



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ELVES MONTEIRO VENERANDA DE SOUSA

**APLICATIVO DE WINDOWS PARA DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO
DA ARMADURA LONGITUDINAL AO LONGO DA VIGA DE CONCRETO
ARMADO**

MOSSORÓ/RN

2019

ELVES MONTEIRO VENERANDA DE SOUSA

**APLICATIVO DE WINDOWS PARA DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO
DA ARMADURA LONGITUDINAL AO LONGO DA VIGA DE CONCRETO
ARMADO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Rosendo Sobrinho, Prof. Me.

MOSSORÓ/RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

s725 Sousa, Elves Monteiro Veneranda de.
a Aplicativo de windows para dimensionamento e
 detalhamento da armadura longitudinal ao longo da
 viga de concreto armado / Elves Monteiro
 Veneranda de Sousa. - 2019.
 83 f. : il.

 Orientador: Francisco Rosendo Sobrinho.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2019.

 1. Cálculo estrutural. 2. Implementação
computacional. 3. Detalhamento de vigas. I.
Sobrinho, Francisco Rosendo, orient. II. Título.

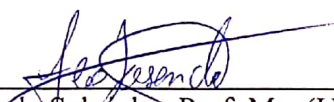
ELVES MONTEIRO VENERANDA DE SOUSA

**APLICATIVO DE WINDOWS PARA DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO
DA ARMADURA LONGITUDINAL AO LONGO DA VIGA DE CONCRETO
ARMADO**

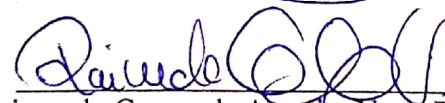
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 09 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA



Francisco Rosendo Sobrinho, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente



Raimundo Gomes de Amorim Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Lorena Graciane Duarte Nêris, Profª. (UFERSA)
Membro Examinador

A minha mãe, Luiza de Marilac das Neves Veneranda, por todo o suporte familiar e escolar dado em todos os momentos de sua vida. (In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre estar me guiando em todos os caminhos e escolhas da minha vida.

Ao meu pai, Elias Ferreira de Sousa, que sempre me apoiou e me deu forças para continuar nos estudos.

A toda minha família, por sempre me apoiar e dar forças em todas as minhas escolhas.

A todos os meus amigos, em especial, Camila Lima, Weslianny Dos Santos, Adja Rayfane Medeiros Silva Menegasso, Valteson Da Silva Santos e Amanda Cristine Da Silva por todo apoio e ajuda, direta ou indiretamente.

Ao meu orientador Prof Francisco Rosendo Sobrinho, pela disponibilidade, confiança e paciência no desenvolvimento desse trabalho.

Todas as vitórias ocultam uma abdicação.

Simone de Beauvoir

RESUMO

No âmbito da construção civil, as vigas de concreto armado se apresentam como elementos de suma importância para a estabilidade das estruturas, tendo a função de receber cargas das lajes e transferir para os pilares, estando em sua grande maioria submetidas a esforços cortantes e momentos fletores. Diante da importância dada a esses elementos, é necessário que estes sejam projetados da maneira mais segura possível, apresentando um dimensionamento preciso e um detalhamento de fácil entendimento, visando a diminuição dos erros de execução inerentes as obras. Nesse contexto, foi realizado nesse trabalho o desenvolvimento de um *software* de detalhamento longitudinal ao longo de vigas, apresentando como cálculos complementares, o pré-dimensionamento, análise estrutural e dimensionamento desses elementos, implementando e explicando métodos já consagrados na engenharia civil, baseando-se nas premissas contidas na NBR 6118:2014, apresentando como foco, edificações de pequeno porte, buscando dar um maior suporte aos engenheiros recém-formados e alunos quanto ao acesso de programas de cálculo estrutural. É detalhado no decorrer do trabalho o funcionamento do *software*, indicando os seus dados de entrada e resultados fornecidos, bem como a explicação de alguns métodos usados para a realização da programação e implementação computacional dos cálculos necessários. Para validação do funcionamento do programa e confirmação da veracidade de seus resultados, são aplicados exemplos contidos na literatura e simulações de estruturas hipotéticas em *softwares* comerciais, realizando um comparativo crítico entre todos os parâmetros fornecidos, comentando as semelhanças e diferenças presentes nos detalhamentos gerados e demais cálculos. Por fim, após a realização das devidas aplicações, foi possível observar que o *software* desenvolvido apresentou bons resultados, tanto no detalhamento gerado, quanto nos valores de momento e cortante, além de apresentar um diagrama de momento fletor condizente com a realidade, se mostrando eficaz tanto no processo de análise estrutural, quanto no dimensionamento e detalhamento de vigas em concreto armado.

Palavras-chave: Cálculo estrutural. Implementação computacional. Detalhamento de vigas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do concreto.....	16
Figura 2 - Seção transversal da viga.....	19
Figura 3 - Aproximação em apoios extremos.....	22
Figura 4 - Modelo de viga continua melhorado	22
Figura 5 - Exemplo de sistema hipergeométrico	23
Figura 6 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I).....	26
Figura 7 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)	26
Figura 8 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III)	27
Figura 9 - Diagrama de tensões do concreto no estado-limite último	28
Figura 10 - Domínios de deformação	29
Figura 11 - Domínio 1	30
Figura 12 - Domínio 2	30
Figura 13 - Domínio 3	31
Figura 14 - Domínio 4	31
Figura 15 - Domínio 4a	32
Figura 16 - Domínio 5	32
Figura 17 - Geometria dos ganchos de barras tracionadas	37
Figura 18 - Emendas supostas na mesma seção transversal.....	38
Figura 19 - Diagrama de momento e diagrama de momento deslocado	40
Figura 20 - Interface de entrada dos dados iniciais	44
Figura 21 - Interface para o pré-dimensionamento	44
Figura 22 - Interface para ações atuantes	45
Figura 23 - Banco de dados	46
Figura 24 - Entrada de dados dos apoios.....	46
Figura 25 - Interface para análise estrutural	47
Figura 26 - Rotina de cálculo da análise estrutural	48
Figura 27 - Interface para dimensionamento	49
Figura 28 - Detalhamento e descrição de armaduras negativas.....	50
Figura 29 - Detalhamento e descrição de armaduras positivas	50
Figura 30 - Detalhamento e descrição dos comprimentos adicionais	51
Figura 31 - Forma da viga biapoiada.....	52
Figura 32 - Detalhamento da viga biapoiada.....	54

Figura 33 - Entrada de dados do exemplo no aplicativo	54
Figura 34 - Esboço da seção da viga, gerada pelo aplicativo	55
Figura 35 - Preenchimento de dados referentes as ações atuantes	56
Figura 36 - Dados referentes aos apoios.....	56
Figura 37 - Diagrama de momento fletor e seus valores	57
Figura 38 - Armaduras geradas pelo aplicativo.....	58
Figura 39 - Comprimentos adicionais calculados pelo aplicativo	59
Figura 40 - Resumo das armaduras negativas geradas pelo aplicativo	59
Figura 41 - Resumo das armaduras positivas geradas pelo aplicativo	60
Figura 42 - Esboço do detalhamento gerado pelo aplicativo.....	60
Figura 43 - Lançamento estrutural no software ftool	62
Figura 44 - Diagrama de momento fletor e valores máximos gerado pelo aplicativo.....	63
Figura 45 - Diagrama de momento fletor gerado pelo software ftool	63
Figura 46 - Viga estudada.....	65
Figura 47 - Comprimentos adicionais destinada a comparação com autor	66
Figura 48 - Detalhamento feito por Kemczinski (2015).....	68
Figura 49 - Detalhamento gerado pelo Eberick.....	68
Figura 50 - Detalhamento gerado para comparação com Kemczinski (2015)	69
Figura 51 - Detalhe das barras negativas para o detalhamento gerado por Kemczinski (2015)	69
Figura 52 - Detalhe das barras positivas para o detalhamento gerado por Kemczinski (2015)	70
Figura 53 - Detalhe das barras negativas destinada ao detalhamento do Eberick.....	71
Figura 54 - Detalhe das barras positivas destinada ao detalhamento do Eberick.....	71
Figura 55 - Detalhamento gerado pelo aplicativo destinada a comparação com o Eberick	72
Figura 56 - Comprimentos adicionais destinada a comparação com o Eberick.....	72
Figura 57 - Planta de forma do primeiro nível	73
Figura 58 - Corte transversal da viga e altura útil	75
Figura 59 - Aba de ações atuantes preenchida	76
Figura 60 - Preenchimento dos pilares e análise estrutural	77
Figura 61 - Dimensionamento gerado pelo aplicativo	77
Figura 62 - Detalhamento da viga analisada	78
Figura 63 - Detalhe das armaduras positivas.....	78
Figura 64 - Detalhes das armaduras negativas	78
Figura 65 - Comprimentos adicionais	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços	15
Tabela 2 - Classe de Agressividade Ambiental	18
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e $\Delta c = 10$ mm.....	19
Tabela 4 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.....	34
Tabela 5 - Diâmetro dos pinos de dobramento dos ganchos	37
Tabela 6 - Proporção (%) máxima de barras tracionadas emendadas	38
Tabela 7 - Valores do coeficiente em função de barras emendadas.....	39
Tabela 8 - Dados de entrada para o exemplo calculado	53
Tabela 9 - Resultados do cálculo realizado por Pinheiro (2007).....	53
Tabela 10 - Comparação entre os resultados descritos na literatura e gerados pelo aplicativo	61
Tabela 11 - Informações da análise proposta	62
Tabela 12 - Dados iniciais do projeto analisado.....	64
Tabela 13 - Comparativo entre momentos fletores	65
Tabela 14 - Comparativo entre esforços cortantes	65
Tabela 15 - Comparativo entre as áreas de aço	66
Tabela 16 - Comparativo entre os comprimentos de ancoragem	67
Tabela 17 - Comparativo entre os comprimentos de ancoragem, modificando o coeficiente do aplicativo	67
Tabela 18 - Reações da laje nas vigas	74
Tabela 19 - Cargas totais nas vigas	74
Tabela 20 - Informações de projeto	75
Tabela 21 - Resumo das barras de aço	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 CONCRETO.....	14
2.2 AÇO.....	15
2.3 CONCRETO ARMADO.....	15
2.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIGAS	17
2.4.1 Vãos efetivos.....	17
2.4.2 Dimensões das vigas	17
2.4.3 Classe de Agressividade Ambiental e Cobrimento das armaduras	18
2.4.4 Altura útil	19
2.5 AÇÕES ATUANTES	20
2.5.1 Ações permanentes	20
2.5.2 Ações variáveis.....	20
2.5.3 Ações excepcionais.....	21
2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL	21
2.6.1 Modelo melhorado de viga contínua.....	21
2.6.2 Método dos deslocamentos.....	22
2.7 CÁLCULO DA ARMADURA DE FLEXÃO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO	24
2.7.1 Tipos de flexão	24
2.7.2 Estádios de deformação	25
2.7.2.1 Estádio I.....	25
2.7.2.2 Estádio II	26
2.7.2.3 Estádio III	27
2.7.3 Hipóteses básicas para cálculo	27
2.7.4 Domínios de deformação.....	29
2.7.4.1 Domínio 1	29
2.7.4.2 Domínio 2	30
2.7.4.3 Domínio 3	30

2.7.4.4 Domínio 4	31
2.7.4.5 Domínio 4a	32
2.7.4.6 Domínio 5	32
2.7.5 Equacionamento para área de aço	33
2.8 DETALHAMENTO DE ARMADURA FLEXÃO NA SEÇÃO TRANSVERSAL	34
2.8.1 Armadura longitudinal mínima e máxima.....	34
2.8.2 Espaçamento entre barras	34
2.9 DETALHAMENTO DE ARMADURA LONGITUDINAL AO LONGO DA VIGA.....	35
2.9.1 Quantidade de armadura longitudinal.....	35
2.9.2 Ancoragem das barras	35
2.9.3 Ganchos das Armaduras de Tração	37
2.9.4 Emenda de barras.....	37
2.9.5 Comprimento de transpasse de barras isoladas	38
2.9.6 Armadura transversal nas emendas por transpasse de barras isoladas	39
2.9.7 Deslocamento do diagrama de momentos fletores (decalagem).....	40
2.9.8 Ancoragem da armadura de tração junto aos apoios	41
3 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA.....	43
4 APLICAÇÕES NUMÉRICAS	52
4.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA	52
4.1.1 Validação das áreas de aço e detalhamento com exemplo da literatura	52
4.1.2 Validação do cálculo dos momentos pelo modelo de viga contínua melhorada	62
4.2 COMPARAÇÃO DO DETALHAMENTO COM EXEMPLO DA LITERATURA E SOFTWARE COMERCIAL	64
4.3 APLICAÇÃO INTEGRADA PARA ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO TIPO	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	80
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

O concreto é considerado como um dos materiais mais usado na construção civil, apresentando um excelente desempenho quando submetido a compressão, porém com uma visível deficiência quando tracionado. Para contornar essa falha, surge o concreto armado, associando ao concreto armaduras de aço que apresentam como característica principal a sua alta resistência aos esforços de tração, constituindo um sólido único, capaz de suportar esforços de compressão, tração e conseqüentemente de flexão.

A utilização do concreto armado possibilita a execução de diversas peças monolíticas utilizadas como elemento estrutural nas mais diversas construções. Dentre esses elementos estruturais, destaca-se as vigas, que são elementos lineares em que a flexão é preponderante (NBR 6118:2014) e que tem a função de transmitir as cargas das lajes e demais elementos aos pilares, apresentando seções retangulares. Dessa forma, é possível afirmar que o dimensionamento de seções retangulares sob flexão normal simples é a atividade mais comum entre os engenheiros projetistas estruturais (SANTOS, 1983).

A norma que rege as diretrizes e considerações para a execução de projetos de vigas é a NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento). O procedimento de cálculo pode ser dividido em seis pontos principais, sendo estes: pré-dimensionamento; cálculo das ações atuantes; análise estrutural; dimensionamento do elemento; verificações e detalhamento.

Dentre os pontos principais destaca-se o detalhamento o qual se subdivide em detalhamento transversal, que trata sobre as armaduras que combatem o esforço cortante, e longitudinal, o qual detalha as barras que seguem ao longo da viga detalhando o uso do aço buscando o máximo de economia. Outro ponto importante sobre o detalhamento longitudinal é a prevenção e o controle de fissurações excessivas, prevendo o uso e dimensionamento de ancoragens e detalhando o posicionando correto e efetivo das barras de aço utilizadas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Todo o cálculo descrito na NBR 6118:2014, quando ampliado para o âmbito de um projeto completo com inúmeros elementos, inviabiliza o cálculo manual de todos os componentes presentes nesse projeto devido à grande extensão dos cálculos e da facilidade de ocorrer erros durante esse processo. Segundo Kimura (2007), é impossível imaginar a realização de cálculos referentes a uma estrutura complexa feita de forma totalmente manual nos dias de hoje.

Nesse contexto, diante da necessidade de se realizar análises estruturais mais complexas, de maneira quase exata e em um tempo cada vez mais reduzido, tem-se a ascensão dos *softwares*, possibilitando análises mais precisas e rápidas de estruturas espaciais, aproximando a representação matemática e gráfica com a realidade, além de tornar a simulação computacional uma alternativa viável e necessária.

O avanço tecnológico e o advento das simulações computacionais vêm gerando uma grande revolução na maneira de se fazer engenharia, tornando ultrapassado alguns processos e conhecimentos antes utilizados no ato de projetar, reduzindo e acelerando etapas. Tal avanço tem proporcionado uma diminuição do tempo dedicado a fase de concepção dos projetos, gerando resultados cada vez mais rápidos, completos e compatíveis com a realidade.

A importância dada a esse trabalho está relacionada a necessidade de se dar um suporte adequado aos engenheiros estruturais, em especial aos recém-formados, facilitando a realização de cálculos rápidos para vigas, principalmente em estruturas mais simples, usando um software eficiente tanto nos resultados gerados quanto no desempenho perante ao sistema operacional e processador utilizado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar um aplicativo para *Windows* que disponibilize o dimensionamento e detalhamento da armadura longitudinal ao longo da viga em concreto armado de forma completa e de fácil interpretação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Implementar o método da rigidez direta à linguagem de programação C++ para a realização das análises estruturais;
- Implementar a linguagem C++ em todo método de cálculo e verificações descritas na NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento);
- Validar implementação comparando com métodos de literaturas;
- Validar implementação comparando com *software* comercial;
- Apresentar aplicações práticas para a implementação proposta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO

O concreto é considerado o material mais usado nas construções, sendo composto por cimento Portland, agregados, aditivos, água e adições minerais. Esse material tem aplicação nas mais variadas estruturas, uma vez que apresenta alta resistência e durabilidade, necessitando de menos energia para ser produzido se comparado a outros materiais usados na construção civil, como por exemplo materiais poliméricos, cerâmicos e metais (FONSECA, 2010). Ele é composto por pedras, areia, ligante hidráulico, água, aditivos e adições, misturadas em devida proporção que ao reagirem proporcionam um ganho de coesão e resistência, endurecendo a mistura e permitindo o uso do mesmo como material de construção (COUTINHO, 1997).

Historicamente existem registros de material cimentante no Egito, nas margens do rio Danúbio em 5600 a.C. além de descrições de materiais semelhantes ao concreto datadas de 1950 a.C. presentes em um mural de Tebas. Outras construções realizadas com a utilização de misturas de materiais pozolânicos podem ser encontradas por todo o Mediterrâneo, sendo empregados por construções romanas bem como no período da idade Média e Renascimento (COUTINHO, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), no ano de 1993 foi consumido cerca de três bilhões de toneladas de concreto, chegando em média a uma tonelada por cada ser humano vivo. A ABNT NBR 12655:2015 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento) classifica o concreto em três categorias distintas, diferenciando-as de acordo com a massa específica no estado endurecido. São elas:

- Concreto normal: Possui massa específica seca entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.
- Concreto leve: Possui massa específica seca inferior a 2000 kg/m³.
- Concreto pesado ou denso: Possui massa específica seca superior a 2800 kg/m³.

A ABNT NBR 12655:2015 também prevê outras classificações e terminologias, usando outras características como referência, tais como: concreto-massa, concreto espumoso, concreto aerado, concreto dosado, concreto projetado etc. Mehta e Monteiro (1994) também propuseram uma classificação levando em consideração a resistência do concreto aos 28 dias, se dividindo nos 3 grupos destacados a seguir:

- Concreto de baixa resistência: Resistência a compressão abaixo de 20 MPa.

- Concreto de resistência moderada: Resistência a compressão entre 20 e 40 MPa
- Concreto de alta resistência: Resistência a compressão acima de 40 MPa.

2.2 AÇO

O aço é usado largamente na construção civil e se apresenta como uma liga composta de ferro e carbono, no qual os teores de carbono podem variar entre 0,008% e 2,11%, tendo a função de aumentar a resistência do aço, porém elevando a fragilidade desse material, já que baixos teores de carbono geram um aço com maior resistência a tração porém com uma maior ductibilidade (PFEIL, 2008).

Um dos aspectos mais importantes na descrição do aço é a resistência característica de escoamento quando submetida a tração, definida como a máxima tensão possível de ser suportada pela barra antes que ela se deforme permanentemente (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A NBR 6118:2014 (Projeto de estrutura de concreto - Procedimento) define que as estruturas de concreto armado devem seguir os requisitos de aço dispostos na ABNT NBR 7480, sendo divididos nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60 e apresentando diâmetros das seções transversais de acordo com o indicado na norma.

A Tabela 1 indica alguns valores de propriedades importantes para as categorias de aço indicadas anteriormente:

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços

Aço	f_{yk} (MPa)	f_{yd} (Mpa)	ε_{yd} (%)
CA25	250	217	0,104
CA50	500	435	0,207
CA60	600	522	0,248

Fonte: Carvalho; Figueiredo Filho (2014).

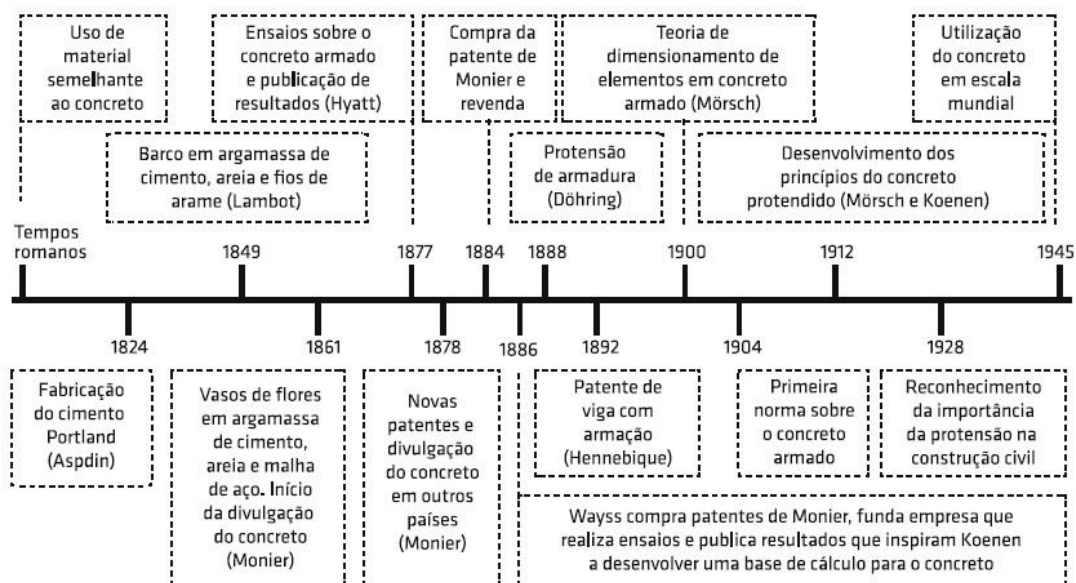
2.3 CONCRETO ARMADO

A história da evolução humana é marcada pela constante busca por moradias e materiais que possam lhes proporcionar abrigos fixos e seguros. Ao longo do tempo diversos locais foram usados como ponto moradia, como árvores e cavernas por exemplo. Com a descoberta e o início da utilização da cal e outros ligantes foi possível haver um avanço maior

nos sistemas construtivos, surgindo assim construções mais complexas como templos e pirâmides, construídas pelas civilizações egípcias e romanas.

Nesse contexto, ao longo das buscas por materiais mais seguros e eficientes, no ano de 1861, Joseph Monier construiu vasos de cimento e areia usando como um suporte interno malhas de aço, surgindo assim as primeiras peças de concreto armado que seriam posteriormente patenteadas. A Figura 1 apresenta um breve resumo da evolução do concreto ao longo do tempo (PORTO; FERNANDES, 2015).

Figura 1 - Evolução do concreto



Fonte: Porto; Fernandes (2015).

Nos dias de hoje o concreto armado se apresenta como o material para construção mais usado em todo mundo, apresentando vantagens como ótimo desempenho, facilidade de execução e vantagens econômicas.

Devido as características do concreto como alta resistência a compressão mas com baixa resistência a tração, foi necessário a realização de uma união entre o concreto simples e algum material que fosse resistente a tração, fazendo com que ambos trabalhassem juntos solidariamente. Dessa demanda surgiu o concreto armado, composto por concreto e aço, funcionando de forma que o concreto absorve as tensões de compressão sendo simultaneamente auxiliado por barras de aço que absorvem as tensões de tração, tornando tal elemento capaz de suportar efeitos de compressão, tração e flexão (BASTOS, 2006).

2.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

Na realização de um projeto, um dos primeiros passos a ser tomado é o cálculo do pré-dimensionamento com o propósito de estabelecer as dimensões iniciais dos elementos de concreto armado a fim de calcular seu peso próprio para que juntamente com as demais ações atuantes possa-se fazer uma análise estrutural fiel à realidade (KIMURA, 2007).

2.4.1 Vãos efetivos

Os vãos teóricos de uma viga podem ser estimados de acordo com seus apoios, os quais para vigas bi apoiadas pode-se usar a distância entre o centro dos apoios como referência e para vigas em balanço pode-se usar a distância do centro do apoio até a extremidade livre. Outra opção aceitável diz respeito ao estabelecimento dos critérios, sendo eles (ARAÚJO, 2014):

- Para vigas bi apoiadas acrescenta-se $0,6 \cdot h$ ao vão livre, sendo h a altura da seção da viga.
- Para vigas contínuas acrescenta-se $0,6 \cdot h$ ao vão livre, sendo h a altura da seção de cada tramo considerado.

2.4.2 Dimensões das vigas

A ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) determina que as seções transversais de uma viga não podem apresentar larguras menores que 12 cm, havendo uma tolerância para esses limites em casos especiais em que a arquitetura não permite tal largura, podendo apresentar até 10 cm de largura, desde que o posicionamento das armaduras não interfira nos outros elementos estruturais, seguindo as exigências de espaçamento e cobrimentos contidas na norma bem como a existência de um controle do lançamento e vibração do concreto além de respeitar as condições dispostas na ABNT NBR 14931:2004.

Quanto à altura das vigas, segundo Pinheiro (2007), pode-se estabelecer três pré-dimensionamentos distintos para essa medida, se distinguindo entre si de acordo com o tipo da viga analisada, sendo elas:

Para tramos intermediários:

$$h_{est} = \frac{L}{12} \quad (1)$$

Para tramos externos ou vigas bi apoiadas:

$$h_{est} = \frac{L}{10} \quad (2)$$

Balanços:

$$h_{est} = \frac{L}{5} \quad (3)$$

sendo L o tamanho do vão entre os pilares, de dentro a dentro.

É importante que o projetista se atente a essas alturas de forma que não venha a invadir o espaço de portas e janelas. Outro fator importante é que visando não prejudicar o cimbramento, sendo indicado a padronização da altura das vigas, podendo haver no mínimo duas alturas diferentes a longo dos tramos analisados (PINHEIRO, 2007).

2.4.3 Classe de Agressividade Ambiental e Cobrimento das armaduras

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) os projetos de estruturas correntes devem ser classificados quanto a agressividade do ambiente que está inserido, oferecendo proteção as ações físicas e químicas do meio. A Tabela 2 a apresenta as classes de agressividades bem como algumas de suas características:

Tabela 2 - Classe de Agressividade Ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: Adaptada da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Nesse contexto, segundo a ABNT NBR 6118:2014 os valores de cobrimento que serão utilizados para a proteção da armadura, estão diretamente ligados com a classe de agressividade do meio, com o tipo de elemento estrutural executado e com o tipo de concreto utilizado, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 5)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: Adaptada da NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.4.4 Altura útil

Para cálculos futuros será necessária a determinação da altura útil, podendo ser calculada segundo o equacionamento proposto por Pinheiro (2007) (Equação 4), relacionando altura útil e altura total:

$$h = d + c + \phi_t + \phi_l/2 \quad (4)$$

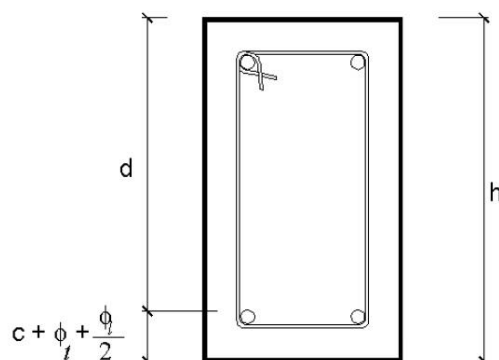
onde:

c : Cobrimento

ϕ_t : Diâmetro dos estribos

ϕ_l : Diâmetro das barras longitudinais

Figura 2 - Seção transversal da viga



Fonte: Pinheiro (2007).

2.5 AÇÕES ATUANTES

Pode-se definir ação como sendo fator influenciador que produza algum estado de tensão ou deformação no elemento analisado (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). A ABNT NBR 6118:2014 define que na análise estrutural toda e qualquer ação que influencie na segurança da estrutura deve ser considerada para fins de cálculos.

2.5.1 Ações permanentes

As ações permanentes são aquelas em que atuam no elemento com uma intensidade constante durante toda a vida da construção, tais como o peso próprio dos elementos de concreto, peso próprio de alvenarias, instalações permanentes, dentre outros. Valores de carregamento que crescem durante um tempo e tendem a convergir para um valor constante também são consideradas cargas permanentes. Vale ressaltar que na contabilização dessas ações, deve-se sempre considerar os seus valores mais desfavoráveis, de forma a dar uma maior segurança a estrutura total (KIMURA, 2007).

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), os carregamentos permanentes podem ser divididos em dois tipos, sendo eles:

- Ações permanentes diretas, compostas pelo peso próprio da estrutura e pelos demais elementos fixos do pórtico analisado.
- Ações permanentes indiretas, compostas pelas deformações geradas pelos efeitos de fluência e retração do concreto, bem como imperfeições geométricas e deslocamentos de elementos construtivos.

2.5.2 Ações variáveis

Define-se ações variáveis como sendo aquelas em que comparadas com sua média de carregamentos apresentam uma grande variação. Divide-se essa classe de ação em outras duas classificações, sendo elas as ações variáveis diretas e indiretas (PFEIL, 2008).

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 as ações variáveis diretas são cargas acidentais previstas para o uso da construção, tais como cargas verticais de uso da construção, impactos laterais, ação do vento, ação da água retida, dentre outros. Vale ressaltar que essas cargas devem ser consideradas nas posições mais desfavoráveis do elemento, sendo a favor da

segurança. Já as ações variáveis indiretas são aquelas provindas das variações uniforme e não uniformes de temperatura bem como as ações dinâmicas, como possíveis choques e vibrações.

2.5.3 Ações excepcionais

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 ações excepcionais são aquelas em que a estrutura está sujeita a efeitos que não podem ser controlados por outros meios.

2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

2.6.1 Modelo melhorado de viga contínua

Segundo as diretrizes dispostas no item 14.6.6.1 da ABNT NBR 6118:2014, pode-se usar o modelo de viga contínua, considerando tal viga simplesmente apoiada nos pilares desde que sejam satisfeitos os seguintes requisitos:

- Os momentos positivos devem ser no mínimo iguais ao momento de engastamento, não podendo haver momentos positivos menores.
- Em casos onde a viga é solidaria ao pilar intermediário e a medida do apoio for maior que a quarta parte da altura pilar os momentos negativos não podem ser menores que a do engastamento perfeito naquele apoio.
- Caso não sejam considerados as reais influências dos pilares sobre as vigas, deve-se considerar nos apoios externos um momento de engastamento perfeito, multiplicado por coeficientes calculados de acordo com a seção 14.6.6.1 da ABNT NBR 6118:2014.

Também é descrito na ABNT NBR 6118:2014 que pode-se adotar um modelo melhorado de viga contínua, o qual considera a solidariedade entre pilar e viga, introduzindo a rigidez a flexão nos pilares extremos e intermediários.

Para esse modelo, a rigidez e a flexão dos pilares estão vinculados ao problema inserindo engastamentos elásticos (molas) nos apoios (FIGURA 4), se apresentando como uma solução mais consistente, porém dificultando o cálculo manual.

A equação do coeficiente das molas usadas no método é dada por:

$$K_i = Ecs \left(\frac{6I, sup}{li, sup} + \frac{6I, inf}{li, inf} \right) \quad (5)$$

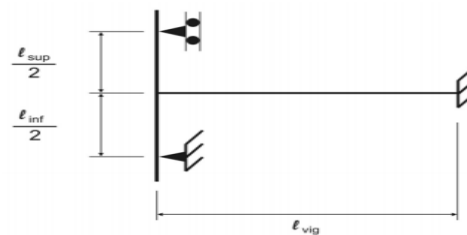
onde:

I, inf : Momento de inércia do pilar inferior

I, sup : Momento de inércia do pilar superior

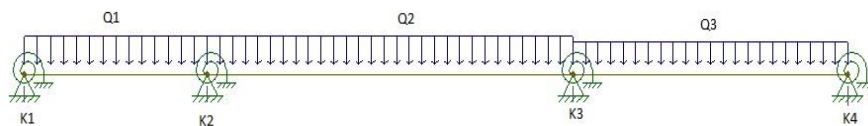
Ecs : Módulo de elasticidade secante do concreto

Figura 3 - Aproximação em apoios extremos



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Figura 4 - Modelo de viga continua melhorado



Fonte: Autoria própria (2019).

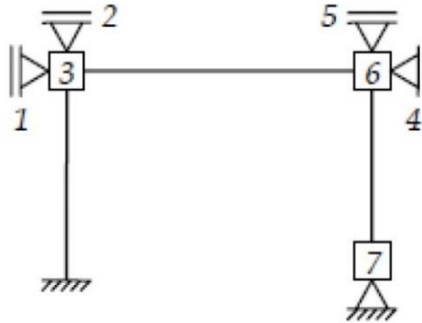
2.6.2 Método dos deslocamentos

A filosofia de cálculo do método dos deslocamentos parte da ideia de se determinar seus esforços e posteriormente as deformações nos diversos apoios ao longo das barras, bem como suas respectivas rotações (SUSSEKIND, 1987). Dessa forma, para que se possa calcular os esforços resultantes de um carregamento em uma viga ou barra, primeiramente deve-se definir quais são os deslocamentos gerados por o carregamento atuante no elemento estudado.

Partindo dessa ideia, pode-se determinar um sistema estaticamente indefinido partindo de uma superposição de outros sistemas, estaticamente definidos (MARTHA, 2010), ou seja, dividindo o sistema principal em outros sistemas mais simples para facilitar a resolução do problema principal.

Inicialmente, para que se possa resolver casos complexos com o auxílio do método dos deslocamentos, será preciso aplicar um sistema hipergeométrico, que consiste na substituição dos apoios existentes na viga analisada por placas, como representado na Figura 5, engastando todos os nós através desses apoios fictícios, isolando as deslocabilidades de cada apoio (MARTHA, 2010).

Figura 5 - Exemplo de sistema hipergeométrico



Fonte: Martha (2010).

A partir desse sistema pode-se então dividir o problema em casos, sendo o primeiro conhecido como caso 0. Para solução desse problema, observando o caso hipergeométrico, nota-se que é possível separar em várias barras, uma vez que devido aos nós estarem engastados não existe transferência de esforços entre as barras, sendo possível a realização de análises separadas, nomeando os esforços encontrados como forças de engastamento perfeito (LONGO, 2015).

Para calcular as soluções para os demais casos (caso 1, caso 2, caso 3...) serão calculadas as reações nos apoios reais a partir dos recalques nos próprios apoios, de forma que será avaliada os efeitos causados ao sistema hipergeométrico a partir das deformações encontradas (MARTHA, 2010).

Os efeitos calculados a partir dessa análise são conhecidos como coeficientes de rigidez da estrutura, indicando a tendência que o elemento tem de se manter estático perante os carregamentos exercidos sobre a estrutura, ou seja, quanto maior esse coeficiente, menos a estrutura se desloca (LONGO, 2015).

A partir dos efeitos causados pelas cargas e dos coeficientes de rigidez, será feita compatibilização estática da estrutura, no qual, a partir da estrutura original, do sistema hipergeométrico e todos os seus resultados de esforços e rigidez, através de superposição dos casos, tem-se como resultado o comportamento elástico da estrutura inicial (SUSSEKIND, 1987).

Dessa forma, para o cálculo das deslocabilidades, pode-se usar a Equação 6.

$$F_i = \sum_{j=1}^n K_{ij}.D_i = 0 \quad (6)$$

onde n representa o número de deslocabilidades no elemento estudado. Pode-se ainda estabelecer um sistema de equações (EQUAÇÃO 7, 8 e 9) ou matrizes (EQUAÇÃO 10 e 11) obtendo como solução os deslocamentos nos apoios.

$$F_{10} + K_{11}.D_1 + K_{12}.D_2 + \dots + K_{1n}.D_n \quad (7)$$

$$F_{20} + K_{21}.D_1 + K_{22}.D_2 + \dots + K_{2n}.D_n \quad (8)$$

$$F_{n0} + K_{n1}.D_1 + K_{n2}.D_2 + \dots + K_{nn}.D_n \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{10} \\ F_{20} \\ F_{n0} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{2n} \\ K_{n1} & K_{n1} & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_n \end{Bmatrix} = 0 \quad (10)$$

Pode-se ainda apresentar essa solução na forma reduzida:

$$\{F\} + [K] . \{D\} = 0 \quad (11)$$

onde:

$\{F\}$: Vetor das forças de engastamento perfeito;

$[K]$: Matriz de rigidez da estrutura;

$\{D\}$: Vetor de deslocamento da estrutura;

2.7 CÁLCULO DA ARMADURA DE FLEXÃO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO

Em um projeto estrutural, um dos pontos mais importantes para o detalhamento e dimensionamento das peças de concreto é o cálculo das armaduras de aço, de forma que seja capaz de suportar os momentos fletores incidentes naquela peça. Para o dimensionamento, todo o cálculo é feito levando em consideração o estado-limite último de ruína, fazendo com que na seção mais solicitada sejam alcançadas as máximas deformações dos materiais (aço e concreto), podendo ocorrer tanto a ruptura do concreto comprimido quanto a deformação excessiva das armaduras de aço (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

2.7.1 Tipos de flexão

Em um elemento linear, a flexão é gerada pela atuação de momentos fletores externos, fazendo com que surja no interior desse elemento tensões normais de compressão e tração, além de tender a rotacionar a peça (CLÍMACO, 2013). Vale ressaltar que existem diversos tipos de flexão distintos, podendo ser classificados, segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), em seis tipos, sendo estes:

- Flexão normal (simples ou composta): Esse tipo de flexão ocorre quando tem-se uma perpendicularidade entre plano do carregamento e a linha neutra, que é a linha que separa a região comprimida da tracionada na peça apresentando uma tensão nula.

- Flexão oblíqua (simples ou composta): Flexão que ocorre quando tem-se um plano de tensão não perpendicular à linha neutra ou quando a peça apresenta seções não simétricas, ou ainda quando surge um componente normal do momento fletor normal ao plano.
- Flexão simples: Esse tipo de flexão pode ser normal ou oblíqua, não apresentando esforço normal atuante.
- Flexão composta: Também pode ser classificada entre normal e oblíqua, e pode apresentar tantos esforços de tração quanto de compressão na seção, caracterizando a presença de esforço normal de qualquer ordem, bem como a presença ou não de reações cortantes.
- Flexão pura: Pode ser classificada em simples ou composta, caracterizada pela ausência de esforços cortantes ao longo da viga, havendo momentos constantes.
- Flexão não pura: Apresenta esforços cortantes atuantes.

Vale ressaltar que devido ao esforço normal presente nas vigas ser desprezível, os tipos de flexão usados nos cálculos serão a normal simples e pura, fazendo com que todo o equacionamento demonstrado seja capaz de calcular as armaduras longitudinais nas regiões mais solicitadas de vigas e lajes (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

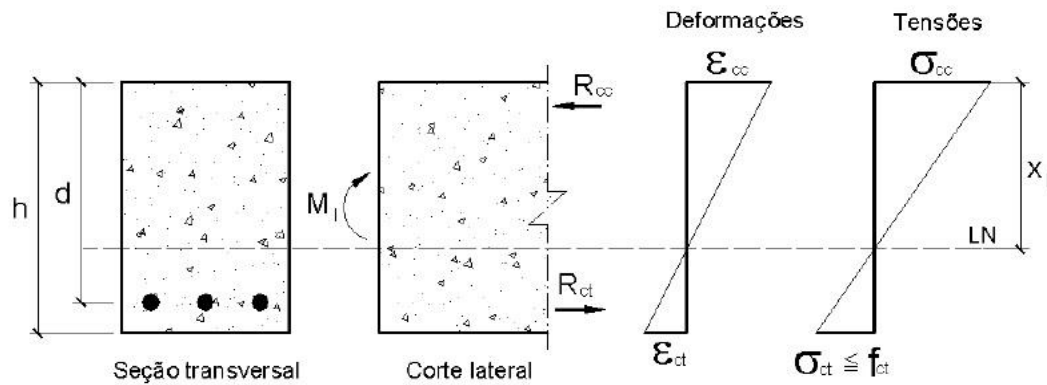
2.7.2 Estádios de deformação

Quando incide-se um carregamento em um elemento de concreto, gerando uma flexão, aumentando gradativamente este carregamento até a ruptura, pode-se observar diversas fases de fissuração e fragilização da seção do elemento, sendo separado em três fases principais, sendo elas o estágio I, estágio II e estágio III (PINHEIRO, 2007).

2.7.2.1 Estádio I

O estágio I ocorre no início do carregamento quando o elemento está submetido a um momento fletor de pequena intensidade e a tensão de tração exercida no concreto não atinge a resistência característica dele, não havendo fissuração (FIGURA 6). Essa fase é caracterizada por possuir um diagrama de tensão normal linear, bem como a existência de uma proporcionalidade entre as tensões e as deformações deferidas, sendo representada pela região linear do diagrama tensão-deformação (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Figura 6 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)



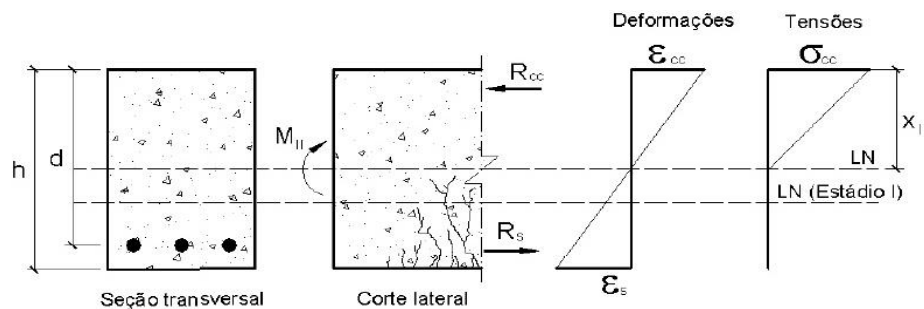
Fonte: Pinheiro (2007).

Para fins de cálculo, o estágio I é usado para que se encontre o momento de fissuração, e posteriormente a determinação de uma armadura mínima capaz de absorver as tensões geradas através do momento fletor. Vale ressaltar que tendo em vista a baixa resistência a tração e a alta resistência a compressão, essa fase pouco aproveita as características do concreto, sendo inviável o dimensionamento usando o estágio I (PINHEIRO, 2007).

2.7.2.2 Estádio II

O estágio II, também conhecido como estado de fissuração, ocorre com o aumento do momento fletor que incide no elemento, gerando abaixo da linha neutra valores de tração maiores que a resistência a tração do concreto, fazendo com que apenas o aço resista a esses esforços, uma vez que naquela região o concreto se encontra fissurado, inclusive sendo visível tal fissuração. Quanto a região comprimida (acima da linha neutra), continua apresentando um diagrama linear de tensões não havendo fissuração nessa região (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). A Figura 7 detalha o comportamento do estágio II.

Figura 7 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)

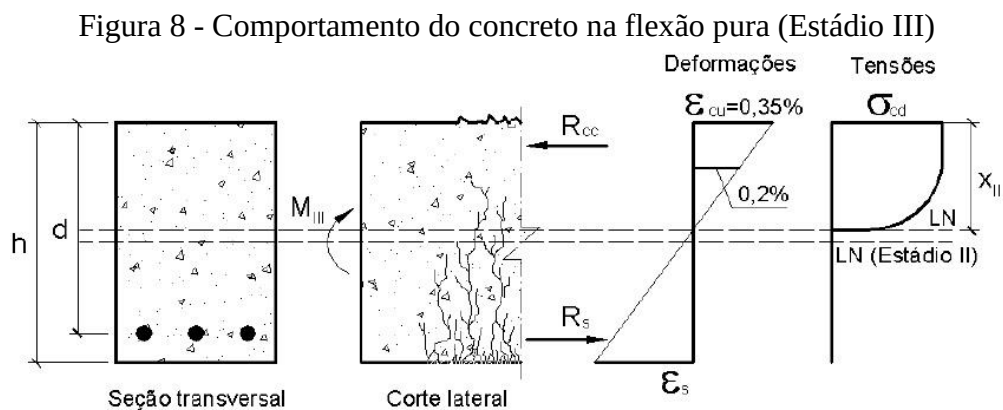


Fonte: Pinheiro (2007).

A medida em que aumenta-se o carregamento, tanto as fissuras quanto a linha neutra se deslocam em direção a borda comprimida, fazendo com que haja um crescimento da tração atuante nas armaduras. Em termos de cálculo, o estágio II é usado para verificações do estado limite de abertura de fissuras e o estado de deformação excessiva (CLÍMACO, 2013).

2.7.2.3 Estádio III

Nessa fase observa-se que o momento fletor encontra-se em um valor aproximado ao momento de ruína do elemento, gerando plastificação no concreto comprimido, fazendo com que todas as fibras trabalhem na sua tensão máxima ($\epsilon_c = 0,35\%$), além de gerar um diagrama de tensões da forma parabólico-retangular e causar a fissuração da peça até próxima da linha neutra, diminuindo consideravelmente a região comprimida do concreto, conforme mostrado na Figura 8 (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).



Fonte: Pinheiro (2007).

O dimensionamento das peças de concreto é realizado neste estágio, sendo conhecido como “cálculo na ruptura”. Para efeitos de cálculos, o diagrama de tensões acima pode ser considerado como um retângulo, facilitando a determinação da resultante de compressão (ARAÚJO, 2014).

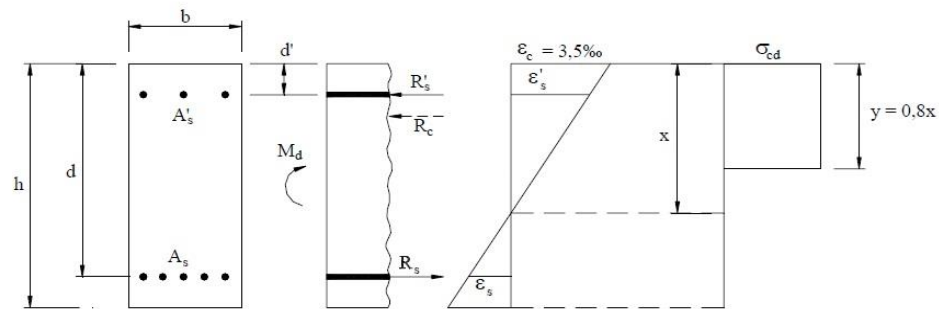
2.7.3 Hipóteses básicas para cálculo

A NBR 6118:2014 estabelece hipóteses básicas que devem ser assumidas para que seja possível a realização do equacionamento necessário para chegar nos valores de esforço

resistente, bem como nas seções de elementos lineares sujeito a solicitações normais. Dentre os critérios contidos na ABNT NBR 6118:2014, são destacados:

- Após a deformação, as seções transversais ao longo do elemento se mantêm planas, até que seja atingido o estado-limite último.
- Admite-se que existe uma solidariedade perfeita entre os materiais (concreto e armaduras), de forma que as deformações sofridas pela armadura sejam iguais as deformações do concreto próximo as barras de aço.
- Devem ser desprezadas as tensões de tração no concreto
- As tensões nas armaduras são definidas pelos diagramas de tensão versus deformação.
- As tensões no concreto devem ser calculadas de acordo com o diagrama parábola-retângulo, no qual a partir do diagrama tensão-deformação do concreto, substitui-se a parábola do 2º grau por um retângulo com uma altura igual a $0,8 \cdot x$, sendo x a distância entre o topo e a linha neutra. O esquema do diagrama de tensão-deformação do concreto e o diagrama parábola-retângulo estão demonstradas na Figura 9:

Figura 9 - Diagrama de tensões do concreto no estado-limite último



Fonte: Pinheiro (2007).

onde:

A_s : Área de aço

x : profundidade da linha neutra

ϵ_s : Alongamento da armadura.

f_{cd} : resistência característica de cálculo do concreto

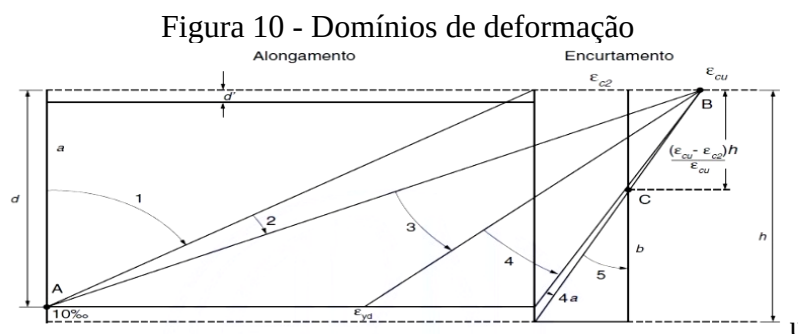
Observa-se que conseguiu-se boas aproximações considerando tensões iguais a $0,85 \cdot f_{cd}$ ou $0,80 \cdot f_{cd}$, variando de acordo com a largura da zona comprimida (podendo ser uma largura constante ou não) (FUSCO, 1981).

A redução na ordem de 0,85 ou 0,80 da resistência característica de cálculo do concreto ocorre primeiramente devido ao atrito do corpo de prova com o prato da prensa (no processo de ensaio de ruptura), fazendo com que essas regiões sejam impedidas de se deformar horizontalmente, pois o concreto apresenta uma maior resistência quando submetido a uma carga de forma rápida, o que ocorre nos ensaios de determinação da resistência característica do concreto (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

2.7.4 Domínios de deformação

Pode-se definir domínio de deformação como sendo o intervalo que abrange todas as possíveis situações de ruptura em uma seção de um elemento linear, ou seja, cada domínio é considerado um modo de ruptura que pode ser associado a fatores como dimensões da seção, armaduras e deformações (CLÍMACO, 2013).

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, para que se caracterize o estado-limite último é necessário que a distribuição das deformações ao longo da seção transversal pertença a algum dos domínios que serão citados mais à frente. O diagrama contido na Figura 10 demonstra todos os domínios e seus limites:



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

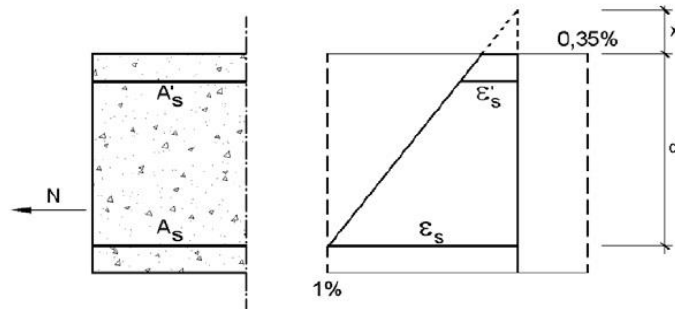
2.7.4.1 Domínio 1

Nesse domínio tem-se o primeiro limite representado pela reta a (FIGURA 10), sendo que sua ruptura é causada por uma força de tração atuante no centro do elemento, fazendo com que todas as resultantes e deformações nas fibras sejam iguais (CLÍMACO, 2013).

Observa-se que o corpo se rompe quando o aço atinge uma deformação de 10‰ e devido haver a atuação apenas da tração, todo o concreto se encontra fissurado, considerando apenas as armaduras como elemento de sustentação para aquele carregamento. O valor de

deformação do aço permanece constante até o fim do domínio, enquanto a do concreto varia de 10‰ (Tracionando) até 0‰ (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). O diagrama da Figura 11 sintetiza toas informações até aqui citadas sobre o domínio 1.

Figura 11 - Domínio 1

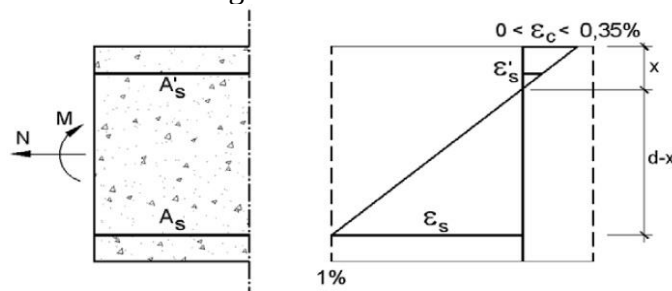


Fonte: Pinheiro (2007).

2.7.4.2 Domínio 2

No domínio 2 o alongamento do aço continua em 10‰, enquanto a deformação do concreto varia entre 0‰ e 3,5‰ (como mostrado na Figura 12), fazendo com que a linha neutra se encontre dentro da seção (Diferentemente do domínio 1), correspondendo a um caso de flexão simples ou composta. Portanto, pode-se observar que a seção nesse caso é composta por concreto comprimido (porém sem atingir a ruptura do concreto) e aço tracionado, sendo este o último caso que a ruína do elemento é causada pela deformação excessiva do aço (FUSCO, 1981).

Figura 12 - Domínio 2



Fonte: Pinheiro (2007).

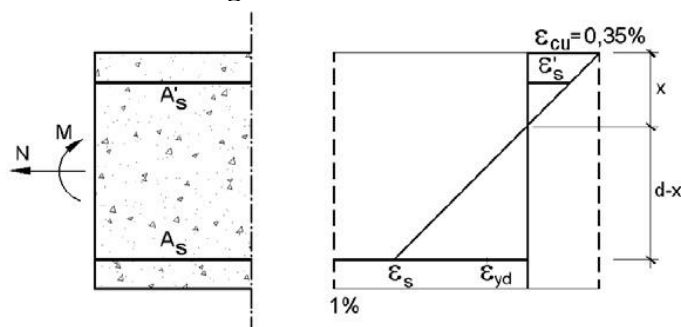
2.7.4.3 Domínio 3

Para esse caso tem-se uma seção balanceada a qual ocorre a ruptura tanto por flexão, gerando o escoamento da armadura, quanto o esmagamento do concreto que se encontra

submetido a compressão, gerando na peça sinais de ruptura tais como abertura de fissuras visíveis e flechas acentuadas (CLÍMACO, 2013).

A deformação do concreto se encontra fixada em 3,5‰ na borda comprimida e as deformações do aço variam entre 10‰ e ϵ_{yd} (Deformação específica de escoamento do aço), ou seja, tanto aço quanto concreto trabalham em suas resistências de cálculo, havendo um bom aproveitamento das características dos dois materiais (PINHEIRO, 2007). A Figura 13 é uma representação das deformações inerentes ao domínio 3.

Figura 13 - Domínio 3

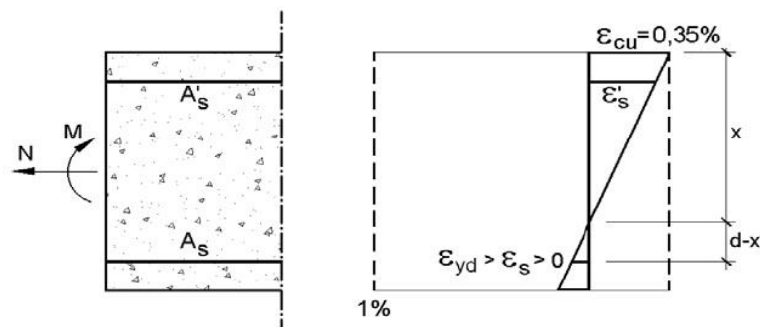


Fonte: Pinheiro (2007).

2.7.4.4 Domínio 4

Esse caso ocorre quando tem-se flexão simples ou composta, onde, como indicado na Figura 14, é apresentada uma deformação do concreto fixada em 3,5‰ e deformações nas armaduras variando entre ϵ_{yd} e zero (não atingindo o escoamento do aço), apresentando uma ruptura frágil devido o concreto atingir sua ruína mais rápido que as armaduras, sendo conhecido como um domínio antieconômico, uma vez que o dimensionamento baseado nele deixa a peça superarmada não utilizando toda a capacidade do aço (FUSCO, 1981).

Figura 14 - Domínio 4

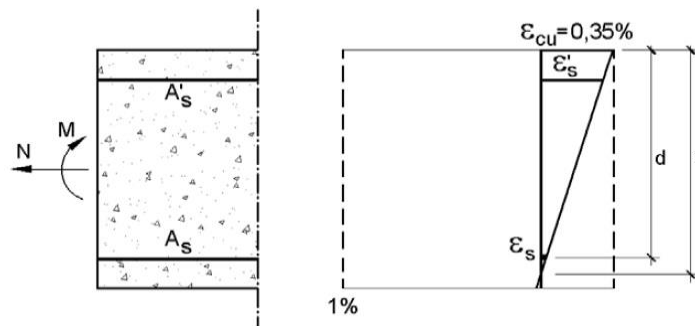


Fonte: Pinheiro (2007).

2.7.4.5 Domínio 4a

Situação de distribuição de esforços possível apenas na flexo-compressão, as quais todas as armaduras se encontram comprimidas, estando com deformações do concreto na ordem 3,5‰ e deformações no aço praticamente nulas, caracterizando um mal aproveitamento das armaduras bem como uma ruptura frágil devido ao encurtamento da armadura comprimida (sem ocorrência de fissuração, deformação ou advertências) (BASTOS, 2006). A Figura 15 esquematiza o funcionamento do domínio 4a.

Figura 15 - Domínio 4a

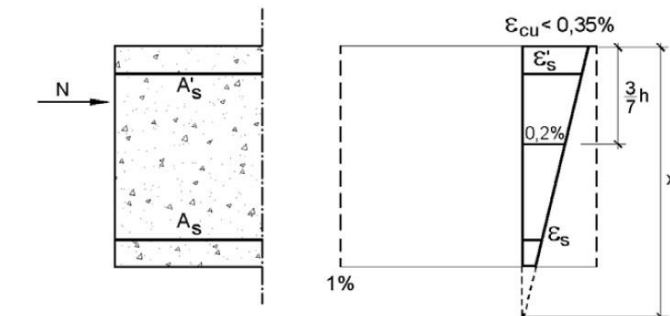


Fonte: Pinheiro (2007).

2.7.4.6 Domínio 5

Para o domínio 5 tem-se as deformações do aço variando entre 2,0‰ (em compressão) e zero, e as deformações do concreto entre 3,5‰ e 2,0‰, caracterizando uma seção totalmente comprimida (como mostrado na Figura 15), sendo que sua ruptura ocorre devido a compressões com pequenas excentricidades (CLÍMACO, 2013).

Figura 16 - Domínio 5



Fonte: Pinheiro (2007).

2.7.5 Equacionamento para área de aço

O cálculo das equações para determinação das áreas de aço é baseado em toda a teoria demonstrada anteriormente, usando os conceitos de estádios, domínios, tipos de flexão e as hipóteses necessárias para o cálculo. Todo o equacionamento é feito de maneira simples, no qual, ao aplicar o equilíbrio na seção considerando todas as forças atuantes, chega-se em um resultado que oferece a área de aço necessária para equilibrar as ações na seção (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Dentre os pontos necessários para a dedução da equação da área necessária da armadura é destacado

- Ao fazer o equilíbrio das forças normais atuantes da seção transversal deve-se considerar que não existe força externa atuando, fazendo com que a força atuante no concreto seja igual a atuante nas armaduras.
- O momento interno em que qualquer ponto deve ser igual a momento aplicado externamente.
- É importante a determinação da posição da linha neutra para que se possa saber o domínio que a estrutura está trabalhando, bem como a determinação das resultantes da compressão.
- Após ao cálculo dos fatores citados anteriormente e admitindo que as peças devem trabalhar no domínio 2 ou 3 (pois tem-se um maior aproveitamento das armaduras), se torna possível a determinação das áreas de armadura, demonstrado pela Equação 12:

$$A_s = \frac{M_d}{z \times f_{yd}} \quad (12)$$

Pode-se ainda, para facilitar o emprego de sistemas e unidades, trabalhar com as fórmulas adimensionais, podendo ser calculadas através da Equação 16 ou através do uso de tabelas com valores predefinidos para cálculo para armaduras longitudinais.

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \times d^2 \times f_{cd}} \quad (13)$$

$$Kx = 1,25 - 1,9174\sqrt{0,425 - Kmd} \quad (14)$$

$$Kz = 1 - 0,4kx \quad (15)$$

$$A_s = \frac{M_d}{(KZ) \times d \times f_s} \quad (16)$$

2.8 DETALHAMENTO DE ARMADURA FLEXÃO NA SEÇÃO TRANSVERSAL

2.8.1 Armadura longitudinal mínima e máxima

O item 17.3.5.2.1 da ABNT NBR 6118:2014 apresenta as diretrizes necessárias para o cálculo da armadura mínima de tração em um elemento de concreto armado, de forma que através do uso de valores predefinidos de taxa mínima de armadura, podemos determinar a armadura mínima necessária. Os valores de taxa de armadura estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $p_{\min}$ ($A_s, \min/A_c$) %									
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 6118 (2014).

Para a determinação da armadura máxima permitida, as armaduras totais (soma das armaduras de tração e compressão) não devem passar de 4% da área de concreto presente em uma seção, evitando a realização desse cálculo em regiões de emendas.

2.8.2 Espaçamento entre barras

Um fator determinante em um projeto de viga em concreto armado é o espaçamento entre as barras utilizadas, uma vez que o posicionamento delas devem propiciar uma fácil execução, permitir o lançamento e adensamento do concreto, facilitando a utilização de vibradores, a fim de evitar problemas como segregação do concreto e presença de vazios na seção (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O item 18.3.2.2 da ABNT NBR 6118:2014 dispõe sobre os valores de espaçamentos mínimo entre as faces das barras longitudinais, devendo ser superior ao maior dos seguintes valores:

$$a_n \geq \begin{cases} 20 \text{ mm;} \\ \text{diâmetro da barra, do feixe ou da luva;} \\ 1,2 \text{ vez a dimensão máxima característica do agregado graúdo;} \end{cases}$$

$$a_v \geq \begin{cases} 20 \text{ mm;} \\ \text{diâmetro da barra, do feixe ou da luva;} \\ 0,5 \text{ vez a dimensão máxima característica do agregado graúdo.} \end{cases}$$

onde, a_h é o espaçamento mínimo horizontal e a_v é o espaçamento mínimo vertical entre barras.

2.9 DETALHAMENTO DE ARMADURA LONGITUDINAL AO LONGO DA VIGA

O detalhamento das amaduras ao longo da viga tem a importância de otimizar o uso das barras, usando os menores comprimentos possíveis, atendendo com segurança os esforços solicitantes na viga, porém, levando em conta os processos construtivos e a facilidade em executar tal detalhamento (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

2.9.1 Quantidade de armadura longitudinal

Inicialmente para chegar à quantidade de armadura longitudinal deve-se realizar o cálculo da área de aço (como explicado anteriormente) e posteriormente, com a utilização do gráfico de momentos. Deve-se ainda realizar a estratificação do diagrama de momentos, determinando o comprimento necessário de cada barra escolhida pelo projetista. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Esse procedimento é feito através da divisão de cada gráfico de momento fletor em áreas, o qual o número de áreas é igual ao número de barras de aço escolhidas pelo projetista, sendo que a distância linear entre as extremidades dessas áreas será considerada o comprimento necessário para cada barra de aço. Vale ressaltar que pelo menos quatro barras devem ser empregadas a fim de que elas trabalhem como porta-estribos.

2.9.2 Ancoragem das barras

A ABNT NBR 6118:2014 apresenta no item 9.4.2.1 as condições de ancoragem das armaduras, podendo ser ancorado como um comprimento retilíneo ou com grande raio. Dentre os tópicos contidos na norma são destacados:

- Gancho obrigatório para barras lisas.
- Barras com alternância de solicitação não necessitam de ganchos.

- Com ou sem ganchos nos demais casos, não sendo aconselhado o uso de ganchos com barras de bitola maior que 32 mm ou feixes de barras

Nesse contexto, tem-se a necessidade de dimensionar o comprimento de ancoragem básico (l_b), definida pela ABNT NBR 6118:2014 como uma barra de armadura passiva necessária para que seja ancorada a força limite, desde que seja admitido uma tensão de aderência uniforme f_{bd} . As equações para tal cálculo estão expressas a seguir:

$$l_b = \frac{\Phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (17)$$

onde:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (18)$$

sendo

$\eta_1 = 2,25$ (CA - 50 para barra usual, nervurada, de alta aderência);

$\eta_2 = 1,0$ (situação de boa aderência);

$\eta_3 = 1,0$ (diâmetro inferior à 32mm).

Precisa-se obter o valor de f_{ctd} , através da expressão:

$$f_{ctd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (19)$$

Pode-se ainda, baseado no item 9.4.2.5 da ABNT NBR 6118:2014, reduzir o comprimento necessário, levando em conta que devido a combinação de barras usadas, as áreas de aço efetivas são maiores que a calculada. A redução em tais comprimentos é dada por:

$$l_{b,sec} = \alpha_1 \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (20)$$

onde:

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho

$A_{s,calc}$: Área de aço longitudinal calculadas pelo KMD

$A_{s,ef}$: Área de aço usada

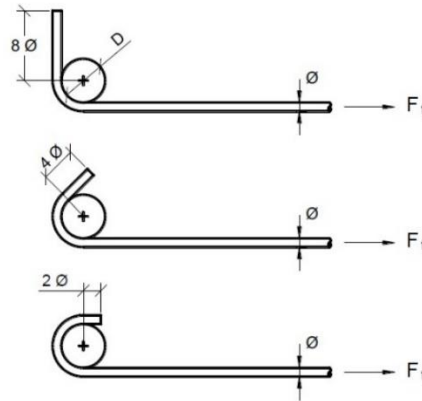
$l_{b,min}$: Maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 10 cm

2.9.3 Ganchos das Armaduras de Tração

O item 9.4.2.3 da ABNR NBR 6118:2014 dispõe das recomendações para tipos de ganchos nas extremidades das barras longitudinais (representados na Figura 17), sendo elas:

- Semicircular com ponta reta de no mínimo 2ϕ de comprimento.
- Aplicado com ângulo interno de 45° e ponta reta de comprimento mínimo de 4ϕ .
- Aplicado com ângulo reto com comprimento menor que 4ϕ .

Figura 17 - Geometria dos ganchos de barras tracionadas



Fonte: Bastos (2017).

Os diâmetros dos ganchos citados anteriormente devem apresentar valores de acordo com o da Tabela 5 retirado da ABNT NBR 6118:2014, tendo como finalidade evitar concentrações de tensão no concreto presente próximo as dobras e consequentemente evitando fissuras por fendilhamento do concreto.

Tabela 5 - Diâmetro dos pinos de dobramento dos ganchos

Bitola (mm)	Tipo de aço		
	CA-25	CA-50	CA-60
< 20	4 ϕ	5 ϕ	6 ϕ
≥ 20	5 ϕ	8 ϕ	-

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 6118 (2014).

2.9.4 Emenda de barras

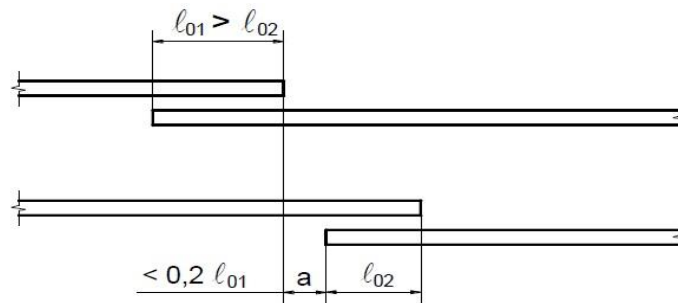
As barras de aço usadas na construção apresentam usualmente comprimentos em torno de 12 metros, onde, no comparativo com alguns elementos estruturais, pode ocorrer de

necessitar de barras maiores que os oferecidos no mercado, fazendo necessário a realização de uma emenda entre barras com auxílio de transpasse (BASTOS, 2018).

Antes de iniciar o cálculo é necessário identificar se existem mais de uma emenda em uma mesma seção do elemento analisado, assim como mostrado na Figura 18, sendo esta verificação feita da seguinte forma:

- se $a < 0,2 < l_0$, as emendas ocorrem na mesma seção.
- se $a > 0,2 > l_0$, as emendas ocorrem em seções diferentes.

Figura 18 - Emendas supostas na mesma seção transversal



Fonte: Bastos (2017).

As barras tracionadas que podem ser emendadas em uma mesma seção devem obedecer às seguintes proporções:

Tabela 6 - Proporção (%) máxima de barras tracionadas emendadas

Tipo de barra	Situação	Tipos de carregamento	
		Estático	Dinâmico
Alta aderência	Em uma camada	100	100
	Em mais de uma camada	50	50
Lisa	$\phi < 16$	50	25
	$\phi \geq 16$	25	25

Fonte: Adaptada de Bastos (2017).

2.9.5 Comprimento de transpasse de barras isoladas

A ABNT NBR 6118:2014 indica que quando a distância entre barras tracionadas e emendadas estiver entre 0 e 4ϕ deve-se considerar o cálculo do comprimento de transpasse como sendo:

$$l_{0t} = \alpha_{0t} \cdot l_{b,nec} \geq l_{0t,min} \quad (21)$$

onde:

$$l_{0t,min} \geq \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_{0t} \cdot l_b \\ 15 \phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (22)$$

Com α_{0t} dado pelo Tabela 7.

Tabela 7 - Valores do coeficiente em função de barras emendadas

Barras emendadas na mesma seção (%)	$\phi < 20$	25	33	50	>50
Valores de α_{0t}	1,2	1,2	1,6	1,8	2,0

Fonte: Adaptada de Bastos (2017).

Caso o comprimento livre entre as barras emendadas apresentar um valor maior que 4ϕ , o comprimento l_{0t} (calculado anteriormente) deve ter um acréscimo igual a distância entre as emendas.

Já para o cálculo do transpasse em armaduras comprimidas deve-se seguir a Equação 23:

$$l_{0c} = l_{b,nec} \geq l_{0c,min} \quad (23)$$

onde:

$$l_{0c,min} \geq \begin{cases} 0,6 \cdot l_b \\ 15 \phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (24)$$

2.9.6 Armadura transversal nas emendas por transpasse de barras isoladas

Em barras tracionadas na armadura principal, com $\phi < 16$ mm ou proporção de barras emendadas abaixo de 25%, o item 9.4.2.6 da ABNT NBR 6118:2014 deve ser satisfeito, porém caso $\phi \geq 16$ mm ou a proporção de barras emendadas na mesma seção for maior ou igual a 25%, a armadura transversal deve seguir os pontos destacados:

- Ser capaz de suportar a força equivalente à de uma barra emendada.

- Caso a distância entre as duas barras mais próximas de duas emendas em uma mesma seção for inferior a 10ϕ , as mesmas devem ser constituídas por barras fechadas.
- Se concentrar nos terços extremos da emenda.

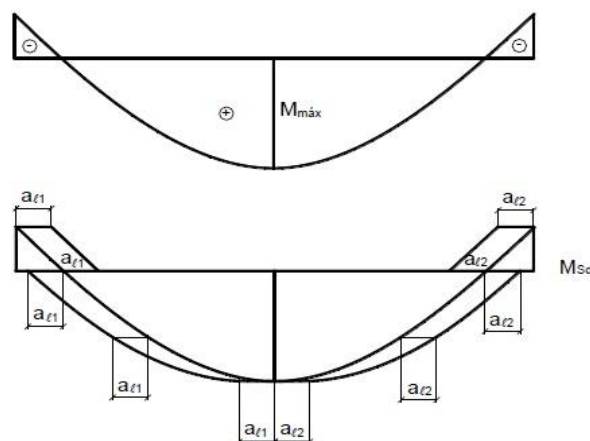
Vale ressaltar que para armaduras comprimidas serão adotados os mesmos critérios estabelecidos para barras tracionadas, desde que se considere pelo menos uma barra da armadura transversal posicionada a 4ϕ da extremidade das emendas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

2.9.7 Deslocamento do diagrama de momentos fletores (decalagem)

A decalagem ou deslocamento do diagrama de forças deve ser feito a fim de realizar uma compatibilização entre os valores de força atuantes na armadura tracionada (determinada no modelo da treliça de Ritter-Mörsch) e o valor da força que pode ser determinado a partir do diagrama de momentos fletores (ARAÚJO, 2018).

De maneira simplificada, calcula-se valores de “ a_i ” que serão adicionados em toda a extensão do diagrama dos momentos fletores, transladando o diagrama, e consequentemente aumentando os comprimentos finais das barras. A Figura 19, mostra como irá ser feito tal deslocamento.

Figura 19 - Diagrama de momento e diagrama de momento deslocado



Fonte: Bastos (2017).

Esse método é dividido em dois modelos distintos, que serão descritos a seguir. O modelo I parte do princípio que as bielas comprimidas fazem $\theta = 45^\circ$ com relação ao eixo horizontal e que V_c (Parcela do esforço cortante absorvido por mecanismos resistentes)

apresente um valor constante (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). O equacionamento desse modelo pode ser resumido como:

$$V_c = 0,6 \cdot \left(0,15 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}\right) \cdot b_w \cdot d \quad (25)$$

$$a_l = d \cdot \left[\frac{V_{sd,max}}{2 \cdot (V_{sd,max} - V_c)} \right] > 0,5 \cdot d \quad (26)$$

onde:

$V_{sd,max}$: força cortante de cálculo na seção mais solicitada da viga.

V_c : parcela da força cortante absorvida por mecanismos adicionais da treliça.

d : altura útil.

$a_l = d$, para $V_{sd,max} \leq V_c$.

$a_l \geq 0,5 \cdot d$, no caso geral.

$a_l \geq 0,2 \cdot d$, para estribos inclinados a 45° .

Já para o modelo II, considera-se que a inclinação θ varia entre 30° e 45° , com menores valores para V_c . O equacionamento para este caso, considerando a utilização de estribos verticais, é dada pela Equação 27:

$$a_l = 0,5 \cdot d \cdot \cot \theta \geq 0,5 \cdot d \quad (27)$$

2.9.8 Ancoragem da armadura de tração junto aos apoios

O item 18.3.2.4 da ABNT NBR 6118:2014 trata sobre a armadura na seção dos apoios, necessária para combater os esforços de tração próximos ao apoio, considerando a mais severa das seguintes situações:

- Caso tenha momentos negativos, deve-se obter a armadura para esse ponto através do dimensionamento da seção.
- Para garantir a ancoragem da diagonal de compressão nos apoios extremos, a armadura deve ser capaz de resistir a uma força de tração descrita por:

$$R_{s,d} = \frac{a_l}{d} \cdot V_d + N_d \quad (28)$$

com V_d sendo o esforço cortante no ponto e N_d , uma força de tração.

- Para apoios extremos e intermediários, com o prolongamento de uma parte da armadura de tração, correspondendo ao máximo momento positivo do tramo, onde:

$A_{s,apoio} \geq \frac{A_{s,v\tilde{a}o}}{3}$ se $M_{,apoio}$ com valores nulos, negativos e com valor menor que 0,5. $M_{v\tilde{a}o}$

$A_{s,apoio} \geq \frac{A_{s,v\tilde{a}o}}{4}$ se $M_{,apoio}$ negativo e de valor maior que 0,5. $M_{v\tilde{a}o}$

Por fim, se os apoios extremos apresentarem momentos negativos ou nulos deve-se ancorar as barras a partir da face do apoio, apresentando um comprimento maior que as seguintes opções:

- $l_{b,nec}$.
- $(r + 5,5.\phi)$, com r sendo o raio de curvatura interna dos ganchos.
- 60 mm.

3 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta desenvolvida nesse trabalho consiste em um *software* que, ao ser alimentado com dados vindos do pré-dimensionamento, ações atuantes, análise estrutural e dimensionamento, gera um detalhamento das barras longitudinais ao longo da viga, levando em consideração as indicações da ABNT NBR 6118:2014. Toda a programação foi realizada com o auxílio da ferramenta *Visual Studio*.

O programa desenvolvido é limitado a no máximo oito elementos, podendo ter até três tramos por vigas sendo capaz de calcular o pré-dimensionamento, atribuir as cargas fazendo as majorações necessárias, gerar as ações atuantes, realizar a análise estrutural, fornecer valores de momentos e cortantes máximos, bem como seus respectivos gráficos, calcular as áreas de aço para as seções mais solicitadas substituir pela mínima quando necessário e detalhar as barras longitudinais ao longo da viga.

Para a utilização da ferramenta, será necessário que o usuário forneça valores relacionadas a geometria das vigas e pilares, características do concreto utilizado, classe de agressividade do meio, solicitações atuantes em cada tramo e bitolas usadas em cada seção dimensionada.

A recepção de dados é feita através de uma interface, que foi dividida em abas organizadas em uma sequência lógica de dimensionamento. A partir da captação dessas informações é realizada toda a rotina de cálculo em segundo plano, retornando para o usuário os resultados pertinentes para o detalhamento.

O *software* dispõe inicialmente de uma aba para a entrada de dados iniciais (FIGURA 20), tais como características do aço e do concreto, geometria da viga, número de tramos, classe de agressividade, bem como a predefinição de bitolas transversais e longitudinais. A recepção de dados é limitada para no máximo oito elementos, além de possuir a opção de padronizar as bases de todas as vigas analisadas, dispensando o preenchimento manual de todas elas.

Figura 20 - Interface de entrada dos dados iniciais

Dimensionamento de vigas

Dados Iniciais | Pré-Dimensionamento | Ações Atuantes | Banco de dados | Análise Estrutural | Dimensionamento | Detalhamento

Dados de Entrada do Material

Fck: MPa
Fyk: MPa
Ecs: GPa

Dados de Entrada da Geometria

N° de Vigas:
As vigas possuem base padrão? ☐ Sim ☐ Não
C. Agressividade: ϕ_t : mm
Cobrimento: cm ϕ_t : mm

Concepção Estrutural Padrão

V01 V02 V03 V04 V05 V06 V07 V08

COMPRIMENTO DOS TRAMOS

N° de Tramos	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
V01	m	m	m
V02	m	m	m
V03	m	m	m
V04	m	m	m
V05	m	m	m
V06	m	m	m
V07	m	m	m
V08	m	m	m

Salvar

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a aba de pré-dimensionamento, o layout inicial apresenta a opção de escolher qual viga será visualizada, como apresentada na Figura 21. Ao selecionar o número da viga, um esboço do corte transversal da mesma aparece em tela, além de informações adicionais, mostrando os valores de cobrimento e bitolas longitudinais e transversais (definidas na aba de dados iniciais) e altura da viga vindo do pré-dimensionamento, calculado de acordo com a Equação 1. Ao clicar no botão “calcular”, os dados são salvos em suas variáveis e plotados nas seções transversais demonstradas, calculando-se a altura útil de acordo com a Equação 4.

Figura 21 - Interface para o pré-dimensionamento

Dimensionamento de vigas

Dados Iniciais | Pré-Dimensionamento | Ações Atuantes | Banco de dados | Análise Estrutural | Dimensionamento | Detalhamento

Viga: 04

V01

h: cm
 ϕ_k : mm
 ϕ_t : mm
c: cm
Altura Útil (d): 16 cm

V02

h: cm
 ϕ_k : mm
 ϕ_t : mm
c: cm
Altura Útil (d): 16 cm

V03

h: cm
 ϕ_k : mm
 ϕ_t : mm
c: cm
Altura Útil (d): 16 cm

V04

h: cm
 ϕ_k : mm
 ϕ_t : mm
c: cm
Altura Útil (d): 16 cm

Calcular

Fonte: Autoria própria (2019).

Seguindo para as ações atuantes (FIGURA 22), o aplicativo apresenta opções de entrada das ações atuantes referentes ao revestimento, alvenaria, cargas acidentais e cargas vindas da laje. Essa última opção foi feita para uma posterior junção com algum programa de lajes. Vale ressaltar que os mesmos espaços que recebem dados de carregamento para a viga 1, também servem para as demais vigas, sendo necessário que seja indicado em qual viga deve-se adicionar o carregamento descrito.

Por fim, sempre que novos dados forem inseridos, se faz necessário salvar esses dados clicando no botão calcular. Sempre que novas informações são salvas para cada viga é mostrado em tela o resultado do cálculo do peso próprio de cada viga, bem como um esboço da distribuição das cargas nos tramos da viga analisada, mostrando as cargas características e as majoradas.

Figura 22 - Interface para ações atuantes

The screenshot shows the 'Dimensionamento de vigas' application window. The 'Ações Atuantes' tab is active. At the top, there are tabs for 'Dados Iniciais', 'Pré-Dimensionamento', 'Ações Atuantes', 'Banco de dados', 'Análise Estrutural', 'Dimensionamento', and 'Detalhamento'. Below the tabs, there are input fields for 'Viga: 01' and 'N° de Tramos: 1'. The 'Cargas Permanentes' section includes fields for 'Peso Próprio', 'Revestimento', and 'Alvenaria', each with a unit of 'kN/m'. The 'Cargas Variáveis' section includes a field for 'Carga Acidental' with a unit of 'kN/m'. There are also checkboxes for 'Carga das lajes' and 'Com carga pontual' for each of the three spans (Tramo 1, 2, 3). A 'Calcular' button is located at the bottom center. On the right side, there is a diagram of a beam with two supports.

Fonte: Autoria própria (2019).

Na sequência, é apresentado uma aba com um resumo dos dados atribuídos às vigas, mostrando sua altura, base, comprimento total e combinações de ações para cada tramo (FIGURA 23). Essa função é importante pois permite ao usuário uma conferência rápida dos valores atribuídos, para, em caso de erros, possa retomar às abas anteriores e fazer as alterações necessárias.

Figura 23 - Banco de dados

V01	V02	V03	V04
Altura: # cm	Altura: 40 cm	Altura: 80 cm	Altura: 40 cm
Base: # cm	Base: 15 cm	Base: 15 cm	Base: 15 cm
Comprimento: # m	Comprimento: 8 m	Comprimento: 8 m	Comprimento: 8 m
Combinação de Ações Máximas:	Combinação de Ações Máximas:	Combinação de Ações Máximas:	Combinação de Ações Máximas:
Solicitação Tramo 1: # kN/m	Solicitação Tramo 1: 11,9 kN/m	Solicitação Tramo 1: 14 kN/m	Solicitação Tramo 1: 11,9 kN/m
Solicitação Tramo 2: # kN/m	Solicitação Tramo 2: 11,9 kN/m	Solicitação Tramo 2: 14 kN/m	Solicitação Tramo 2: 11,9 kN/m

Fonte: Autoria própria (2019).

Antes de calcular a análise estrutural é necessário que se adicione as características geométricas dos apoios existentes nas vigas, indicando a largura e comprimento de cada pilar, bem como seu comprimento total inferior e superior (caso a construção apresente dois pavimentos), sendo, em geral, o pé esquerdo da construção (FIGURA 24). Essas informações são necessárias para o cálculo das constantes elásticas usadas no modelo melhorado de viga contínua, apresentado no tópico 2.6.1.

Figura 24 - Entrada de dados dos apoios

Dados de Pilares

Viga: N° de Pavimentos:

	P1	P2	P3	P4
a:				
b:				
Lsup:				
Linf:				

Ok

Diagrama 1: Pilar com largura 'b' e altura 'a'.

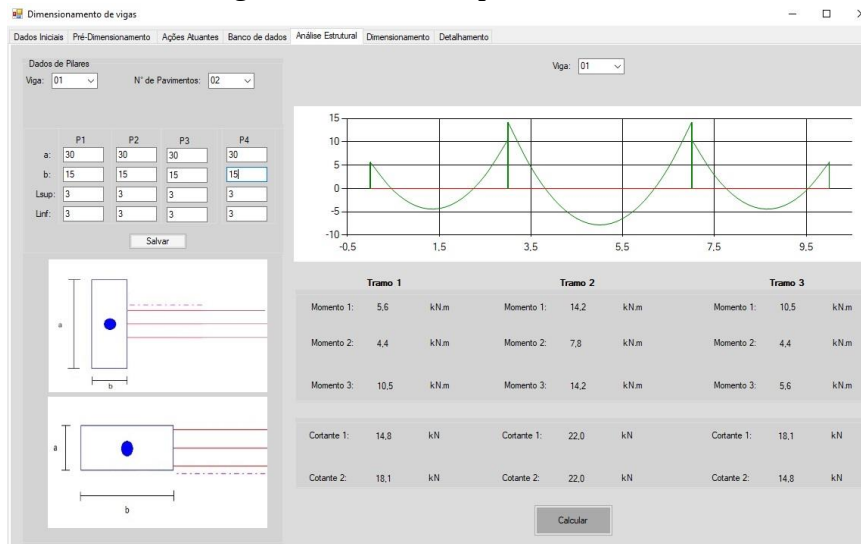
Diagrama 2: Pilar com largura 'b' e altura 'a'.

Calcular

Fonte: Autoria própria (2019).

De posse de todos os dados referentes as vigas e seus respectivos pilares, é possível realizar a análise estrutural estabelecendo todos os seus momentos e cortantes máximos, bem como seu diagrama de momentos, podendo ser visualizado viga por viga (FIGURA 25).

Figura 25 - Interface para análise estrutural

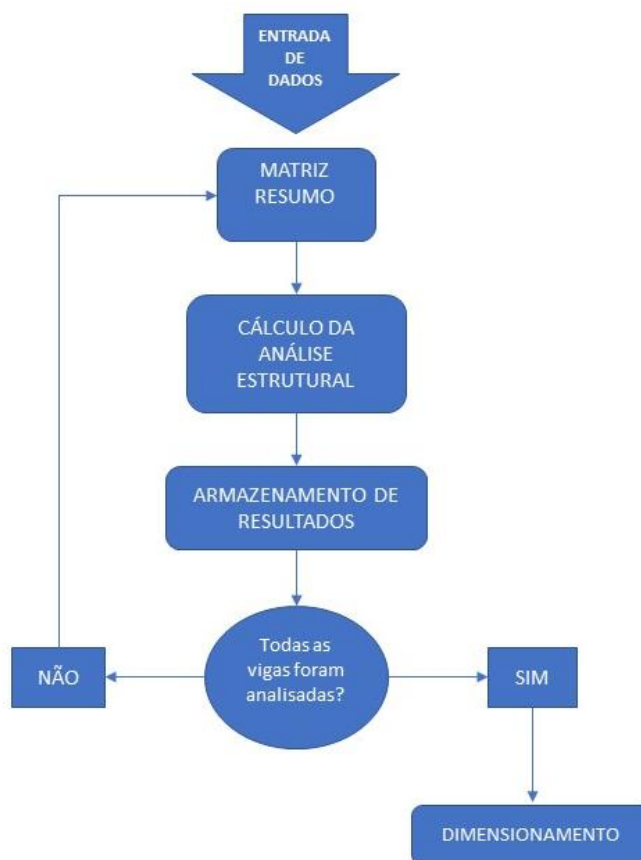


Fonte: Autoria própria (2019)

Todos os dados anteriormente inseridos ficam armazenadas em um matriz resumo, que pode ser usada a qualquer momento em que for solicitada pelo programa. Dessa forma, o cálculo da análise é feito em uma programação genérica, identificando o número de vigas e realizando o cálculo de uma por vez, buscando as características da viga 1 na matriz resumo, calculando a análise total, armazenando seus resultados, retornando para a matriz resumo, buscando dados da viga 2, novamente fazendo a análise estrutural e armazena os resultados, procedendo da mesma forma para a demais vigas.

Pode-se afirmar que o funcionamento dessa análise é feito através de *loopings*, usando a mesma programação para todas as análises, o qual tem-se como critério de parada o número de vigas indicadas na aba inicial. Um esquema para a rotina de cálculo é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Rotina de cálculo da análise estrutural



Fonte: Autoria própria (2019).

Vale ressaltar que toda a análise realizada pela programação genérica explicada acima é baseada no método dos deslocamentos descrito no tópico 2.6.2. Desse processo, são encontrados os coeficientes usados para a formulação da equação geral dos momentos e dos cortantes, para a partir deles ser gerado os diagramas.

De posse dos valores de momentos máximos, foi implementado o código de cálculo das áreas de aço, usando a formulação apresentada no tópico 2.7.5, aparecendo em tela valores de área de aço para cada momento fletor máximo negativo e positivo, sendo automaticamente substituída pela área de aço mínima se necessário. Destaca-se que nos apoios onde apresenta dois momentos negativos distintos o dimensionamento é realizado para o maior entre eles, buscando deixar a estrutura mais segura possível.

Nesse contexto, é apresentada a aba de dimensionamento (FIGURA 27), a qual é mostrada as áreas de aço calculadas para cada seção de cada elemento analisado, sendo mostrada uma viga por vez, de acordo com a escolha do usuário. Nesse *layout* foi

implementada a opção de escolha das bitolas desejadas para cada área de aço, de forma que ao se determinar a bitola, tem-se como resultado o número de barras que será necessária naquela seção, bem como a área nominal de uma única barra e a área efetiva para as barras escolhidas, podendo ser comparada com os valores calculados e através de testes escolher aquela que mais se aproxima do calculado.

Figura 27 - Interface para dimensionamento

Dimensionamento de vigas

Dados Iniciais Pré-Dimensionamento Ações Atuantes Banco de dados Análise Estrutural **Dimensionamento** Detalhamento

Viga: 31

Dimensionamento Longitudinal

As-1: 0,63 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-2: 0,59 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-3: 1,66 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-4: 0,88 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-5: 1,66 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-6: 0,59 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²
As-7: 0,63 cm ²	ϕ l: mm	Asnom: # cm ²
N° de Bitolas: #	bitolas de # mm	Asgef: # cm ²

Limite de dimensionamento
Asmin: 0,59 cm²

Diagrama de Dimensionamento Longitudinal:

Salvar

Fonte: Autoria própria (2019).

Por fim, tem-se a página de detalhamento, na qual ao clicar no botão “Gerar Detalhamento” são realizados todos os cálculos em segundo plano, referentes a essa fase do projeto. Pode-se selecionar qual viga deseja analisar, sendo mostrado na tela o seu detalhamento longitudinal através de um desenho. Os comprimentos totais de cada barra, bem como suas bitolas e número de barras podem ser visualizadas ao escolher entre armaduras positivas ou armaduras negativas (FIGURAS 28, 29 e 30). É possível ainda, para fins de conferência, marcar a opção comprimentos adicionais e visualizar os valores de comprimento de ancoragem, decalagem e comprimento dos ganchos.

Figura 28 - Detalhamento e descrição de armaduras negativas



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 29 - Detalhamento e descrição de armaduras positivas



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 30 - Detalhamento e descrição dos comprimentos adicionais

Dimensionamento de vigas

Dados Iniciais Pré-Dimensionamento Ações Atuantes Banco de dados Análise Estrutural Dimensionamento Detalhamento

Viga: 01 Gerar Detalhamento

☐ Amaduradas Negativas
☐ Amaduradas Positivas
☒ Comprimentos adicionais

Comprimentos adicionais		
Para área de aço 1	#	cm
Para área de aço 2	#	cm
Para área de aço 3	#	cm
Para área de aço 4	#	cm
Para área de aço 5	#	cm
Para área de aço 6	#	cm
Para área de aço 7	#	cm

Comprimentos adicionais		
Tamanho do gancho	0,00	cm
Decalagem	0,00	cm

Fonte: Autoria própria (2019).

Todo o cálculo referente aos comprimentos de ancoragem é realizado para cada seção da viga, podendo haver diferentes comprimentos de ancoragem em um mesmo elemento analisado. Já os comprimentos relacionados ao gancho foram feitos para a maior bitola usada em todo o projeto, padronizando um único comprimento de gancho para todo o elemento, facilitando a execução e deixando a estrutura mais segura.

Outra medida tomada para que facilite a execução do projeto em obra, foi a adoção de dois porta estribos para a armadura positivas, dessa forma é garantido que todas as armaduras positivas tenham pelo menos duas barras em toda extensão da viga, sendo adicionadas novas barras apenas nas seções mais solicitadas, caso seja necessário tal adição.

Por fim, os comprimentos de decalagem são calculados para o máximo cortante presente na viga, novamente garantindo a segurança da viga. Toda a base de cálculos implementados nesse detalhamento está descrita no tópico 2.9.

4 APLICAÇÕES NUMÉRICAS

Nesse tópico serão realizadas testes e aplicações numéricas com seus resultados já conhecidos, vindos da literatura e de *softwares* de dimensionamento e detalhamento de vigas, a fim de, por meio da comparação de resultados, validar a eficiência do *software* desenvolvido. Outra aplicação que será realizada diz respeito a integração entre três implementações para o cálculo de todos os elementos (laje, viga e pilares) em concreto armado. Vale salientar que essa implementação conjunta (cálculo de lajes, cálculo de vigas para realizar o dimensionamento e detalhamento das armaduras longitudinais na seção transversal, e o cálculo de pilares) foi criado em paralelo a essa proposta tentando elaborar um *software* completo para o dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado para fins de pequenas edificações.

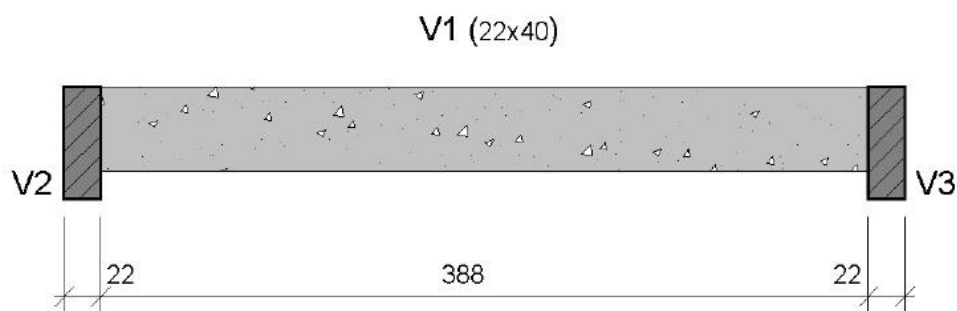
4.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

A fim de validar a implementação dos métodos e os resultados obtidos no aplicativo, será realizado testes com auxílio de um exemplo da literatura e com a aplicação de uma viga exemplo no *software ftool*.

4.1.1 Validação das áreas de aço e detalhamento com exemplo da literatura

Para a primeira aplicação será analisado um exemplo proposto por Pinheiro (2007), sendo realizado o cálculo de uma viga com apenas um tramo, estando biapoiada em outras duas vigas. O desenho do elemento analisado está apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Forma da viga biapoiada



Fonte: Pinheiro (2007).

Com essa aplicação, pretende-se validar os valores calculados referentes a áreas de aço e detalhamento gerados pelo aplicativo desenvolvido, fazendo uma comparação com os resultados do exercício proposto. Os demais dados de entrada fornecidos por Pinheiro (2007) estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados de entrada para o exemplo calculado

Parâmetro	Valores
Dimensão da viga (cm)	22x40
Classe do concreto	C25
Classe do aço	CA-50
Cobrimento (cm)	2,5 (Classe I)
Vão teórico (cm)	410
Carga da alvenaria (kN/m)	12,80
Carga da laje (kN/m)	35,00

Fonte: Autoria própria (2019).

Vale ressaltar que, devido o elemento se apresentar apoiado sobre outras duas vigas, não consideramos a atuação da rigidez dos apoios na obtenção de momentos, assumindo que os apoios não absorvem momentos vindos da viga, desconsiderando qualquer efeito de deformação deles.

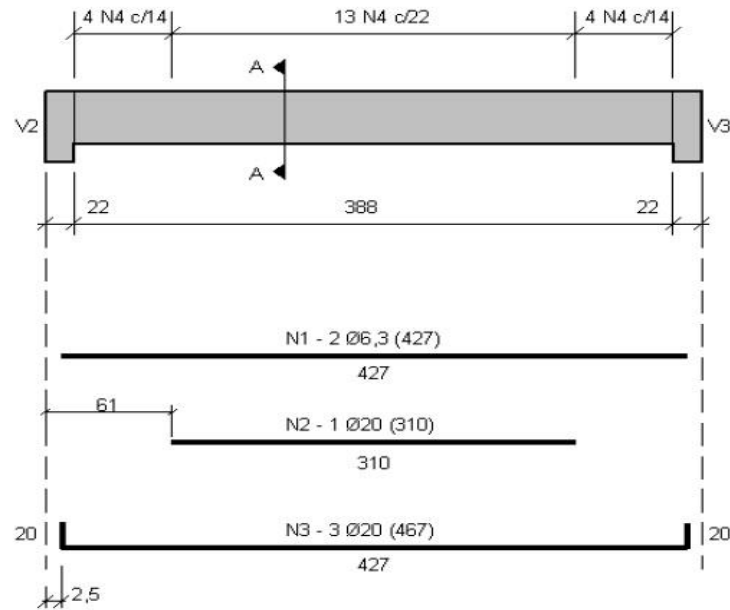
De posse dos dados descritos anteriormente é desenvolvido todo o cálculo necessário para a obtenção dos momentos, áreas de aço, bem como seu detalhamento longitudinal, sendo fornecido pelo autor um esboço do detalhamento das armaduras, conforme apresentada na Figura 32. Todos os resultados pertinentes estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do cálculo realizado por Pinheiro (2007)

Parâmetro	Valores
Altura útil (cm)	35,9
Peso próprio (kN/m)	2,2
Carga total (kN/m)	50
Momento no meio do vão (kN.m)	105,1
Momento nas extremidades (kN.m)	0
Área de aço (cm ²)	12,3
Nº de barras e bitola	4 Ø20
Decalagem (cm)	32
Comprimento de ancoragem (cm)	73
Gancho (cm)	20
Comprimento de N2 (cm)	310
Comprimento da estratificação p/N2 (cm)	204
Comprimento de N3 (cm)	467

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32 - Detalhamento da viga biapoiada



Fonte: Pinheiro (2007).

Nesse contexto, são preenchidos os dados iniciais na primeira aba do *software* aqui proposto, contendo o número de vigas analisadas, o comprimento do elemento e as características do concreto. Para o módulo de elasticidade secante do concreto foi usado 24 GPa, sendo este o valor usual para um concreto de 25 MPa. Outro fator a ser destacado, é que Pinheiro (2007) usou barras longitudinais de 20 mm para o cálculo do pré-dimensionamento, bem como de 6,3 mm para as armaduras transversais. O preenchimento da aba está demonstrado na Figura 33.

Figura 33 - Entrada de dados do exemplo no aplicativo

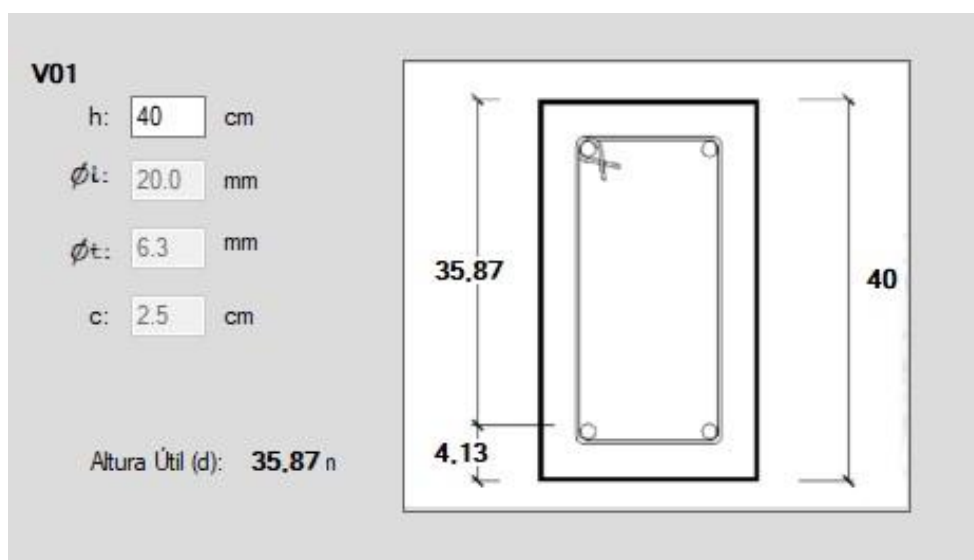
Fonte: Autoria própria (2019).

Do pré-dimensionamento gerado pelo aplicativo, é indicado que seja projetado uma viga com no mínimo 34 cm de altura, porém, como indicado no exemplo analisado, o elemento dimensionado deve ter 40 cm de altura, sendo alterado este valor no próprio *layout*.

Pode-se observar que a geometria da viga foi feita de forma a ser o mais segura possível apresentando uma altura de 6 cm maior que a mínima indicada. Essa prática também faz com que no dimensionamento final, tenha-se uma viga com uma menor concentração de armaduras, tanto pelo maior espaço para organizá-las quanto pela diminuição das áreas de aço necessárias para realizar a armação.

Após a alteração, é calculada a altura útil, apresentando o valor de 35,87 cm, aproximando do calculado no exemplo, descrito na Tabela 9. A Figura 34 apresenta o esboço da seção da viga gerado após o pré-dimensionamento.

Figura 34 - Esboço da seção da viga, gerada pelo aplicativo



Fonte: Autoria própria (2019).

Partindo para o cálculo das ações atuantes, observa-se que o exemplo não apresenta cargas referentes ao revestimento e carga accidental, sendo preenchidas com o valor zero. A parcela referente ao peso próprio é exibida em tela com o valor de 2,20 kN/m, sendo este o valor declarado no exemplo proposto. Por fim, tem-se uma carga total de 50 kN/m, que ao ser majorada assume o valor de 70 kN/m. Todos os valores preenchidos e os resultados gerados das ações atuantes estão expostas na Figura 35.

Figura 35 - Preenchimento de dados referentes as ações atuantes

Cargas Permanentes:

Viga: 01 N° de Tramos: 1

☒ Carga das lajes

☒ Tramo 1 ☐ Tramo 2 ☐ Tramo 3

Peso Próprio: 2,2 kN/m

Revestimento: 0 kN/m

Alvenaria: 12,80 kN/m

Tramo 1

☐ Com carga pontual

Carga da laje na viga: 35 kN/m

Cargas Variáveis:

Carga Acidental: 0 kN/m

Total: 0 kN/m

Combinação de Ações Máximas:

Solicitação Tramo 1: 70,00 kN/m

Total: 50,00 kN/m

70,00 kN/m

Fonte: Autoria própria (2019).

Para o cálculo da análise estrutural, faz-se necessário a entrada de dados referentes aos apoios do elemento estudado, porém como dito anteriormente, é desconsiderado o efeito da rigidez das vigas que sustentam o elemento analisado. Dessa forma, foi considerado as dimensões geométricas dos apoios como sendo zero, anulando o uso das molas apresentado no modelo de viga continua melhorada, uma vez que se resulta em um momento de inércia nulo (EQUAÇÃO 5). Ao zerar os valores referentes a geometria dos apoios, pode-se inserir qualquer valor de comprimento para eles, uma vez que o resultado sempre será zero, sendo inserido o valor 1. É importante dizer que esse método de adequação ao exemplo não prejudicará os resultados, como será demonstrado posteriormente. A Figura 36 apresenta o preenchimento dessas informações no aplicativo.

Figura 36 - Dados referentes aos apoios

Dados de Pilares

Viga: 01 N° de Pavimentos: 01

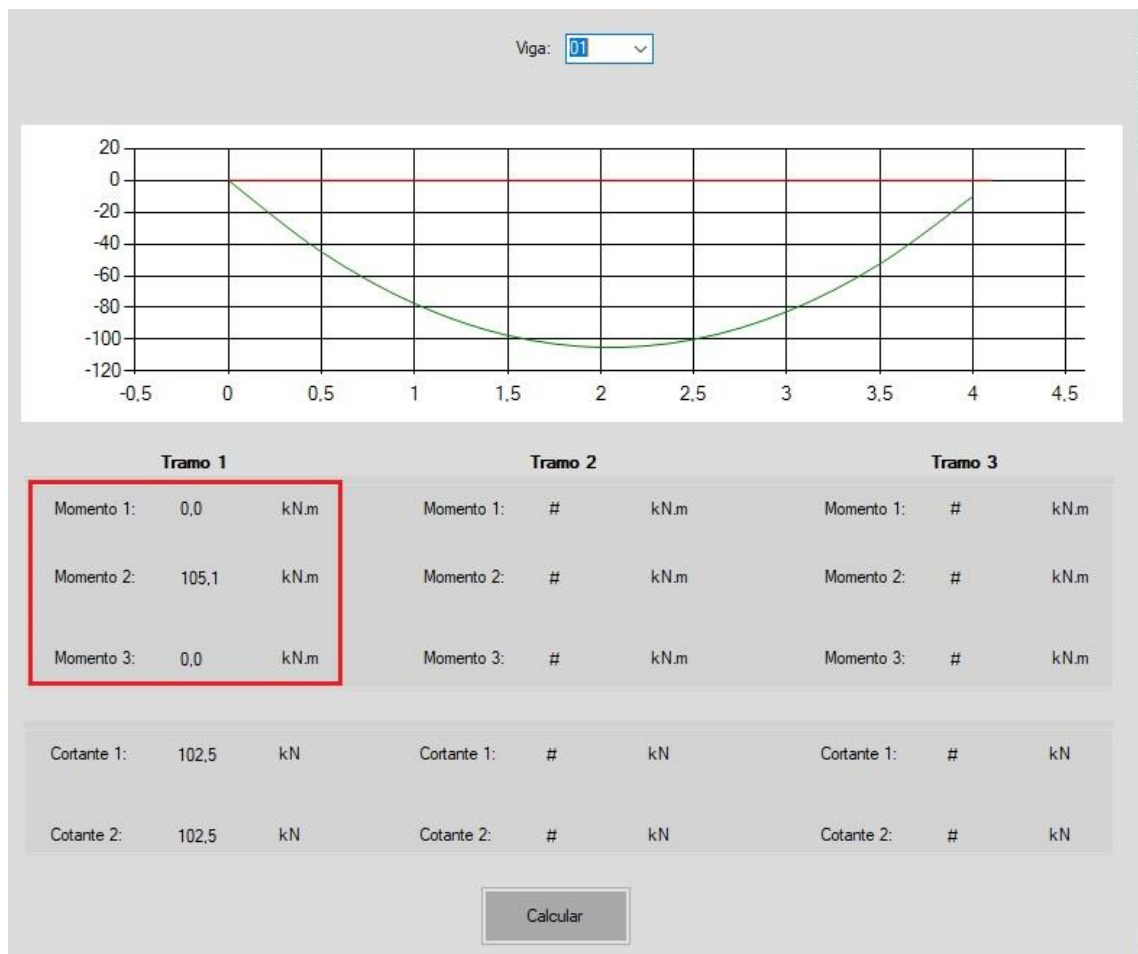
	P1	P2
a:	0	0
b:	0	0
Lsup:	1	1
Linf:	1	1

Salvar

Fonte: Autoria própria (2019).

De posse de todas as informações, foi gerado o diagrama de momentos fletores, sendo informado o momento máximo, apresentando o valor de 105,1 kN.m no meio do vão, e zero nas suas extremidades, assim como descrito por Pinheiro (2007). Tal resultado confirma a não alteração dos resultados pelo método usado para desconsiderar o efeito dos apoios, descrito anteriormente. O gráfico de momento e seus respectivos valores estão apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Diagrama de momento fletor e seus valores



Fonte: Autoria própria (2019).

Comentando inicialmente sobre as armaduras negativas, é visto que no exemplo apresentado não está descrito nenhuma armadura negativa, diferentemente do que foi gerado no aplicativo. Isso acontece, pois, toda a programação foi feita partindo da premissa de que será gerado algum valor de momento nos apoios, calculando-se uma área de aço para esse valor, e substituindo pela armadura mínima caso necessário. Dessa forma, ao gerar um momento nulo, resulta-se em uma área de aço nulo, porém prontamente substituída pela

mínima, no valor de $1,32 \text{ cm}^2$. Esse fato confirma o funcionamento da substituição de armaduras pequenas pela mínima e indica que, assim como no exemplo, a armadura calculada também foi nula (porém substituída pela mínima).

Seguindo para o dimensionamento da estrutura, são gerados pelo *software* valores de armaduras negativas e positivas, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Armaduras geradas pelo aplicativo

Viga: 01

Dimensionamento Longitudinal

As-1: $1,32 \text{ cm}^2$	$\phi L:$ 10,0 mm	Asnom: $0,800 \text{ m}^2$
N° de Bitolas: 2	bitolas de 10,0 mm	Asef: $1,60 \text{ cm}^2$
As-2: $12,08 \text{ cm}^2$	$\phi L:$ 20,0 mm	Asnom: $3,150 \text{ m}^2$
N° de Bitolas: 4	bitolas de 20,0 mm	Asef: $12,60 \text{ cm}^2$
As-3: $1,32 \text{ cm}^2$	$\phi L:$ 10,0 mm	Asnom: $0,800 \text{ m}^2$
N° de Bitolas: 2	bitolas de 10,0 mm	Asef: $1,60 \text{ cm}^2$

Fonte: Autoria própria (2019).

Quanto as armaduras positivas, o aplicativo gerou um valor de $12,08 \text{ cm}^2$ de área de aço, menor que os $12,29 \text{ cm}^2$ indicado na solução do exemplo. Isso ocorre pois o equacionamento utilizado na solução do exercício leva em consideração o uso de uma tabela com coeficientes de dimensionamento pré-estabelecidos. Dessa forma, quando comparado ao exemplo analisado, o *software* se mostrou mais exato e econômico, apresentando uma menor área de aço, uma vez que se utiliza de equações para a determinação exata dos coeficientes inerentes ao dimensionamento.

Quanto as bitolas usadas, para as armaduras negativas foi escolhida bitolas de 10 mm, sendo necessárias duas barras desse diâmetro e para a armadura positiva foram escolhidas bitolas de 20 mm, sendo necessário o uso de 4 barras, assim como descrito na solução do exemplo analisado.

Seguindo para o detalhamento, tem-se inicialmente o cálculo da decalagem, apresentando um valor de 36 cm, enquanto no exemplo apresenta um valor de 32 cm. Da mesma forma, os comprimentos de ancoragem gerados no *software* foram menores que o calculado no exemplo, onde o aplicativo apresenta um valor de 72 cm, enquanto o autor indica uma ancoragem de 75 cm.

O menor valor da ancoragem é explicado pelo fato de que o cálculo das áreas de aço foi mais efetivo no aplicativo, fazendo com que obtivesse uma menor área de aço, influenciando diretamente no cálculo do comprimento de ancoragem necessário (equação 20), no qual a ancoragem calculada é reduzida por um fator formado pela divisão entre a área de aço calculada e a efetiva. Dessa forma, tem-se uma área de aço calculada menor, com um fator alfa menor e uma ancoragem mais reduzida.

Figura 39 - Comprimentos adicionais calculados pelo aplicativo

Comprimentos de ancoragem	
Para área de aço 1	31,08 cm
Para área de aço 2	72,23 cm
Para área de aço 3	31,08 cm
Para área de aço 4	# cm
Para área de aço 5	# cm
Para área de aço 6	# cm
Para área de aço 7	# cm
Comprimentos adicionais	
Tamanho do gancho	16,00 cm
Decalagem	35,87 cm

Fonte: Autoria própria

Os ganchos calculados pelo autor apresentam um comprimento de 20 cm, sendo indicado pelo aplicativo um gancho de 16 cm. Essa diferença de 4 cm ocorreu pois o autor calculou os ganchos através da multiplicação do diâmetro das bitolas usadas por 10, sendo que na ABNT NBR 6118:2014 indica para os ganchos retos que a multiplicação seja feita por 8, sendo este o método implementado na programação. Todos os valores de decalagem, comprimento de ancoragem ganchos, estão apresentadas na Figura 39.

Os valores dos comprimentos de barras de aço (em centímetros) calculados pela ferramenta estão demonstrados nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 - Resumo das armaduras negativas geradas pelo aplicativo

Barras no apoio 1			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	10,0	83
N2	1,0	10,0	83
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 41 - Resumo das armaduras positivas geradas pelo aplicativo

Armaduras Negativas
☒ Armaduras Positivas
☐ Comprimentos adicionais

Porta estribos

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	2	20	442

Barras no tramo 1

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	1,0	20,0	506
N3	1,0	20,0	421
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no tramo 2

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no tramo 3

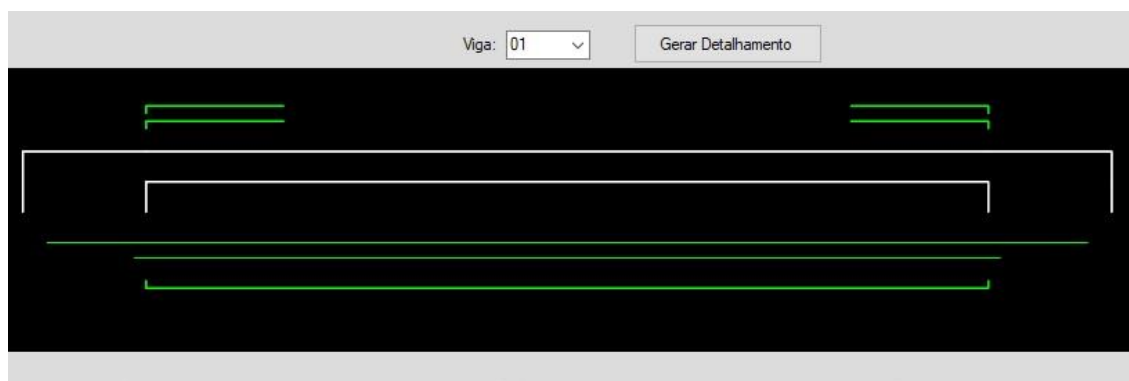
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

A fim de comparar os valores gerados a partir da estratificação do diagrama de momento fletor, pode-se escolher o comprimento da menor barra (N3) descrita no *software* e subtrair os valores de decalagem e comprimento de ancoragem, chegando a um valor de 2,05 m, aproximando dos 2,04 m calculados no exemplo.

Observa-se que o detalhamento gerado pelo *software* (FIGURA 42) apresenta duas barras que ultrapassam o limite dos apoios. Isso ocorre, pois, a distribuição do momento fletor e os comprimentos adicionais geraram valores de comprimento de barra maiores do que a própria viga. Dessa forma, é indicado usar as 4 barras escolhidas amarradas com ganchos junto aos apoios, passando por toda extensão da viga.

Figura 42 - Esboço do detalhamento gerado pelo aplicativo



Fonte: Autoria própria (2019).

É importante salientar que a ferramenta foi desenvolvida com o foco em construções de até dois pavimentos, em geral residencial, no qual as cargas das lajes nas vigas dificilmente atingem a magnitude de 50 kN/m (assim como no exemplo), gerando detalhamentos onde não ocorre essa invasão das barras nos apoios.

Nesse contexto, tem-se 2 barras de aço detalhadas com um comprimento de 4,42 m, enquanto as barras exibidas na questão têm comprimento de 4,67 m. Essa diferença é fruto da não consideração dos apoios descrita anteriormente.

Observa-se que foi optado por Pinheiro (2007) distribuir ao longo da viga três barras de aço, deixando N2 no centro. Isso só foi possível porque no cálculo dos comprimentos totais a parcela do comprimento de ancoragem foi substituída por $10 \varnothing$ (onde $\varnothing$ é o diâmetro da barra), gerando um menor comprimento. Caso considerasse a parcela de 75 cm calculada de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, mostraria uma barra de aço com 4,18 m de comprimento (se aproximando dos valores calculados) acompanhando as outras três barras ao longo de toda viga, assim como indicada pelo *software*.

Quanto as barras negativas, foram calculadas a partir dos comprimentos adicionais, não havendo nenhum comprimento de barra vinda da estratificação de momentos (uma vez que foi considerado que ali não havia momentos). Todos os resultados gerados pelo *software* proposto e retirados da aplicação analisada na literatura estão dispostos na Tabela 10 em valores e em diferença relativa entre Literatura (LIT) e *software* (SOF).

Tabela 10 - Comparação entre os resultados descritos na literatura e gerados pelo aplicativo

Parâmetro	Valores descritos em Pinheiro (2007)	Valores do <i>software</i>	Diferença relativa (LIT-APP) (%)
Altura útil (cm)	35,9	35,87	0,08
Peso próprio (kN/m)	2,2	2,2	0,00
Carga total (kN/m)	50	50	0,00
Momento no meio do vão (kN.m)	105,1	105,1	0,00
Momento nas extremidades (kN.m)	0	0	0,00
Área de aço (cm ²)	12,3	12,08	1,71
Nº de barras e bitola	4 Ø20	4 Ø20	0,00
Decalagem (cm)	32	36	12,50
Comprimento de ancoragem (cm)	73	72	1,37
Gancho (cm)	20	16	20,00
Comprimento de N2 (cm)	310	421	35,81
Comprimento da estratificação p/N2 (cm)	204	205	0,49
Comprimento de N3 (cm)	467	442	5,35

Fonte: Autoria própria (2019).

4.1.2 Validação do cálculo dos momentos pelo modelo de viga contínua melhorada

Após a validação dos resultados de dimensionamento e detalhamento de vigas (validada com o exemplo anterior), será calculado nessa seção uma viga contínua, com apoios definidos, sendo inserido tal estrutura no *software ftool*, gerando diagrama de momentos que serão comparados com o fornecido pelo *software* proposto, verificando os seus valores.

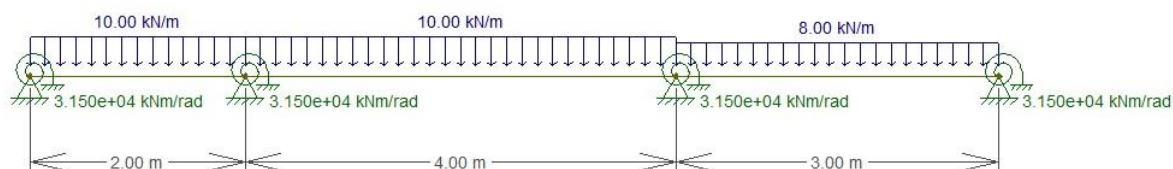
As informações básicas da viga que será analisada estão descritas na Tabela 11, enquanto na Figura 43 tem-se o lançamento da estrutura no *ftool*.

Tabela 11 - Informações da análise proposta

Parâmetro	Valores
Comprimento tramo 1 (cm)	200
Comprimento tramo 2 (cm)	400
Comprimento tramo 3 (cm)	300
Número de pavimentos	2
Comprimentos da seção dos apoios (cm)	14x30
Comprimento do pilar superior (Pé direito) (cm)	300
Comprimento do pilar inferior (Pé direito) (cm)	300
Constante da mola (k) (kNm/rad)	31500
Comprimentos da seção da viga (cm)	20x30
Carga distribuída para tramo 1 (kN/m)	10,0
Carga distribuída para tramo 2 (kN/m)	10,0
Carga distribuída para tramo 3 (kN/m)	8,0

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 43 - Lançamento estrutural no software ftool

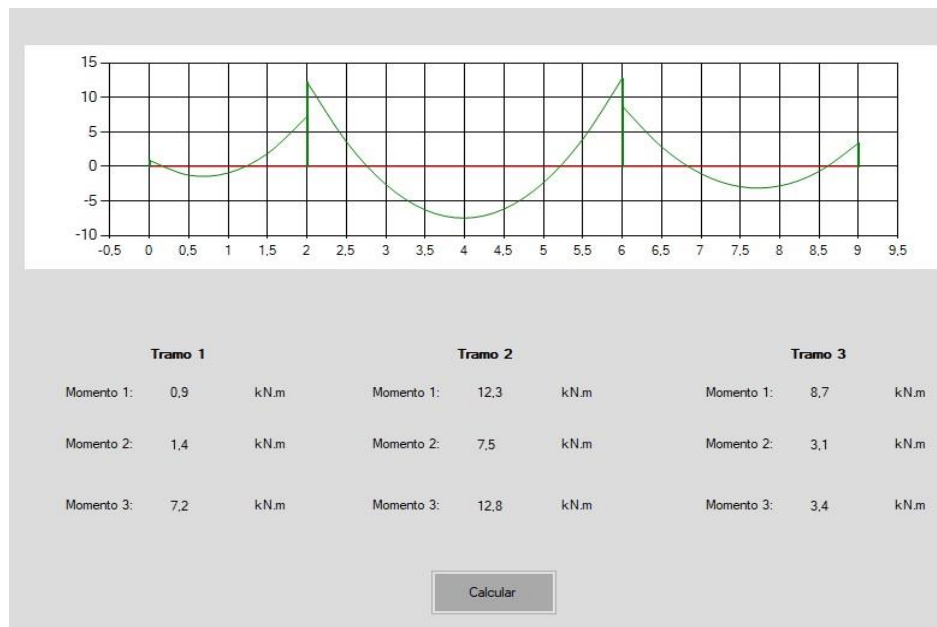


Fonte: Autoria própria (2019).

De posse de todos os dados, são preenchidas na aba inicial do aplicativo os valores pertinentes para a análise estrutural. Posteriormente, na aba de pré-dimensionamento é inserida a altura desejada, avançando para o cálculo das ações atuantes. Para facilitar o lançamento das cargas, são consideradas cargas nulas para as alvenarias, revestimento e

cargas variáveis. Quanto as cargas da laje, são inseridos nos tramos 1 e 2, uma carga de 8,5 kN/m, e no último tramo, uma carga de 6,5 kN/m. Tais valores levam em consideração o peso próprio da estrutura, com valor nominal de 1,5 kN/m, de forma que ao se somar todos os carregamentos, chega-se a solicitação indicada pelo exemplo proposto. Na aba destinada a análise estrutural, inicialmente são indicadas as dimensões dos pilares que servem de apoio para estrutura. Após o preenchimento dessas informações, é gerado o diagrama de momento fletor, bem como os valores de momento máximos em cada um dos vãos, indicados na Figura 44.

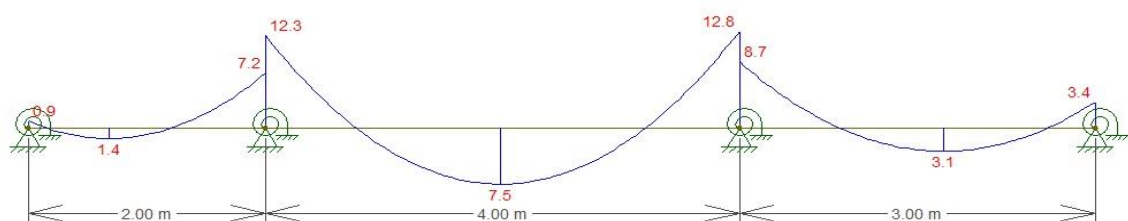
Figura 44 - Diagrama de momento fletor e valores máximos gerado pelo aplicativo



Fonte: Autoria própria (2019).

Para fins de comparação, é gerado o gráfico de momento fletor pelo *software ftool*, exposto na Figura 45.

Figura 45 - Diagrama de momento fletor gerado pelo *software ftool*



Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se que, ao se comparar os gráficos, ambos estão idênticos, validando o diagrama exibido pelo *software*. Tal validação é concretizada ao se comparar os valores de momentos fletores máximos negativos e positivos, apresentando resultados rigorosamente iguais. Com essa aplicação, confirma-se a precisão dos resultados fornecidos pela ferramenta, referentes a análise estrutural, através do modelo de viga continua melhorada, mostrando-se confiável quanto a essa fase de projetos. Essa precisão nos resultados se dá devido ao método utilizado para implementação computacional, que é o método dos deslocamentos.

4.2 COMPARAÇÃO DO DETALHAMENTO COM EXEMPLO DA LITERATURA E SOFTWARE COMERCIAL

Nesse tópico será apresentado uma comparação entre os cálculos de dimensionamento e detalhamento de uma viga realizada em Kemczinski (2015). Vale salientar que o autor realiza o detalhamento utilizando um *software* comercial (*Eberick*). Portanto, será realizada a comparação entre os cálculos de dimensionamento realizada pelo autor e a comparação do detalhamento, dando ênfase no detalhamento longitudinal ao longo da viga, dada pelo *software* comercial.

Os dados iniciais para a aplicação realizada estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados iniciais do projeto analisado

Parâmetro	Valores
f_{ck} (MPa)	25
f_{yk} (MPa)	500
E_{sc} (Gpa)	24
Comprimentos da seção da viga (cm)	12x40
Altura útil (cm)	35,9
Comprimento total da viga (m)	8,08
Comprimento para tramo 1	4,54
Comprimento para tramo 2	3,54
Bitola longitudinal para cálculo da altura útil (mm)	12,5
Bitola transversal para cálculo da altura útil (mm)	5
Classe de agressividade	2
Carga de alvenaria (kN.m)	5,40
Peso próprio (kN.m)	1,20
Carga no tramo 1 (kN.m)	16,16
Carga no tramo 2 (kN.m)	9,22
Número de pavimentos	2
Comprimentos da seção do pilar P4 (cm)	14x40

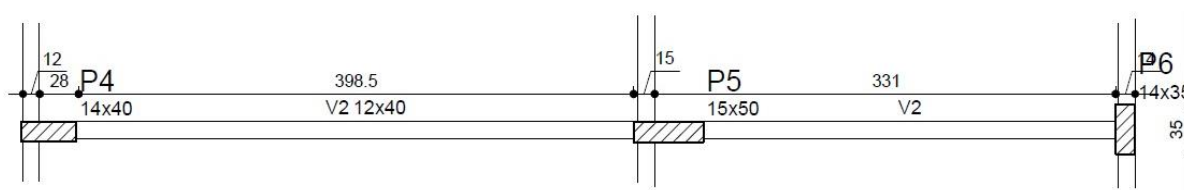
Continuação Tabela 12 – Dados iniciais do projeto analisado

Comprimentos da seção do pilar P5 (cm)	14x50
Comprimentos da seção do pilar P6 (cm)	35x14
Pé direito dos pavimentos (m)	2,80

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 46 apresenta a viga analisada por Kemczinski (2015).

Figura 46 - Viga estudada



Fonte: Kemczinski (2015).

Tomando como base as informações descritas anteriormente, é realizado a análise estrutural do elemento, fornecendo resultados de momentos fletores, dispostos na Tabela 13, e esforços cortantes máximos, apresentados na Tabela 14, realizando uma comparação entre os valores descritos pelo autor e pelo aplicativo.

Tabela 13 - Comparativo entre momentos fletores

Posição dos momentos		Valor calculado por Kemczinski (2015) (kN.m)	Valor calculado pelo aplicativo (kN.m)
Tramo 1	Momento no primeiro apoio – P1	45,2	46,90
	Momento máximo no tramo 1	29,8	29,82
	Momento no segundo apoio – P2	53,6	56,42
Tramo 2	Momento no segundo apoio	34,9	32,76
	Momento máximo no tramo 1	15,1	15,68
	Momento no terceiro apoio – P3	7,2	6,86

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 14 - Comparativo entre esforços cortantes

Posição dos cortantes		Valor calculado por Kemczinski (2015) (kN)	Valor calculado pelo aplicativo (kN)
Tramo 1	Cortante no primeiro apoio – P1	69,6	69,86
	Cortante no segundo apoio – P2	73,4	74,06
Tramo 2	Cortante no segundo apoio – P2	47,5	46,34
	Cortante no terceiro apoio – P3	31,7	31,64

Fonte: Autoria própria (2019).

Quanto ao dimensionamento das armaduras necessárias para suportar as cargas descritas anteriormente, é apresentada na Tabela 15 um comparativo entre as áreas de aço geradas pelo autor e pelo aplicativo.

Tabela 15 - Comparativo entre as áreas de aço

Posição da área de aço	Valor calculado por Kemczinski (2015) (cm ²)	Valor calculado pelo aplicativo (cm ²)
Área de aço no primeiro apoio	3,23	3,39
Área de aço do tramo 1	2,04	2,05
Área de aço no segundo apoio	3,94	4,20
Área de aço do tramo 2	0,99	1,04
Área de aço no terceiro apoio	0,72	0,72

Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se que os valores obtidos estão bem aproximados, novamente validando o modelo de cálculo da análise estrutural e o dimensionamento implementado. Os resultados descritos serão usados mais a frente para justificar o detalhamento que será apresentado.

Quanto ao detalhamento, inicialmente será comparado o cálculo da decalagem necessária para a viga analisada, sendo apresentado pelo trabalho analisado um valor de 18 cm de comprimento adicional, enquanto, no aplicativo temos uma decalagem com valor nominal de 26 cm. Essa diferença de comprimentos ocorre devido Kemczinski (2015) utilizar uma equação diferente da/ apresentada na ABNT NBR 6118:2014, sendo implementado um modelo de cálculo distinto da implementação do software. A Figura 47 foi retirada do *software*, com os resultados de comprimentos adicionais.

Figura 47 - Comprimentos adicionais destinada a comparação com autor

Comprimentos de ancoragem		
Para área de aço 1	43	cm
Para área de aço 2	32	cm
Para área de aço 3	39	cm
Para área de aço 4	24	cm
Para área de aço 5	22	cm
Para área de aço 6	#	cm
Para área de aço 7	#	cm
Comprimentos adicionais		
Tamanho do gancho	8	cm
Decalagem	26	cm

Fonte: Autoria própria (2019)

Com relação aos resultados de comprimento de ancoragem determinados, temos na Tabela 16 todos os valores estabelecidos por Kemczinski (2015) em comparação com os valores encontrados no *software*.

Tabela 16 - Comparativo entre os comprimentos de ancoragem

Seção analisada	Valores calculados por Kemczinski (2015) (cm)	Valores do aplicativo (cm)
Pilar P4	29,0	43,0
Tramo 1	27,4	32,0
Pilar P5	29,0	39,0
Tramo 2	15,1	24,0
Pilar P6	27,1	22,0

Fonte: Autoria própria (2019).

Na comparação entre as ancoragens, observamos que o aplicativo apresenta valores maiores, ficando a favor da segurança. Esse fato se justifica devido as áreas de aço calculadas serem um pouco diferentes, além de ser usadas barras com bitolas diferentes nas armaduras positivas, no qual o autor indica a utilização de barras de 12,5 mm no tramo 1 e bitolas de 8,0 mm no tramo 2, enquanto no *software*, buscou-se unificar as barras positivas, apresentando bitolas de 10 mm. Todos os fatos anteriormente citados, influenciam diretamente no cálculo dos comprimentos de ancoragem, como pode ser constatado pelas Equações 21 e 24.

Outro fator influenciador na diferença constatada entre os valores, é a utilização de coeficientes diferentes ao se aplicar a equação 20, no qual é usado na resolução um fator de 0,7 indicado para barras que possuem ancoragem, enquanto o programa realiza um cálculo mais a favor da segurança, sendo usado para todas as barras um fator de 1, indicado para barras sem gancho. A Tabela 17 mostra um comparativo entre os comprimentos de ancoragem, caso o software usasse os mesmos coeficientes indicados por Kemczinski (2015), sendo gerado valores aproximados, confirmando a veracidade dos argumentos apresentados.

Tabela 17 - Comparativo entre os comprimentos de ancoragem, modificando o coeficiente do aplicativo

Seção analisada	Valores calculados por Kemczinski (2015) (cm)	Valores do aplicativo, adaptados (cm)
Pilar P4	29,0	30,1
Tramo 1	27,4	22,4

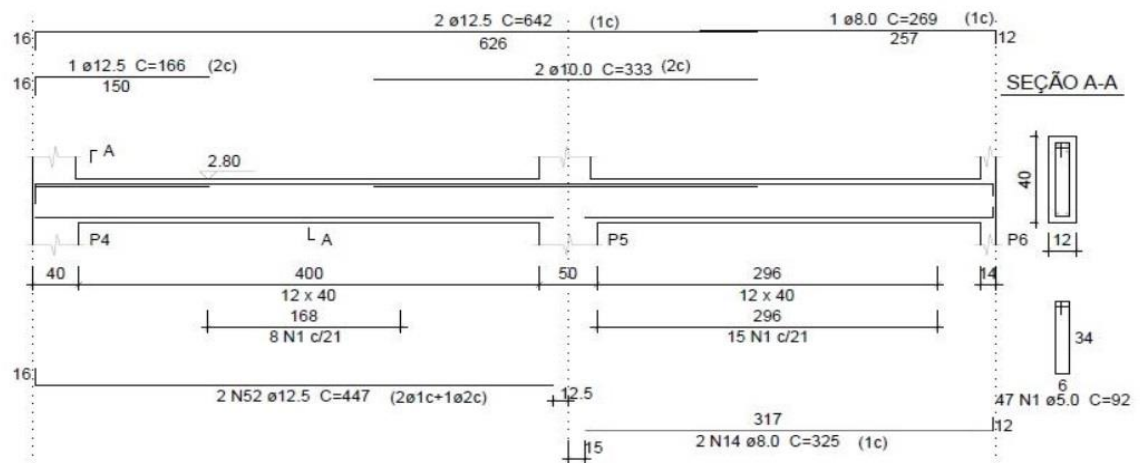
Continuação Tabela 17 - Comparativo entre os comprimentos de ancoragem, modificando o coeficiente do aplicativo

Pilar P5	29,0	27,3
Tramo 2	15,1	16,8
Pilar P6	27,1	15,4

Fonte: Autoria própria (2019).

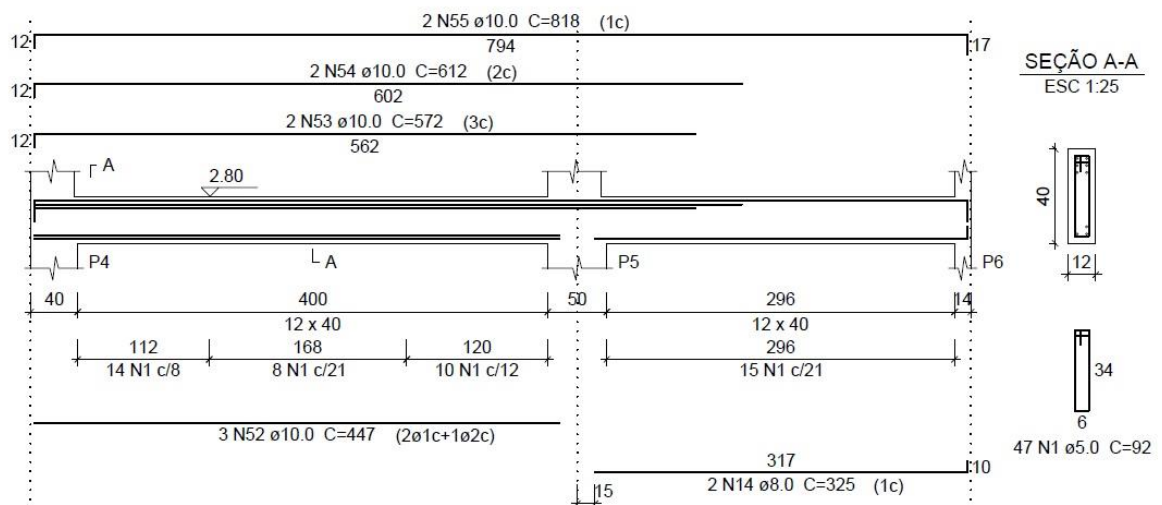
Seguindo com os cálculos, é mostrado no exemplo, dois detalhamentos longitudinais, gerados por Kemczinski (2015) e pelo *software Eberick*, sendo ambos mostrados nas Figuras 48 e 49, respectivamente.

Figura 48 - Detalhamento feito por Kemczinski (2015)



Fonte: Kemczinski (2015).

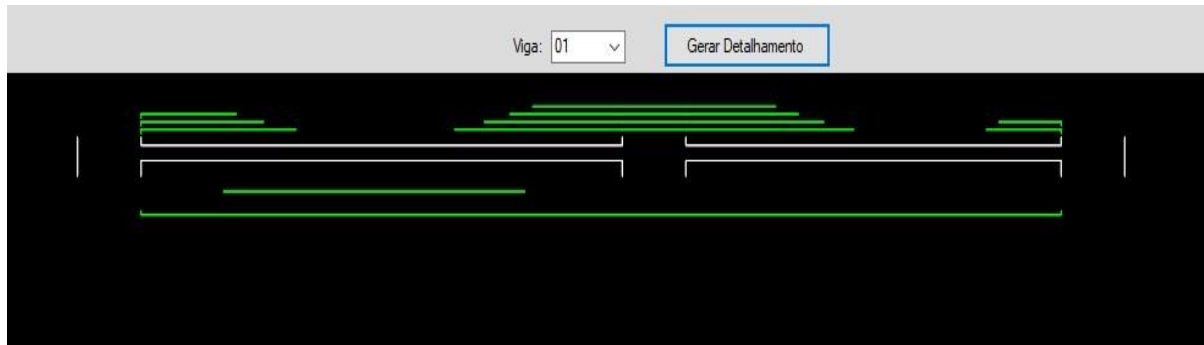
Figura 49 - Detalhamento gerado pelo Eberick



Fonte: Kemczinski (2015).

Também é apresentado na Figura 50 o detalhamento gerado pelo aplicativo proposto, para uma posterior comparação.

Figura 50 - Detalhamento gerado para comparação com Kemczinski (2015)



Fonte: Autoria própria (2019)

Para comparar os valores de comprimentos e bitolas de aço, são expostas imagens com os valores calculados pela ferramenta descrita, sendo na Figura 51 os valores inerentes ao detalhamento das armaduras negativas, e na Figura 52 os resultados do detalhamento das barras positivas.

Figura 51 - Detalhe das barras negativas para o detalhamento gerado por Kemczinski (2015)

Barras no apoio 1				Barras no apoio 2			
	N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	12,5	154	N1	1,0	12,5	331
N2	1,0	12,5	124	N2	1,0	12,5	274
N3	1,0	12,5	98	N3	1,0	12,5	226
N4	#	#	#	N4	1,0	12,5	183
N5	#	#	#	N5	#	#	#

Barras no apoio 3				Barras no apoio 4			
	N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	8,0	79	N1	#	#	#
N2	1,0	8,0	67	N2	#	#	#
N3	#	#	#	N3	#	#	#
N4	#	#	#	N4	#	#	#
N5	#	#	#	N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 52 - Detalhe das barras positivas para o detalhamento gerado por Kemczinski (2015)

☐ Armaduras Negativas
 ☒ Armaduras Positivas
 ☐ Comprimentos adicionais

Porta estribos			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	2	10	825

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	1,0	10,0	283
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Inicialmente observamos que Kemczinski (2015) opta, no primeiro apoio, por um detalhamento com 3 barras de 12,5 mm com uma delas estratificada, apresentando comprimento final de 166 cm, se aproximando dos resultados fornecidos pelo programa, no qual também são detalhadas 3 barras de 12,5 mm, apresentando em sua maior barra, um comprimento de 154 cm. A desigualdade entre comprimentos pode ser justificada pela diferença de tamanhos de ganchos calculados pelos dois *softwares*.

Para o detalhamento referente as barras positivas contidas no primeiro tramo, visando a unificação de todas as armaduras positivas, foi escolhido 3 barras de 10 mm, enquanto no detalhamento fornecido pelo autor foram estabelecidas 2 barras de 12,5 mm. Caso não houvesse a compatibilização das armaduras, o número de barras e bitola usada na seção poderiam ser estabelecidas de forma igual ao indicado. Essa mesma análise pode ser usada para o detalhamento no tramo 2, uma vez que é foi inserido duas barras de 10 mm, podendo ser reduzido para duas barras de 8 mm, assim como indicado pelo detalhamento contido no trabalho.

No segundo apoio, o detalhamento disponibilizado pelo autor apresenta um arranjo de barras com duas bitolas de 10 mm e outras duas de 12,5 mm, apresentando uma área de aço total de 4,10 cm², se aproximando da armadura necessária, calculada com o valor de 4,09 cm². Devido ao aplicativo está programado para unificar as bitolas usadas em uma mesma seção, foi gerado um detalhamento com 4 barras de 12,5 mm. A armadura estratificada no detalhamento do autor apresenta 333 cm de comprimento, se aproximando da maior armadura estratificada pelo aplicativo, com valor de 331 cm.

Por fim, o detalhamento das armaduras negativas do terceiro apoio destacado no exemplo analisado, apresenta uma única barra de 8 mm de diâmetro, possuindo um comprimento total de 269 cm. Já o aplicativo indica a utilização de duas barras, também de 8

mm, com comprimentos de 79 e 67 cm. Esse resultado se confirma ao observar a distribuição dos momentos no apoio (mostrado na aba de análise estrutural).

No comparativo com o detalhamento gerado pelo *Eberick*, inicialmente foram adotados os mesmos valores de bitolas, resultando em um detalhamento mais aproximado, visando uma melhor comparação entre os desenhos e seus valores. A única seção que não apresentará as mesmas bitolas que a fornecida pelo exemplo analisado será a do apoio P4, uma vez que é exigida um desenho com 6 barras de 10 mm (assim como no *Eberick*), extrapolando o limite de barras suportadas pelo aplicativo. Dessa forma, foram escolhidas barras de 12,5 mm para combater o momento negativo atuante nesse apoio. As Figuras 53 e 54 apresentam imagens com os valores descritos acima e as demais informações referentes ao detalhamento do *software*.

Figura 53 - Detalhe das barras negativas destinada ao detalhamento do Eberick

Barras no apoio 1				Barras no apoio 2			
	N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	10,0	149	N1	1,0	12,5	339
N2	1,0	10,0	129	N2	1,0	12,5	280
N3	1,0	10,0	111	N3	1,0	12,5	231
N4	1,0	10,0	95	N4	1,0	12,5	187
N5	1,0	10,0	80	N5	#	#	#

Barras no apoio 3				Barras no apoio 4			
	N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	10,0	92	N1	#	#	#
N2	#	#	#	N2	#	#	#
N3	#	#	#	N3	#	#	#
N4	#	#	#	N4	#	#	#
N5	#	#	#	N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 54 - Detalhe das barras positivas destinada ao detalhamento do Eberick

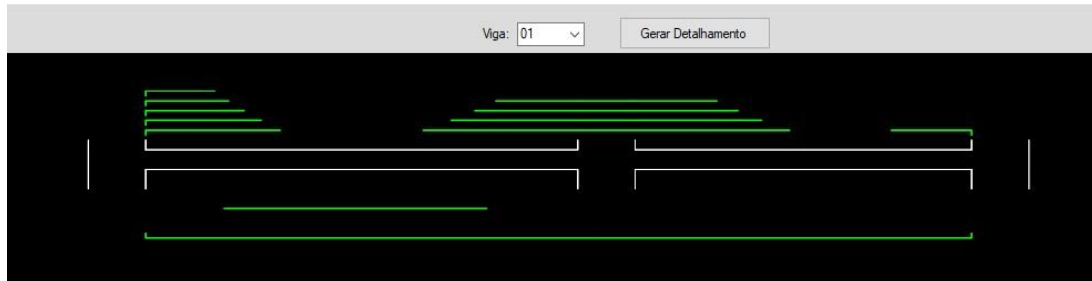
Porta estribos							
	N° Barras	Bitola	Comprimento				
N1	2	10	825				

Barras no tramo 1				Barras no tramo 2				Barras no tramo 3			
	N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento		N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	1,0	10,0	275	N2	#	#	#	N2	#	#	#
N3	#	#	#	N3	#	#	#	N3	#	#	#
N4	#	#	#	N4	#	#	#	N4	#	#	#
N5	#	#	#	N5	#	#	#	N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Também é mostrada na Figura 55 o detalhamento gerado após essa mudança de bitolas usadas.

Figura 55 - Detalhamento gerado pelo aplicativo destinada a comparação com o Eberick



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando seção por seção, observa-se que na seção do pilar P4 é indicado pelo *Eberick* o uso de seis barras de 10 mm, enquanto no aplicativo é mostrado um detalhamento contendo apenas 5 barras.

Quanto as armaduras no primeiro e segundo tramo, ambos os detalhamentos apresentam três bitolas de 10 mm (para cada tramo), indicando uma aproximação entre os valores de área de aço para aquela seção. O mesmo ocorre para as armaduras negativas no pilar P6, apresentando uma única barra de 10 mm nos dois detalhamentos.

Quanto as armaduras negativas no pilar P5, como explicado anteriormente, foi utilizado no aplicativo bitolas diferentes, resultando em um total de 4 barras de 12,5 mm, enquanto o *Eberick* indica 6 barras de 10 mm. Embora não seja gerado o detalhamento para 6 bitolas, o software indica a utilização desse número de barras caso seja optado o uso das bitolas de 10 mm (FIGURA 56).

Figura 56 - Comprimentos adicionais destinada a comparação com o Eberick

Dimensionamento Longitudinal					
As-1:	3,39	cm ²	ØL:	10,0	mm
Nº de Bitolas:	5		bitolas de	10,0	mm
Asnom:	0,800	m ²	Aséf:	4,00	cm ²
As-2:	2,05	cm ²	ØL:	10,0	mm
Nº de Bitolas:	3		bitolas de	10,0	mm
Asnom:	0,800	m ²	Aséf:	2,40	cm ²
As-3:	4,20	cm ²	ØL:	10,0	mm
Nº de Bitolas:	6		bitolas de	10,0	mm
Asnom:	0,800	m ²	Aséf:	4,80	cm ²
As-4:	1,04	cm ²	ØL:	10,0	mm
Nº de Bitolas:	2		bitolas de	10,0	mm
Asnom:	0,800	m ²	Aséf:	1,60	cm ²
As-5:	0,72	cm ²	ØL:	10,0	mm
Nº de Bitolas:	1		bitolas de	10,0	mm
Asnom:	0,800	m ²	Aséf:	0,80	cm ²

Fonte: Autoria própria (2019).

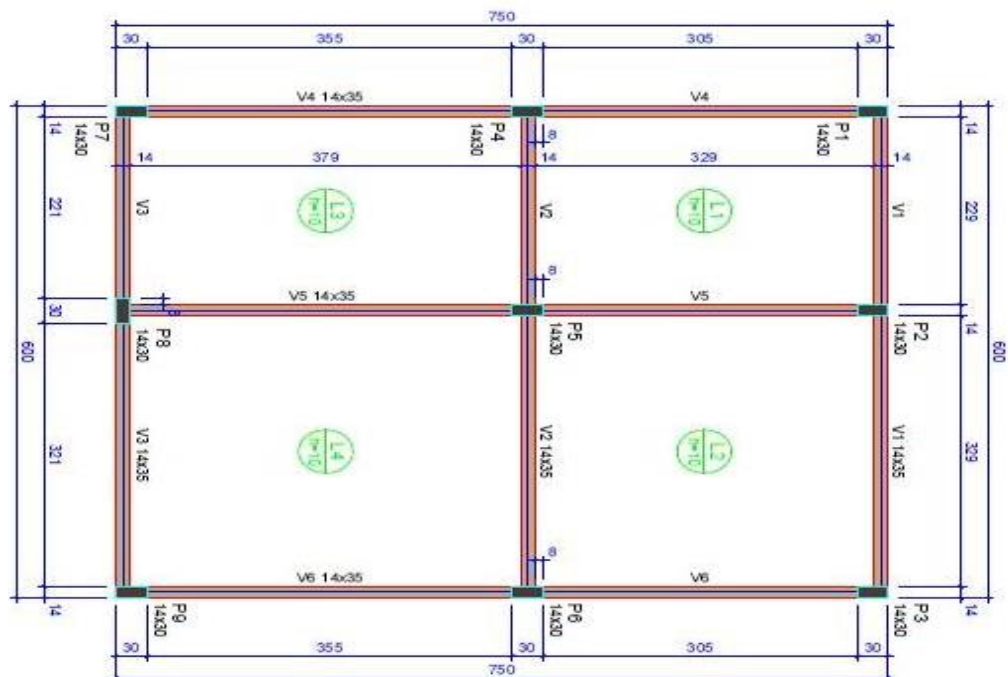
É importante salientar que para fins construtivos, o *Eberick* gera um desenho com as barras negativas unidas entre os apoios, diferentemente do aplicativo, que mostra em tela apenas os comprimentos necessários, ficando a cargo do projetista decidir se serão aumentadas e até unidas as barras fornecidas.

4.3 APLICAÇÃO INTEGRADA PARA ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO TIPO

Nesse tópico será apresentado uma análise de um pavimento tipo, mostrando o dimensionamento de uma das vigas desse pavimento através da utilização da ferramenta desenvolvida. As cargas que serão inseridas nesse dimensionamento são derivadas de um *software* de análise de lajes, desenvolvido com o mesmo propósito do aplicativo apresentado nesse trabalho. Também será gerado uma tabela apresentando as reações e momentos atuantes nos apoios do elemento, podendo ser usado para o dimensionamento de pilares através de softwares já consagrados, ou em fase de testes.

A estrutura analisada consiste em uma edificação de dois pavimentos, apresentando no pavimento analisado (Primeiro nível) 4 lajes, 6 vigas e 9 pilares, estando demonstrada na Figura 57 a planta de forma do primeiro nível, com toda sua concepção estrutural e dimensões já pré-definidas.

Figura 57 - Planta de forma do primeiro nível



Fonte: Autoria própria (2019).

Como dito anteriormente, todo o dimensionamento de lajes foi realizado com auxílio de um software auxiliar, sendo apresentado na Tabela 18 as reações (majoradas) das lajes nas vigas apresentadas anteriormente, considerando eixo x como sendo na direção horizontal, e eixo y na vertical.

Tabela 18 - Reações da laje nas vigas

Borda de atuação	Laje 1 (kN/m)	Laje 2 (kN/m)	Laje 3 (kN/m)	Laje 4 (kN/m)
Borda apoiada - Eixo x	4,34	4,72	4,61	5,34
Borda engastada - Eixo x	7,51	8,18	8,00	8,23
Borda apoiada - Eixo y	3,31	4,72	3,31	4,72
Borda engastada - Eixo y	5,74	8,18	5,74	8,18

Fonte: Autoria própria (2019).

De posse desses valores, foi feita a soma de todas as cargas incidentes em uma mesma viga, para uma posterior comparação entre estes elementos, sendo proposto a escolha da viga mais solicitada para a demonstração dos seus resultados de dimensionamento e detalhamentos gerados pelo aplicativo desenvolvido. Os valores de carregamento para cada viga estão apresentados na Tabela 19, sendo a viga 5 escolhida para o dimensionamento.

Tabela 19 - Cargas totais nas vigas

Viga analisada	Cargas no tramo 1 (kN/m)	Cargas no tramo 2 (kN/m)
Viga 1	3,31	4,72
Viga 2	11,48	16,36
Viga 3	3,31	4,72
Viga 4	4,61	4,34
Viga 5	17,23	15,69
Viga 6	5,34	4,72

Fonte: Autoria própria (2019).

Para uma melhor conferência dos dados contidos no projeto proposto é apresentada na Tabela 20 um resumo com todas informações pertinentes para o bom funcionamento do aplicativo.

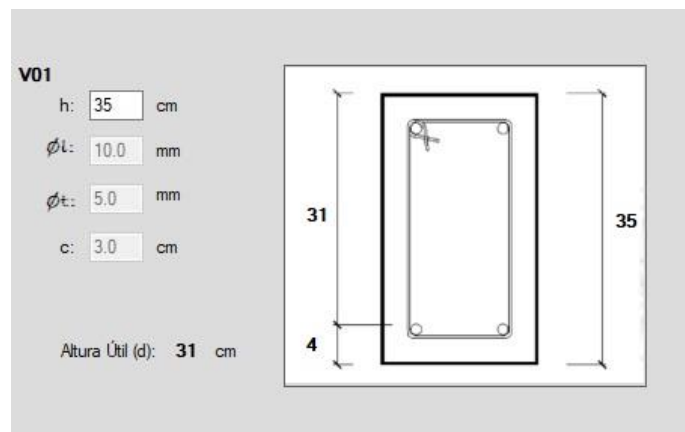
Tabela 20 - Informações de projeto

Parâmetro	Valores
f_{ck} (MPa)	25
f_{yk} (MPa)	500
E_{sc} (Gpa)	24
Comprimentos da seção da viga (cm)	14x35
Altura útil (cm)	31
Comprimento total da viga (m)	7,50
Comprimento efetivo para tramo 1	3,93
Comprimento efetivo para tramo 2	3,35
Classe de agressividade	2
Carga de alvenaria (kN/m)	4,91
Carga no tramo 1 (kN/m)	12,31
Carga no tramo 2 (kN/m)	11,21
Número de pavimentos	2
Comprimentos da seção do primeiro apoio (cm)	30x14
Comprimentos da seção do segundo apoio (cm)	14x30
Comprimentos da seção do terceiro apoio (cm)	14x30
Pé direito dos pavimentos (m)	3,00

Fonte: Autoria própria (2019).

Partindo dos dados iniciais contidos na tabela resumo, são inseridas todas as informações na aba inicial do software, retornando como resultado um pré-dimensionamento solicitando uma altura mínima de 33 cm, sendo substituído pelo valor indicado em planta (35 cm), uma vez que é requerida uma altura maior que a mínima. A partir da nova altura inserida, foi realizado o cálculo da altura mínima, sendo mostrado em tela um valor de 31 cm. A Figura 58 mostra o corte transversal da viga, gerado pelo aplicativo, com os valores descritos anteriormente.

Figura 58 - Corte transversal da viga e altura útil



Fonte: Autoria própria (2019).

Na seção de ações atuantes, foram inseridos os valores das cargas das lajes na viga analisada, no qual, o primeiro tramo apresenta uma solicitação de 17,23 kN/m, e o segundo tramo, uma solicitação de 15,69 kN/m. Vale ressaltar, que os valores referentes a cargas até aqui apresentadas devem ser minoradas pelo fator de 1,4 antes de serem adicionadas no aplicativo, uma vez que a declaração de cargas nas ações atuantes é feita com os valores característicos das solicitações, sendo majorada internamente na programação. Dessa forma, fica-se com as cargas de 12,31 kN/m e 11,21 kN/m para os tramos 1 e 2 respectivamente.

É importante frisar que os valores de carga para revestimento e cargas acidentais já estão inclusas na análise de lajes, ou seja, já são consideradas nos valores aqui apresentados. Outras cargas adicionadas na análise são o peso das alvenarias, sendo descrito para paredes de 2,70 metros uma carga de 4,91 kN/m e o peso próprio, automaticamente calculado no software, com valor nominal de 1,225 kN/m, adicionadas em ambos os tramos. Todos esses valores apresentados anteriormente estão contidos no preenchimento da aba do software, demonstrada na Figura 59.

Figura 59 - Aba de ações atuantes preenchida

Dimensionamento de vigas

Dados Iniciais | Pré-Dimensionamento | **Ações Atuantes** | Banco de dados | Análise Estrutural | Dimensionamento | Detalhamento

Viga: 01 N° de Tramos: 2

Cargas Permanentes:

Peso Próprio: 1,225 kN/m

Revestimento: 0 kN/m

Alvenaria: 4,91 kN/m

☒ Carga das lajes

☒ Tramo 1 ☒ Tramo 2 ☐ Tramo 3

Tramo 1: ☐ Com carga pontual

Tramo 2: ☐ Com carga pontual

Carga da laje na viga: 12,31 kN/m

Carga da laje na viga: 11,21 kN/m

Cargas Variáveis:

Carga Acidental: 0 kN/m

Total: 0 kN/m

Total: 18,44 kN/m

Total: 17,34 kN/m

Combinação de Ações Máximas:

Solicitação Tramo 1: 25,82 kN/m

Solicitação Tramo 2: 24,28 kN/m

Diagrama de vigas com cargas distribuídas: 25,82 e 24,28 kN/m

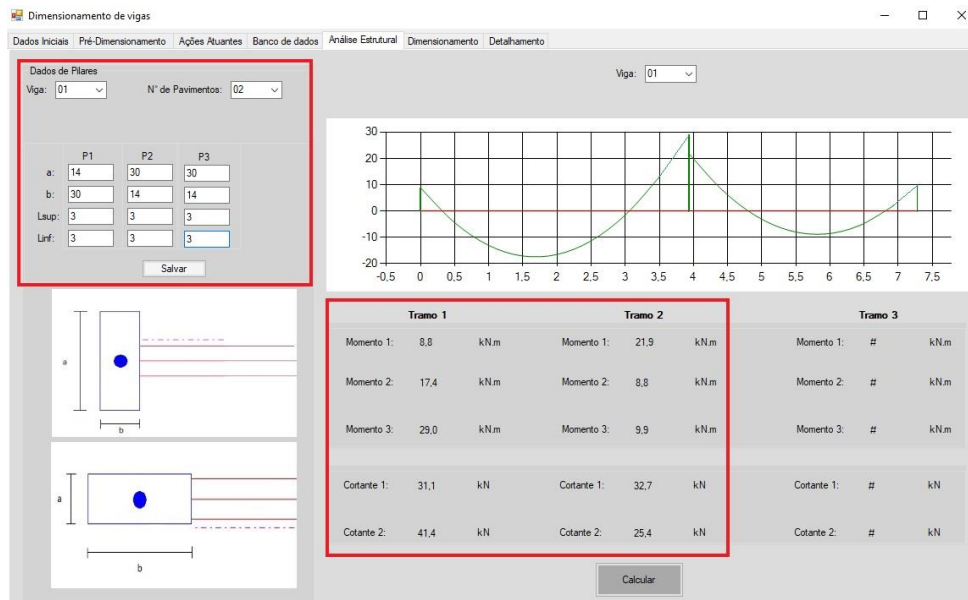
Calcular

Fonte: Autoria própria (2019).

Seguindo para a análise estrutural, inicialmente são preenchidos os valores referentes a geometria dos pilares, atentando-se ao posicionamento deles. Em seguida são gerados todos os momentos máximos e esforços cortantes, bem como o diagrama de momento fletor para o

caso analisado, servindo de base para cálculos futuros. O Preenchimento dos pilares e o resultado da análise estrutural podem ser vistos na Figura 60.

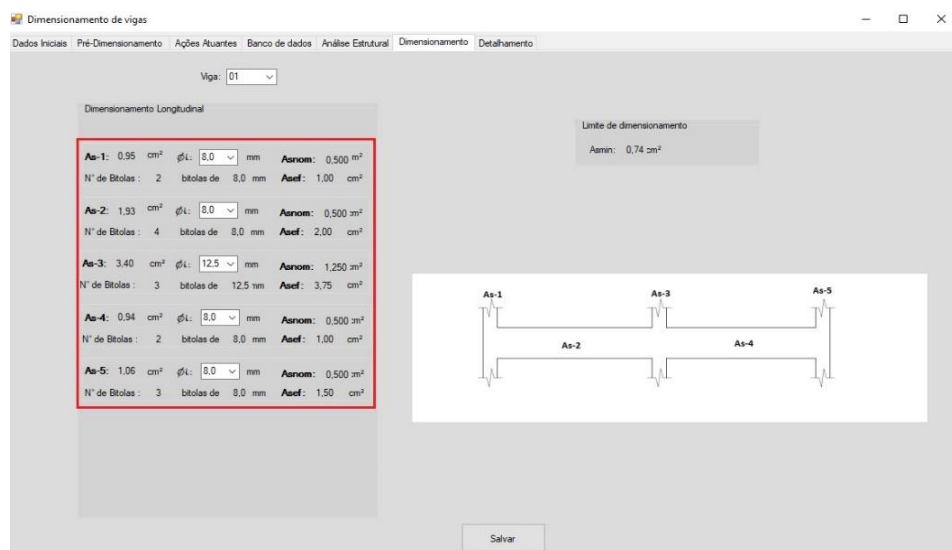
Figura 60 - Preenchimento dos pilares e análise estrutural



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir dos momentos fletores indicados anteriormente, tem-se as áreas de aço calculadas, sendo escolhidas bitolas de 8 mm para todas as seções, exceto a do segundo apoio, que devido apresentar um alto momento fletor, é indicada a utilização de uma armadura de no mínimo 3,40 cm², sendo escolhido 3 bitolas de 12,5 mm. Todas essas informações estão contidas no print da aba de dimensionamento, mostrada na Figura 61.

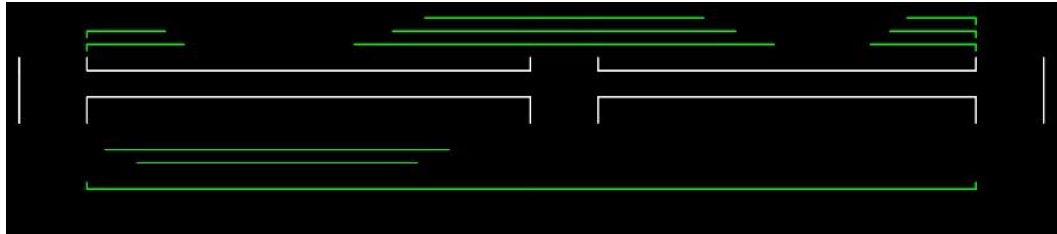
Figura 61 - Dimensionamento gerado pelo aplicativo



Fonte: Autoria própria (2019).

De posse do número de bitolas usadas e de seus diâmetros, é gerado um detalhamento longitudinal ao longo da viga, indicando o posicionamento das barras utilizadas. O desenho fornecido pelo aplicativo está contido na Figura 62.

Figura 62 - Detalhamento da viga analisada



Fonte: Autoria própria (2019).

As informações referentes as barras detalhadas no desenho anterior estão descritas nas Figuras 63, 64, enquanto na Figura 65 tem-se os comprimentos adicionais calculados pelo software, tais como, comprimento de ancoragem, decalagem e ganchos.

Figura 63 - Detalhe das armaduras positivas

Porta estribos			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	2	8	778

Barras no tramo 1			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	1,0	8,0	305
N3	1,0	8,0	248
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no tramo 2			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no tramo 3			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 64 - Detalhes das armaduras negativas

Barras no apoio 1			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	8,0	92
N2	1,0	8,0	76
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no apoio 2			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	12,5	326
N2	1,0	12,5	258
N3	1,0	12,5	202
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no apoio 3			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	1,0	8,0	100
N2	1,0	8,0	83
N3	1,0	8,0	68
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Barras no apoio 4			
	N° Barras	Bitola	Comprimento
N1	#	#	#
N2	#	#	#
N3	#	#	#
N4	#	#	#
N5	#	#	#

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 65 - Comprimentos adicionais

Comprimentos de ancoragem		
Para área de aço 1	28	cm
Para área de aço 2	29	cm
Para área de aço 3	43	cm
Para área de aço 4	28	cm
Para área de aço 5	21	cm
Para área de aço 6	#	cm
Para área de aço 7	#	cm
Comprimentos adicionais		
Tamanho do gancho	6	cm
Decalagem	26	cm

Fonte: Autoria própria (2019).

Vale ressaltar que o detalhamento aqui destacado apresenta os valores mínimos de comprimento de barras de aço para tornar a estrutura estável, cabendo ao projetista realizar as adaptações necessárias para facilitar o processo construtivo, não podendo usar barras menores que as indicadas pelo *software*.

Por fim, na Tabela 21 mostra-se um resumo total das barras de aço que devem ser inseridas na viga dimensionada.

Tabela 21 - Resumo das barras de aço

Armaduras positivas	2 N1 ø8.0 C=778
	1 N2 ø8.0 C=305
	1 N3 ø8.0 C=248
Armaduras negativas	1 N4 ø8.0 C=92
	1 N5 ø8.0 C=76
	1 N6 ø12.5 C=326
	1 N7 ø12.5 C=258
	1 N8 ø12.5 C=202
	1 N9 ø8.0 C=100
	1 N10 ø8.0 C=83
	1 N11 ø8.0 C=68

Fonte: Autoria própria (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Em síntese, foi apresentado no presente trabalho o desenvolvimento de um *software* de dimensionamento e detalhamento de vigas em concreto armado, limitando-se a estruturas residenciais de pequeno porte, visando a facilitar o acesso de engenheiros recém formados e alunos a plataformas de cálculo estrutural, podendo ser usado em aplicações reais e aplicações acadêmicas, se apresentando como um aplicativo gratuito e de fácil instalação e obtenção, além de ter uma fácil utilização, podendo ser usado para o aprendizado das teorias fundamentais de análise estrutural e estruturas de concreto armado.

Ao longo do texto, mais precisamente na Aplicação 4.1.1, foi verificada sua aplicabilidade quanto aos resultados gerados pela ferramenta, sendo comparados com exemplos da literatura e de programas comerciais, apresentando dimensionamentos e detalhamentos plausíveis e condizentes, se mostrando confiável, desde que usado para os modelos de construção propostos inicialmente.

Outro fator que comprova sua relevância nos resultados adquiridos, apresentado na Aplicação 4.1.2, em que a comparação dos resultados de análise estrutural com programas normalmente usados para esse cálculo mostrou eficiência no cálculo dos esforços que foram implementados no modelo de viga contínua melhorada (utilizando método dos deslocamentos) na linguagem C++. Isso torna a análise estrutural mais precisa em questão de modelo, gerando um dimensionamento e detalhamento mais eficiente.

A Aplicação 4.2 apresentou bons resultados tanto no dimensionamento realizado por trabalho acadêmico para fins de cálculo estrutural quanto no que diz respeito ao detalhamento da armadura longitudinal ao longo da viga apresentado em um *software* comercial.

O *software* proposto também comprovou a sua aplicabilidade (na Aplicação 4.3) em conjunto com outros *softwares* complementares, mostrando uma fácil recepção de dados vindos de aplicativos de cálculo de lajes, gerando as informações necessárias para um posterior dimensionamento de pilares.

Dentre as sugestões para melhorias que podem ser realizadas na ferramenta é destacado a possibilidade de ampliação do número de vigas simultaneamente calculadas, uma vez que apenas 8 elementos podem ser inseridos por vez, aumentar o número de tramos que podem ser analisados por viga, estando limitados em apenas três, implementar as verificações de deformação excessiva e de controle de fissurações, ampliar a capacidade de cargas possíveis de ser inseridas possibilitando a expansão do *software* para construções de maior

porte, apresentar gráficos de cortante e deformações ao longo do elemento analisado, e por fim, fazer uma união junto aos demais *softwares* desenvolvidos, formando uma única ferramenta de dimensionamento, abrangendo os três principais elementos de concreto armado existentes (lajes, vigas e pilares).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. Rio Grande: Dunas, 2014.
- ARAÚJO, José Milton de. **Programas para dimensionamento e verificação de concreto armado**. Rio Grande: Dunas, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia - Universidade Paulista - UNESP, 2006. 92p.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Vigas de Concreto Armado**. Bauru: Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia - Universidade Paulista - UNESP, 2017. 56p.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. São Carlos, SP: 2014
- CLÍMACO, João Carlos Teatine de Souza. **Estruturas de Concreto Armado**. Brasília: Editora Unb, 2013. 389 p.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997. 401 p.
- FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil.
- FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto: Solicitações Normais**. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos S. A., 1981.
- KEMCZINSKI, Pedro Gabriel. **Cálculo e detalhamento de estrutura de concreto armado de um edifício residencial**: 2015. 115 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com uso de sistemas computacionais**. Editora PINI, 632 p. São Paulo, 2007.

LONGO, Luís Filipe. **Desenvolvimento de um aplicativo de análise de estruturas reticuladas planas em plataforma Android**. 2015. 256 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro, Editora Campus/Elsevier, 2010. v. 1, 524 p.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. PINI, 1994.

PFEIL, Walter. **Concreto Armado**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

PINHEIRO, L.M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 206 p.

SANTOS, L.M. **Cálculo de Concreto Armado**. Volume I, p.541. Ed. LMS. São Paulo, 1983.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural**. 7. ed. Rio de Janeiro, Editora Globo, 1987. v. 3, 294 p.