE,24, , ,5, , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,2 !aplica a mesh 2
!
!-----
! MESH ARGAMASSA:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 6
REAL,1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,26, , ,63, , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 63 partes
LESIZE,28, , ,63, , , ,1
LESIZE,29, , ,63, , , ,1
LESIZE,31, , ,63, , , ,1
!
! y

```

```

!
LESIZE,25, , ,2, , , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 2 partes
LESIZE,27, , ,2, , , , ,1
LESIZE,30, , ,2, , , , ,1
LESIZE,32, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,33, , ,5, , , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,34, , ,5, , , , ,1
LESIZE,35, , ,5, , , , ,1
LESIZE,36, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,3 !aplica a mesh 3
!
! -----
! MESH APOIOS:
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,38, , ,4, , , , ,1
LESIZE,40, , ,4, , , , ,1
LESIZE,41, , ,4, , , , ,1
LESIZE,43, , ,4, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,37, , ,2, , , , ,1
LESIZE,39, , ,2, , , , ,1
LESIZE,42, , ,2, , , , ,1
LESIZE,44, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,45, , ,5, , , , ,1
LESIZE,46, , ,5, , , , ,1

```

```

LESIZE,47, , ,5, , , , ,1
LESIZE,48, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,4 !aplica a mesh 4
!
!-----
! MESH ARMADURAS - BARRAS LONGITUDINAIS:
!-----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 2
REAL,0
ESYS,0
SECNUM, 2
!
! x
!
LESIZE,73, , ,10, , , , ,1
LESIZE,74, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,73
LMESH,74
!
! ARMADURA SUPERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 3
REAL,0
ESYS,0
SECNUM, 3
!
! x
!
LESIZE,75, , ,73, , , , ,1

```

```

!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,75
!
! -----
! MESH BARRAS NÃO METÁLICAS - FIBRA DE VIDRO 10mm:
! -----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 7
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 7
!
! x
!
LESIZE,76, , ,62, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,76
!
! -----
! ESTRIBOS:
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 4
!
! y
!
LESIZE,50, , ,11, , , , ,1
LESIZE,53, , ,11, , , , ,1
LESIZE,56, , ,11, , , , ,1

```

```
LESIZE,59, , ,11, , , , ,1
LESIZE,62, , ,11, , , , ,1
LESIZE,65, , ,11, , , , ,1
LESIZE,68, , ,11, , , , ,1
LESIZE,71, , ,11, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,49, , ,3, , , , ,1
LESIZE,51, , ,3, , , , ,1
LESIZE,52, , ,3, , , , ,1
LESIZE,54, , ,3, , , , ,1
LESIZE,55, , ,3, , , , ,1
LESIZE,57, , ,3, , , , ,1
LESIZE,58, , ,3, , , , ,1
LESIZE,60, , ,3, , , , ,1
LESIZE,61, , ,3, , , , ,1
LESIZE,63, , ,3, , , , ,1
LESIZE,64, , ,3, , , , ,1
LESIZE,66, , ,3, , , , ,1
LESIZE,67, , ,3, , , , ,1
LESIZE,69, , ,3, , , , ,1
LESIZE,70, , ,3, , , , ,1
LESIZE,72, , ,3, , , , ,1
!
LMESH,49
LMESH,50
LMESH,51
LMESH,52
LMESH,53
LMESH,54
LMESH,55
LMESH,56
LMESH,57
LMESH,58
LMESH,59
LMESH,60
LMESH,61
LMESH,62
LMESH,63
LMESH,64
LMESH,65
LMESH,66
LMESH,67
LMESH,68
LMESH,69
LMESH,70
LMESH,71
LMESH,72
LMESH,73
```

```

!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
! Esse comando executa um merge dos nos - elimina nos repetidos
! Faz a renumeração dos nos
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
! Inspect newly created reinforcing elements
!
esel,s,type,,1
! adjust the translucency level of the
! base element to reveal the embedded reinforcing
! elements
/trlcy,elem,0.9
esel,all
/view,1,1,1,1
! Turn on the expanded element shapes
/eshape,1
eplot
!
! -----
!                               RESTRIÇÕES NOS APOIOS
! -----
!
nset,s,loc,x,5
nset,r,loc,y,-5
d,all,uy
DA,6,UX,
DA,18,UX,
DA,1,UZ,
DA,19,UZ,
DA,7,UZ,
DA,13,UZ,
allsel
!
! -----
!                               CARREGAMENTO
! -----
!
! -----
!                               1o CASO DE CARGA - Etapa 1 - Peso Próprio
! -----
!
/PREP7
!

```

```

ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
!
! dados da análise:
!
antype,0          !Análise estática
solcontrol,on
!
autots,on
nlgeom,on
NCNV,2,0,0,0,0   !criterio de parada para terminar a analise
neqit,100
CNVTOL,F, ,0.1,2, ,
CNVTOL,U, ,0.1,2, ,
NSUBST,1,100,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,1
LSWRITE,1,
!
! -----
!           2o CASO DE CARGA - Etapa 2 - Incremento de DESLOCAMENTO
! -----
!
/PREP7
!
nselect,s,loc,x,52
nselect,r,loc,y,17
nselect,r,loc,z,0
d,all,uy,-3.64
allselect
!
antype,0
solcontrol,on
!
autots,on
CNVTOL,F, ,0.6,2, ,
CNVTOL,U, ,0.6,2, ,
NSUBST,200,1000,200
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0

```

```
NEQIT,100  
!  
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1  
time,200  
LSWRITE,2,  
!
```

APÊNDICE C.2 - *Script* para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR2

```

/POST26
!
! Rotina para se fazer o gráfico carga-deslocamento quando se usa incremento de
deslocamento
!
!
*SET,FATOR1,-1.00 ! Fator para multiplicar o deslocamento se necessário (por exemplo:
torna positivos os deslocamentos)
*SET,FATOR2,4.00 ! Fator para multiplicar a carga se necessário (por exemplo: Ptotal =
4xP)
*SET,NNUY,7563 ! Número do nó do qual se quer fazer o gráfico carga-
deslocamento (ver listagem dos nós com coordenadas)
!
/AXLAB,Y,CARGA P ! Label Y
/AXLAB,X,FLECHA UY ! Label X
NSOL,2,NNUY,U,y ! Especifica o nó cujo deslocamento Uy vai ser plotado.
NSOL,3,1,U,Z ! Variável muda, serve para armazenar a soma das reações
(corresponde ao deslocamento UZ do nó 1).
!
NSEL,S,LOC,x,5 ! (escolher a coordenada de onde estão as reações).
NSEL,R,LOC,y,-5
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT ! Captura os números dos nós de onde estão as reações.
*GET,CURNOD,NODE,0,NUM,MIN !Captura as coordenadas dos nós onde estão as
reações de apoio.
!
*DO,I,1,NUMNOD ! Laço que faz a soma das reações Fy dos nós selecionados
antes.
RFORCE,4,CURNOD,F,y
ADD,3,3,4,SOMA
CURNOD=NDNEXT(CURNOD)
*ENDDO
!
PROD,2,2,,,,,FATOR1 ! Ajuste dos deslocamentos pelo fator FATOR1
PROD,3,3,,,,,FATOR2 ! Ajuste das cargas pelo fator FATOR2
!
XVAR,2 ! Plota os deslocamentos no eixo X
PLVAR,3 ! Plota a carga total no eixo Y Y
!
ALLSEL,ALL
FINISH

```

APÊNDICE D.1 - Exemplo de *script* para viga VR3

```

! *****
!
! Programador: Rhaissa Salamoni Vares
! Data: 20/07/19
! unidades: cm, kN
!
! *****
!
/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/title, VIGA RHAISSA VR3 12mm
!
! -----
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! -----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
!
/GO
!
! -----
!           DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! -----
/PREP7
!*
ET,1,SOLID65
!*
ET,2,LINK180
!*
ET,3,SOLID185
!*
! -----
!           PARAMETROS DOS MATERIAIS
! -----
!
! -----
! CONCRETO - material 1
! -----
!
! MATERIAL MODEL - LINEAR ISOTROPIC
!

```

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4164.1
MPDATA,PRXY,1,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,1,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.313896
TBPT,,0.0002,0.617751
TBPT,,0.0003,0.911333
TBPT,,0.0004,1.194405
TBPT,,0.0005,1.466721
TBPT,,0.0006,1.728027
TBPT,,0.0007,1.978063
TBPT,,0.0008,2.216557
TBPT,,0.0009,2.443232
TBPT,,0.001,2.6578
TBPT,,0.0011,2.859964
TBPT,,0.0012,3.049418
TBPT,,0.0013,3.225844
TBPT,,0.0014,3.388916
TBPT,,0.0015,3.538294
TBPT,,0.0016,3.673629
TBPT,,0.0017,3.794558
TBPT,,0.0018,3.900707
TBPT,,0.0019,3.991687
TBPT,,0.002,4.067098
TBPT,,0.0021,4.126523
TBPT,,0.0022,4.169532
TBPT,,0.0023,4.195679
TBPT,,0.0024,4.2045
TBPT,,0.0025,4.195516
TBPT,,0.0026,4.168229
TBPT,,0.0027,4.122123
TBPT,,0.0028,4.056662
TBPT,,0.0029,3.97129
TBPT,,0.003,3.865427
TBPT,,0.0031,3.738475
TBPT,,0.0032,3.589807
TBPT,,0.0033,3.418775
TBPT,,0.0034,3.224704
TBPT,,0.0035,3.006891
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,0
TBDATA,,0.20,0.40,0.35,-1,,
```

```

TBDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! -----
! ARMADURA LONGITUDINAL (INFERIOR) - material 2
! -----
!
v1=0.3
ES2 = 21000
FY2 = 50
ES22 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2
MPDATA,PRXY,2,,v1
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY2,ES22,,
!
! -----
! ARMADURA LONGITUDINAL (SUPERIOR) - material 3
! -----
!
v2=0.3
ES3 = 21000
FY3 = 50
ES33 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,v2
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,3,1,2,
TBTEMP,0

```

```

TBDATA,,FY3,ES33,,
!
!-----
! ARMADURA ESTRIBOS - material 4
!-----
!
v3=0.3
ES4 = 21000
FY4 = 60
ES44 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,v3
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,4,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY4,ES44,,
!
!-----
! APOIOS E PONTOS DE CARGA - material 5
!-----
!
v4 = 0.2
ES5 = 20000
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,ES5
MPDATA,PRXY,5,,v4
!
!-----
! ARGAMASSA ESTRUTURAL - material 6
!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,6,,4966.8
MPDATA,PRXY,6,,0.2
!
! MATERIAL MODEL - MELAS (Multilinear Elastic)
!
TB,MELA,6,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.382125

```

```

TBPT,,0.0002,0.759865
TBPT,,0.0003,1.132943
TBPT,,0.0004,1.501056
TBPT,,0.0005,1.863876
TBPT,,0.0006,2.221047
TBPT,,0.0007,2.572178
TBPT,,0.0008,2.916842
TBPT,,0.0009,3.254569
TBPT,,0.001,3.584846
TBPT,,0.0011,3.907104
TBPT,,0.0012,4.220718
TBPT,,0.0013,4.524995
TBPT,,0.0014,4.819164
TBPT,,0.0015,5.10237
TBPT,,0.0016,5.373656
TBPT,,0.0017,5.631953
TBPT,,0.0018,5.876058
TBPT,,0.0019,6.104616
TBPT,,0.002,6.316092
TBPT,,0.0021,6.508744
TBPT,,0.0022,6.680584
TBPT,,0.0023,6.829335
TBPT,,0.0024,6.952373
TBPT,,0.0025,7.046662
TBPT,,0.0026,7.10867
TBPT,,0.0027,7.134258
TBPT,,0.0028,7.118551
TBPT,,0.0029,7.055763
TBPT,,0.003,6.938973
TBPT,,0.0031,6.759833
TBPT,,0.0032,6.508182
TBPT,,0.0033,6.171526
TBPT,,0.0034,5.734322
TBPT,,0.0035,5.176993
!
! MATERIAL MODEL - CONCRETE
!
TB,CONC,6,1,9,
TBTEMP,0
TBDDATA,,0.20,0.40,0.45,-1,,
TBDDATA,,,,,,,,
!
! DENSITY
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDDATA,DENS,6,,2.15E-8
!
! -----
! BARRA NÃO METÁLICA (FIBRA DE VIDRO - 12 mm) - material 7

```

```

!-----
!
v5=0.26
ES7 = 4844
FY7 = 98.9
ES77 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,7,,ES7
MPDATA,PRXY,7,,v5
!
! Modelo Bilinear - entra com a curva tensao x def
!
TB,BISO,7,1,5,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY7,ES77,,,,
!
!-----
!
!
!-----
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z)
!
BLC4,0,0,75,15,5
BLC4,0,0,10,-5,5
BLC4,12,0,63,-2.5,5
BLC4,50,15,4,2,5
!
K,1000,2,2,3 ! keypoint 1000 em x=2, y=2 e z=3
K,1010,2,13,3
K,1020,2,12,3
K,1030,13,0,3
!K,1030,13,-1,3
!
K,2000,4,2,0 ! keypoint 2000 em x=4, y=2 e z=0
K,2010,4,2,3
K,2020,4,13,3
K,2030,4,13,0
!
K,3000,11,2,0 ! keypoint 3000 em x=11, y=2 e z=0
K,3010,11,2,3
K,3020,11,13,3
K,3030,11,13,0
!
K,4000,18,2,0 ! keypoint 4000 em x=18, y=2 e z=0
K,4010,18,2,3
K,4020,18,13,3

```

K,4030,18,13,0
!
K,5000,25,2,0 ! keypoint 5000 em x=25, y=2 e z=0
K,5010,25,2,3
K,5020,25,13,3
K,5030,25,13,0
!
K,6000,32,2,0 ! keypoint 6000 em x=32, y=2 e z=0
K,6010,32,2,3
K,6020,32,13,3
K,6030,32,13,0
!
K,7000,39,2,0 ! keypoint 7000 em x=39, y=2 e z=0
K,7010,39,2,3
K,7020,39,13,3
K,7030,39,13,0
!
K,8000,46,2,0 ! keypoint 8000 em x=46, y=2 e z=0
K,8010,46,2,3
K,8020,46,13,3
K,8030,46,13,0
!
K,9000,53,2,0 ! keypoint 9000 em x=53, y=2 e z=0
K,9010,53,2,3
K,9020,53,13,3
K,9030,53,13,0
!
K,10000,75,2,3
K,10010,75,13,3
K,10020,75,0,3
!K,10020,75,-1,3
!
! Traçar linhas entre os pontos criados
!
! ESTRIBOS
!
LSTR,2000,2010
LSTR,2010,2020
LSTR,2020,2030
!
LSTR,3000,3010
LSTR,3010,3020
LSTR,3020,3030
!
LSTR,4000,4010
LSTR,4010,4020
LSTR,4020,4030
!
LSTR,5000,5010
LSTR,5010,5020

```

LSTR,5020,5030
!
LSTR,6000,6010
LSTR,6010,6020
LSTR,6020,6030
!
LSTR,7000,7010
LSTR,7010,7020
LSTR,7020,7030
!
LSTR,8000,8010
LSTR,8010,8020
LSTR,8020,8030
!
LSTR,9000,9010
LSTR,9010,9020
LSTR,9020,9030
!
! BARRAS
!
LSTR,1020,1000
LSTR,1000,10000
LSTR,1010,10010
LSTR,1030,10020
!
! -----
!                               SECTION
! -----
! Definição das espessuras de barras em cm2
!
SECTYPE,2,LINK, ,2
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,3,LINK, ,3
SECDATA,0.312,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,4,LINK, ,4
SECDATA,0.196,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,7,LINK, , 7
SECDATA,1.131,
SECCONTROL,0,0
!
! -----
!                               MESH
! -----
!

```

```

!-----
! MESH CONCRETO:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,2, , ,75, , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 75 partes
LESIZE,4, , ,75, , , ,1
LESIZE,5, , ,75, , , ,1
LESIZE,7, , ,75, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,1, , ,15, , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 15 partes
LESIZE,3, , ,15, , , ,1
LESIZE,6, , ,15, , , ,1
LESIZE,8, , ,15, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,9, , ,5, , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,10, , ,5, , , ,1
LESIZE,11, , ,5, , , ,1
LESIZE,12, , ,5, , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,1 !aplica a mesh 1
!
!-----
! MESH APOIOS:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL,1
ESYS, 0

```

```

SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,14, , ,10, , , , ,1
LESIZE,16, , ,10, , , , ,1
LESIZE,17, , ,10, , , , ,1
LESIZE,19, , ,10, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,13, , ,4, , , , ,1
LESIZE,15, , ,4, , , , ,1
LESIZE,18, , ,4, , , , ,1
LESIZE,20, , ,4, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,21, , ,5, , , , ,1
LESIZE,22, , ,5, , , , ,1
LESIZE,23, , ,5, , , , ,1
LESIZE,24, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,2 !aplica a mesh 2
!
!-----
! MESH ARGAMASSA:
!-----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 6
REAL,1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,26, , ,63, , , , ,1 !seleciona a linha "X" e divide em 63 partes
LESIZE,28, , ,63, , , , ,1
LESIZE,29, , ,63, , , , ,1
LESIZE,31, , ,63, , , , ,1
!
! y

```

```

!
LESIZE,25, , ,2, , , , ,1 !seleciona a linha "Y" e divide em 2 partes
LESIZE,27, , ,2, , , , ,1
LESIZE,30, , ,2, , , , ,1
LESIZE,32, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,33, , ,5, , , , ,1 !seleciona a linha "Z" e divide em 5 parte
LESIZE,34, , ,5, , , , ,1
LESIZE,35, , ,5, , , , ,1
LESIZE,36, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,3 !aplica a mesh 3
!
! -----
! MESH APOIOS:
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,38, , ,4, , , , ,1
LESIZE,40, , ,4, , , , ,1
LESIZE,41, , ,4, , , , ,1
LESIZE,43, , ,4, , , , ,1
!
! y
!
LESIZE,37, , ,2, , , , ,1
LESIZE,39, , ,2, , , , ,1
LESIZE,42, , ,2, , , , ,1
LESIZE,44, , ,2, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,45, , ,5, , , , ,1
LESIZE,46, , ,5, , , , ,1

```

```

LESIZE,47, , ,5, , , , ,1
LESIZE,48, , ,5, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,4 !aplica a mesh 4
!
!-----
! MESH ARMADURAS - BARRAS LONGITUDINAIS:
!-----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 2
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 2
!
! x
!
LESIZE,73, , ,10, , , , ,1
LESIZE,74, , ,73, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,73
LMESH,74
!
! ARMADURA SUPERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 3
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 3
!
! x
!
LESIZE,75, , ,73, , , , ,1

```

```

!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,75
!
! -----
! MESH BARRAS NÃO METÁLICAS - FIBRA DE VIDRO 8mm:
! -----
!
! ARMADURA INFERIOR
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 7
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 7
!
! x
!
LESIZE,76, , ,62, , , , ,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
LMESH,76
!
! -----
! ESTRIBOS:
! -----
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL,0
ESYS, 0
SECNUM, 4
!
! y
!
LESIZE,50, , ,11, , , , ,1
LESIZE,53, , ,11, , , , ,1
LESIZE,56, , ,11, , , , ,1

```

```
LESIZE,59, , ,11, , , , ,1
LESIZE,62, , ,11, , , , ,1
LESIZE,65, , ,11, , , , ,1
LESIZE,68, , ,11, , , , ,1
LESIZE,71, , ,11, , , , ,1
!
! z
!
LESIZE,49, , ,3, , , , ,1
LESIZE,51, , ,3, , , , ,1
LESIZE,52, , ,3, , , , ,1
LESIZE,54, , ,3, , , , ,1
LESIZE,55, , ,3, , , , ,1
LESIZE,57, , ,3, , , , ,1
LESIZE,58, , ,3, , , , ,1
LESIZE,60, , ,3, , , , ,1
LESIZE,61, , ,3, , , , ,1
LESIZE,63, , ,3, , , , ,1
LESIZE,64, , ,3, , , , ,1
LESIZE,66, , ,3, , , , ,1
LESIZE,67, , ,3, , , , ,1
LESIZE,69, , ,3, , , , ,1
LESIZE,70, , ,3, , , , ,1
LESIZE,72, , ,3, , , , ,1
!
LMESH,49
LMESH,50
LMESH,51
LMESH,52
LMESH,53
LMESH,54
LMESH,55
LMESH,56
LMESH,57
LMESH,58
LMESH,59
LMESH,60
LMESH,61
LMESH,62
LMESH,63
LMESH,64
LMESH,65
LMESH,66
LMESH,67
LMESH,68
LMESH,69
LMESH,70
LMESH,71
LMESH,72
LMESH,73
```

```

!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
! Esse comando executa um merge dos nos - elimina nos repetidos
! Faz a renumeração dos nos
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
! Inspect newly created reinforcing elements
!
esel,s,type,,1
! adjust the translucency level of the
! base element to reveal the embedded reinforcing
! elements
/trlcy,elem,0.9
esel,all
/view,1,1,1,1
! Turn on the expanded element shapes
/eshape,1
eplot
!
! -----
!                               RESTRIÇÕES NOS APOIOS
! -----
!
nset,s,loc,x,5
nset,r,loc,y,-5
d,all,uy
!
DA,6,UX,
DA,18,UX,
DA,1,UZ,
DA,19,UZ,
DA,7,UZ,
DA,13,UZ,
allsel
!
! -----
!                               CARREGAMENTO
! -----
!
! -----
!                               1o CASO DE CARGA - Etapa 1 - Peso Próprio
! -----
!
/PREP7

```

```

!
ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
!
! dados da análise:
!
antype,0           !Análise estática
solcontrol,on
!
autots,on
nlgeom,on
NCNV,2,0,0,0      !criterio de parada para terminar a analise
neqit,100
CNVTOL,F, ,0.1,2, ,
CNVTOL,U, ,0.1,2, ,
NSUBST,1,100,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,1
LSWRITE,1,
!
! -----
!      2o CASO DE CARGA - Etapa 2 - Incremento de DESLOCAMENTO
! -----
!
/PREP7
!
nset,s,loc,x,52
nset,r,loc,y,17
nset,r,loc,z,0
d,all,uy,-2.78
allsel
!
antype,0
solcontrol,on
!
autots,on
CNVTOL,F, ,0.6,2, ,
CNVTOL,U, ,0.6,2, ,
NSUBST,200,1000,200
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0

```

```
NCNV,2,0,0,0,0  
NEQIT,100  
!  
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1  
time,200  
LSWRITE,2,  
!
```

APÊNDICE D.2 - *Script* para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento da viga VR3

```

/POST26
!
! Rotina para se fazer o gráfico carga-deslocamento quando se usa incremento de
deslocamento
!
!
*SET,FATOR1,-1.00 ! Fator para multiplicar o deslocamento se necessário (por exemplo:
torna positivos os deslocamentos)
*SET,FATOR2,4.00 ! Fator para multiplicar a carga se necessário (por exemplo: Ptotal =
4xP)
*SET,NNUY,7563 ! Número do nó do qual se quer fazer o gráfico carga-
deslocamento (ver listagem dos nós com coordenadas)
!
/AXLAB,Y,CARGA P ! Label Y
/AXLAB,X,FLECHA UY ! Label X
NSOL,2,NNUY,U,y ! Especifica o nó cujo deslocamento Uy vai ser plotado.
NSOL,3,1,U,Z ! Variável muda, serve para armazenar a soma das reações
(corresponde ao deslocamento UZ do nó 1).
!
NSEL,S,LOC,x,5 ! (escolher a coordenada de onde estão as reações).
NSEL,R,LOC,y,-5
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT ! Captura os números dos nós de onde estão as reações.
*GET,CURNOD,NODE,0,NUM,MIN !Captura as coordenadas dos nós onde estão as
reações de apoio.
!
*DO,I,1,NUMNOD ! Laço que faz a soma das reações Fy dos nós selecionados
antes.
RFORCE,4,CURNOD,F,y
ADD,3,3,4,SOMA
CURNOD=NDNEXT(CURNOD)
*ENDDO
!
PROD,2,2,,,,,FATOR1 ! Ajuste dos deslocamentos pelo fator FATOR1
PROD,3,3,,,,,FATOR2 ! Ajuste das cargas pelo fator FATOR2
!
XVAR,2 ! Plota os deslocamentos no eixo X
PLVAR,3 ! Plota a carga total no eixo Y Y
!
ALLSEL,ALL
FINISH

```

APÊNDICE E.1 – Tabelas do Cálculo analítico do $M_{\text{último}}$ das vigas

Testemunho

GERAL	σ_{s1} (kN/cm ²)	σ_{s2} (kN/cm ²)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	bw (cm)	fck (kN/cm ²)	LN (x) (cm)	X_{23} (cm)	X_{LIMITE} (cm)	Domínio	d' (cm)	d (cm)	E_{s1} (kN/cm ²)	E_{s2} (kN/cm ²)	DOM 2		DOM 3
															$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)
ITERAÇÃO 1	50	50	1,01	0,62	10	4,225	0,58	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	677,74	677,7	-4,5
ITERAÇÃO 2			1,01	0,62	10	4,225	1,41	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	632,37	632,4	-26,9
ITERAÇÃO 3			1,01	0,62	10	4,225	1,71	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	610,88	610,9	-39,3
ITERAÇÃO 4			1,01	0,62	10	4,225	1,81	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	602,94	602,9	-44,1
ITERAÇÃO 5			1,01	0,62	10	4,225	1,84	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	600,22	600,2	-45,7
ITERAÇÃO 6			1,01	0,62	10	4,225	1,85	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	599,32	599,3	-46,3
ITERAÇÃO 7			1,01	0,62	10	4,225	1,85	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	599,02	599,0	-46,4
ITERAÇÃO 8			1,01	0,62	10	4,225	1,85	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	598,92	598,9	-46,5
ITERAÇÃO 9			1,01	0,62	10	4,225	1,85	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	598,88	598,9	-46,5
ITERAÇÃO 10			1,01	0,62	10	4,225	1,85	3,13	7,20	2	2,815	12,1	21000	21000	598,87	598,9	-46,5

Reforçada com diâmetro de 8 mm

GERAL	σ_{s1} (kN/cm ²)	σ_{s2} (kN/cm ²)	σ_r (kN/cm ²)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	A_r (cm ²)	bw (cm)
ITERAÇÃO 1	50	50	105	1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 2				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 3				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 4				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 5				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 6				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 7				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 8				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 9				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 10				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 11				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 12				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 13				1,02	0,62	1,005	10
ITERAÇÃO 14				1,02	0,62	1,005	10

	fcm (kN/cm ²)	LN (x) (cm)	X_{23} (cm)	X_{LIMITE} (cm)	Domínio	d' (cm)	d (cm)	dr (cm)	E_{s1} (kN/cm ²)	E_{s2} (kN/cm ²)	E_r (kN/cm ²)	DOM 2		DOM 3
												$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)
4,225	3,71	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1275,58	-186,6	1275,6	
4,225	3,27	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1487,20	-144,5	1487,2	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,84	-143,8	1490,8	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,65	-143,9	1490,6	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	
4,225	3,26	3,13	7,20	3	2,815	12,1	15,8	21000	21000	4844	1490,66	-143,9	1490,7	

Reforçada 10 mm

GERAL	σ_{s1} (kN/cm ²)	σ_{s2} (kN/cm ²)	σ_r (kN/cm ²)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	A_r (cm ²)	bw (cm)
ITERAÇÃO 1	50	50	10,277	1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 2				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 3				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 4				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 5				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 6				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 7				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 8				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 9				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 10				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 11				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 12				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 13				1,02	0,62	1,571	10
ITERAÇÃO 14				1,02	0,62	1,571	10

fcm (kN/cm ²)	LN (x) (cm)	X ₂₃ (cm)	X _{LIMITE} (cm)	Domínio	d' (cm)	d (cm)	dr (cm)	E _{s1} (kN/cm ²)	E _{s2} (kN/cm ²)	E _r (kN/cm ²)	DOM 2 DOM 3		
											M _{último} (kN.cm)	M _{último} (kN.cm)	M _{último} (kN.cm)
4,225	1,07	3,13	7,20	2	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	2527,76	2527,8	-15,5
4,225	3,22	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	2398,69	-140,1	2398,7
4,225	3,97	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1855,24	-212,6	1855,2
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1937,32	-199,0	1937,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1931,86	-199,9	1931,9
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,31	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3
4,225	3,84	3,13	7,20	3	2,815	12,1	17	21000	21000	4844	1932,28	-199,8	1932,3

Reforçada de 12 mm

GERAL	σ _{s1} (kN/cm ²)	σ _{s2} (kN/cm ²)	σ _r (kN/cm ²)	A _{s1} (cm ²)	A _{s2} (cm ²)	A _r (cm ²)	bw (cm)
ITERAÇÃO 1	50	50	98,9	1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 2				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 3				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 4				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 5				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 6				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 7				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 8				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 9				1,02	0,62	2,262	10
ITERAÇÃO 10				1,02	0,62	2,262	10

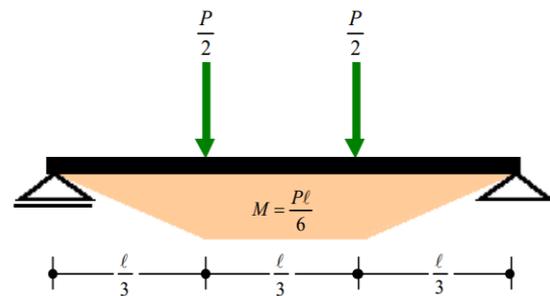
fcm (kN/cm ²)	LN (x) (cm)	X ₂₃ (cm)	X _{LIMITE} (cm)	Domínio	d' (cm)	d (cm)	dr (cm)	E _{s1} (kN/cm ²)	E _{s2} (kN/cm ²)	E _r (kN/cm ²)	DOM 2 DOM 3 DOM 4			
											M _{último} (kN.cm)	M _{último} (kN.cm)	M _{último} (kN.cm)	M _{último} (kN.cm)
4,225	7,21	3,13	7,20	4	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	608,70	-702,9	-702,9	608,7
4,225	4,65	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	1815,07	-292,8	1815,1	-292,8
4,225	4,22	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2095,56	-241,0	2095,6	-241,0
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2076,29	-244,2	2076,3	-244,2
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,55	-243,8	2078,5	-243,8
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,29	-243,9	2078,3	-243,9
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,32	-243,9	2078,3	-243,9
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,32	-243,9	2078,3	-243,9
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,32	-243,9	2078,3	-243,9
4,225	4,25	3,13	7,20	3	2,815	12,1	16,2	21000	21000	4844	2078,32	-243,9	2078,3	-243,9

APÊNDICE E.2 – Tabelas do Cálculo analítico do $P_{\text{último}}$ das vigas

CARACTERÍSTICAS DA VIGA		REFORÇO
L	140 cm	126 cm
h	15 cm	17,5 cm
bw	10 cm	10 cm
γ_{conc}	25 kN/m ³	21,5 kN/m ³

$M = P \cdot L / 6$

	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$P_{\text{último}}$ (kN)	$P_{\text{último}}$ (ton)
CA	598,87	25,67	2,57
8	1490,66	63,89	6,39
10	1932,28	82,81	8,28
12	2078,32	89,07	8,91



Considerando o peso próprio da viga

	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	$Q \cdot L^2 / 8$ (kN.cm)	$P_{\text{último}}$ (kN)	$P_{\text{último}}$ (ton)
Q	0,00375 kN/cm			
Q2	0,0037625 kN/cm			
Qt	0,0075125 kN/cm			
			$M = P \cdot L / 6 + Q \cdot L^2 / 8$	
CA	598,87	9,19	25,27	2,53
φ8	1490,66	18,41	63,10	6,31
φ10	1932,28	18,41	82,02	8,20
φ12	2078,32	18,41	88,28	8,83