

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS DO SERTÃO

ENGENHARIA CIVIL

DAIANE RODRIGUES SILVA

Análise Estrutural de Vigas de Concreto Armado com Abertura na Alma

Delmiro Gouveia

2019

DAIANE RODRIGUES SILVA

Análise Estrutural de Vigas de Concreto Armado com Abertura na Alma

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Vitor Bezerra Falcão.

Delmiro Gouveia

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

S586a Silva, Daiane Rodrigues

Análise estrutural de vigas de concreto armado com aberturas na alma
/ Daiane Rodrigues Silva. – 2019.

70 f. : il.

Orientação: Prof. Me. Vitor Bezerra Falcão.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de
Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

1. Engenharia civil. 2. Análise estrutural. 3. Análise comparativa.
4. Concreto armado. 5. Vigas. 6. SAP 2000 – Software. 7. Bielas e tirantes. I. Título.

CDU: 624.012.45

FOLHA DE APROVAÇÃO

DAIANE RODRIGUES SILVA

Análise Estrutural de Vigas de Concreto Armado com Aberturas na Alma

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 05 de abril de 2019.

Victor Bezerra Falcão

Prof. MSc Vitor Bezerra Falcão, UFAL – Campus do Sertão (Orientador)

Banca Examinadora:

Victor Bezerra Falcão

Prof. MSc Vitor Bezerra Falcão, UFAL – Campus do Sertão (Orientador)

Alverlando Silva Ricardo

Prof. MSc Alverlando Silva Ricardo, UFAL –, UFAL – Campus do Sertão (Avaliador)

Vinicius Costa Correia

Prof. Msc Vinicius Costa Correia, UFAL –, UFAL – Campus do Sertão (Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo apoio incondicional nos momentos difíceis da minha trajetória, me fortalecendo a cada passo e possibilitando a realização dos meus sonhos.

Aos meus pais, Marcelo Rodrigues Silva e Magna Rosane Silva, por serem a minha fortaleza e por todo o esforço investido na minha formação. A minhas irmãs, Dafiny Rodrigues Silva e Marcela Rodrigues Silva, por sempre me apoiarem. A meus avós que são minha base e meu viver e aos meus tios.

A meu namorado, por todo apoio nesses anos de curso, principalmente pela ajuda no momento mais difícil que eu vive durante a graduação.

À todos os meus amigos que sempre me incentivaram ao longo destes anos na Universidade. E aos que entraram em minha vida recentemente e me deram todo auxílio na produção deste trabalho.

Aos professores, Karlisson André Nunes da Silva e Rogério Santos, pois suas orientações influenciaram bastante no tema escolhido para o presente estudo e transmitiram muita força durante meu percurso, a meu orientador, Vitor Falcão, por sua paciência e compreensão.

RESUMO

Atualmente, os casos de falta de compatibilização de projetos ainda são bastante comuns, e sem a devida idealização acaba por acarretar à necessidade de alterações durante a execução. Um possível problema estrutural originado da falta de planejamento é a necessidade de passagem de tubulações em vigas, que sem o devido conhecimento pode gerar riscos à segurança dos usuários. Diante disso, buscou-se verificar o comportamento de vigas provocadas pela variação do posicionamento de aberturas. Para as análises, foram modeladas três vigas através do software SAP 2000, sendo uma sem furo e duas com furos em posições distintas. Com a obtenção dos resultados da modelagem no programa, foi aplicado o método de bielas e tirantes que permite encontrar a carga última, e posteriormente, compararam-se os resultados obtidos. Como já esperado, os esforços e tensões encontrados para os casos com aberturas foram superiores aos obtidos no elemento contínuo, já que a inserção de aberturas provocou perturbações no fluxo de tensões. Quanto a localização, as aberturas próximas aos apoios apresentaram valores de esforços e tensões superiores. É possível afirmar que a melhor região para posicionar aberturas são nas proximidades da região central e inferior da viga, pois, os prejuízos quanto ao comportamento do elemento estrutural são inferiores. Comparando a funcionalidade dos diferentes métodos aplicados no estudo, conclui-se que ambos mostraram-se eficientes no cálculo das tensões, e apesar da análise analítica por método de bielas e tirantes, pode ser utilizado com segurança por proporcionar boa representação da estrutura das peças, entretanto, o método mais recomendado é o software computacional, pois, ele melhor simula o comportamento real das estruturas.

Palavras-chave: Vigas; Análise Comparativa; Abertura; SAP 2000; Bielas e Tirantes.

ABSTRACT

At present, the cases of lack of compatibility of projects are still quite common, and without proper idealization it ends up entailing the need for changes during execution. A possible structural problem that arises from the lack of planning is the need to pass pipelines to beams, which without proper knowledge can generate risks to the users' safety. Therefore, it was sought to verify the behavior of beams caused by the variation of the positioning of openings. For the analyzes, three beams were modeled through SAP 2000 software, one without hole and two with holes in different positions. With the modeling results obtained in the program, the rod-and-tie method was used to find the ultimate load, and the results obtained were compared. As already expected, the stresses and tensions found for the cases with openings were higher than those obtained in the continuous element, since the insertion of openings caused perturbations in the flow of tensions. Regarding the location, the openings close to the supports showed higher tensile and stress values. It is possible to affirm that the best region to position openings are in the proximities of the central and inferior region of the beam, therefore, the damages regarding the behavior of the structural element are inferior. Comparing the functionality of the different methods applied in the study, it is concluded that both were efficient in calculating the stresses, and despite the analytical analysis by rod and rod method, it can be safely used to provide a good representation of the structure of the parts, however, the most recommended method is computational software, since it best simulates the actual behavior of the structures.

Key Words: Beams; Comparative Analysis; Sap 2000; Strut and Tie Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barco de Lambot	15
Figura 2: Curva de Gauss para resistência do concreto a compressão	17
Figura 3: Diagrama de tensão-deformação	19
Figura 4: Inter-relação da viga com outros elementos estruturais	20
Figura 5: Posição da linha neutra na viga	21
Figura 6: Comportamento resistente e estádios de uma viga	24
Figura 7: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)	24
Figura 8: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)	25
Figura 9: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III)	25
Figura 10: Cálculo de deslocamento a em viga simplesmente apoiada	28
Figura 11: Abertura na alma da viga	29
Figura 12: Detalhamento das armaduras da viga com abertura	29
Figura 13: Estribos não colaborantes	30
Figura 14: Furos não previstos em projeto	30
Figura 15: Furo na direção da largura	31
Figura 16: Furo vertical.	32
Figura 17: Armadura de reforço em vigas com furos	33
Figura 18: Analogia clássica de treliça	34
Figura 19: Campos de tensões de compressão e tração e modelo de biela e tirantes	36
Figura 20: Viga com abertura	38
Figura 21: Nós singulares e distribuídos	39
Figura 22: Geometria 3D da viga	42
Figura 22.1a/22.1b: Viga contínua: vista transversal/vista longitudinal	42
Figura 22.2: Viga com abertura próximo ao apoio	42
Figura 22.3: Viga com abertura no centro	42
Figura 23: Propriedades do material concreto	43
Figura 24: Propriedades do material aço	43
Figura 25: Fluxos de carga na viga com abertura no momento máximo	44
Figura 26: Fluxos de carga na viga com abertura próximo ao cortante	45
Figura 27: Modelo de bielas e tirantes/solicitações para viga abertura no momento Máximo	45
Figura 28: Modelo de bielas e tirantes/solicitações para viga abertura próximo ao	

Cortante	45
Figura 29: Tensões (S11) na viga de modelo 1	46
Figura 30: Tensões (S11) na viga de modelo 2.....	47
Figura 31: Deformação na viga de modelo 1	47
Figura 32: Deformação na viga de modelo 2	47
Figura 33: Tensões (S11) na viga de modelo 1	48
Figura 34: Tensões (S11) na viga de modelo 3	48
Figura 35: Deformação na viga de modelo 1	48
Figura 36: Deformação na viga de modelo 3	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Módulo de elasticidade do concreto	16
Quadro 02: Propriedades mecânicas dos aços	18
Quadro 03: Abertura máxima de fissuras características (w_k)	26
Quadro 04: Valores máximos de diâmetro e espaçamento com barras de alta aderência	26
Quadro 05: Viga contínua X Viga com abertura no momento máximo	49
Quadro 06: Viga contínua X Viga com abertura no cortante	49
Quadro 07: Viga com abertura cortante X Viga com abertura no momento máximo	49
Quadro 08: Viga contínua X Viga furo no momento máximo	49
Quadro 09: Viga contínua X Viga com furo no cortante	50
Quadro 10: NBR 6118 X Viga com furo no cortante	50
Quadro 11: NBR 6118 X Viga com aberturas no cortante	50
Quadro 12: SAP 2000 X Bielas e Tirantes	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora aprovada pela ABNT
SAP2000	Programa de elementos finitos para modelação, análise e dimensionamento de qualquer tipo de estrutura

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1 Justificativa do Trabalho	12
1.2 Problemas da Pesquisa	13
1.3 Objetivos da Pesquisa	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 Estrutura do Trabalho	14
2. Referencial Teórico	15
2.1 Concreto Armado	15
2.1.1 Resistencia a compressão do concreto	16
2.1.2 Resistencia a tração do concreto	19
2.1.3 Característica do Aço	18
2.2 Elemento Estrutural: Viga	19
2.2.1 Viga sob Flexão Normal	21
2.3 Estados Limites	22
2.3.1 Fissuração	23
2.3.2 Abertura máxima de fissuras	27
2.3.3 Deslocamentos	28
2.4 Abertura em Vigas	29
2.4.1 Furos que Atravessam a Viga na Direção da Largura	32
2.4.2 Furos que Atravessam as Vigas na Direção da Altura	32
2.5 Canalização Embutida	33
2.6 Armadura de reforço em aberturas	33
2.7 Método de bielas e tirantes	34
2.7.1 Analogia da treliça	34
2.7.2 Descrição do método de bielas e tirantes	35
2.7.3 Regiões B e D	36
2.7.4 Bielas	37
2.7.5 Tirantes	38
2.8 SAP 2000.....	39
3. Metodologia	41
3.1 Geometria e propriedades do modelo	41

3.2 Carregamento	44
3.3 Procedimentos e análise dos dados	44
4. Resultados e Discussões	46
4.1 Análise comparativa entre a viga de alma cheia e viga com abertura no momento máximo	47
4.1.1 Deformada	47
4.2 Análise comparativa entre viga de alma cheia e viga com abertura próximo ao apoio.....	47
4.2.1 Deformada	48
4.3 Quadro comparativo para as tensões de compressão e deslocamento	49
4.4 Verificação pelo método de bielas e tirantes	50
5. Considerações Finais	52
6. Referências Bibliográficas	53
7. Apêndice A – Cálculo realizado para o dimensionamento manual	56
8. Apêndice B – Tabelas com esforços obtidos pelos SAP 2000	58
9. Anexo A – Tabela de limites de deslocamento	69
10. Anexo B – valores de k_c e k_s para aço CA-50 e $f_{ck} \leq 50\text{Mpa}$	70

1. INTRODUÇÃO

A elaboração do projeto é tão importante quanto a fase de execução, pois, é nela que serão agrupadas todas as necessidades solicitadas pelo cliente. Contudo, apesar da importância alguns passos são negligenciados, seja por decisão do dono da obra, por profissionais diferentes, e até mesmo pela cultura local de achar desnecessário a utilização do projeto antes de construir. O caso mais comum de execução indevida é a necessidade de criar aberturas em vigas para passagem de tubulação oriunda dos sanitários. Contudo, sem o prévio estudo da posição para os furos e aberturas podem provocar danos ao funcionamento da estrutura.

A falta de compatibilização de projetos ou a supressão deste ocasionam imprevistos perceptíveis apenas na fase de execução. Como consequências surgem o encarecimento do custo final da obra, necessidade de alteração nos projetos e atrasos na entrega, e em casos extremos, perda total da estrutura.

O presente trabalho traz como proposta utilizar diferentes métodos para correlacionar o comportamento de vigas de concreto armado, contínuas e descontínuas. E através dele perceber que para algumas circunstâncias quando se torna inevitável a existência de abertura, é possível executar sem comprometer a estrutura. Diante disso, a NBR 6118:2014, estabelece quais as condições favoráveis para abertura em vigas. Os limites previstos serão abordados posteriormente no decorrer do trabalho.

O estudo fez uso do comportamento das peças analisando os caminhos de tensões de compressão através de uma modelagem numérica. Além disso, foram implementados modelos de bielas e tirantes para a representação estrutural de cada peça analisada.

1.1. Justificativa do Trabalho

A viga é um elemento muito importante em estruturas de concreto armado, pois, são responsáveis por transferir as cargas da laje ao pilar. Diante disso, é plausível a preocupação quanto ao seu comportamento mediante a presença de descontinuidades, principalmente, quando são executadas sem prévia análise e entendimento da estrutura.

Desta forma, mediante as singularidades para casos descontínuos, é inviável a utilização de cálculos tradicionais para avaliação das regiões críticas, sendo utilizados métodos numéricos. Nesse sentido, justifica-se a utilização de bielas e tirantes e “softwares” específicos, como o SAP 2000, que são métodos cientificamente comprovados.

1.2. Problema de Pesquisa

Diante do exposto, pretende-se responder ao seguinte problema de pesquisa:

Qual a influência causada nas tensões normais e na deformação total pelas aberturas não previstas em vigas de concreto armado, e qual método utilizado melhor representa o comportamento real da estrutura?

1.3. Objetivos da Pesquisa

Os objetivos da pesquisa estão fundamentados em objetivo geral e objetivos específicos e estão descritos abaixo.

1.3.1. Objetivo geral

Analisar o comportamento de uma viga em concreto armado, por comparativo de dois métodos distintos de cálculo, o software computacional e analítico, identificando os efeitos causados pelas aberturas em diferentes situações na deformação total e nas tensões normais.

1.3.2. Objetivos específicos

- Modelar as vigas tridimensionalmente no “software” SAP 2000;
- Comparar os resultados apresentados na simulação em três situações distintas: viga contínua, abertura próximo ao cortante máximo, e no centro do vão;
- Apresentar os conceitos básicos de Biela e Tirantes e aplicá-los no estudo das aberturas;
- Comparar os valores das tensões obtidos pelos dois métodos;
- Verificar a ocorrência de discrepância nos valores encontrados e analisar a causa dessas diferenças.

1.4. Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 trata da contextualização do tema, o problema de pesquisa, a justificativa do trabalho, a exposição dos objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 aborda uma revisão bibliográfica a respeito do concreto e suas propriedades mecânicas, trata do elemento estrutural viga, além das especificações da NBR 6118:2014 para furos e aberturas em vigas de concreto armado, e um último tópico sobre o método de bielas e tirantes.

O capítulo 3 mostra todo o procedimento utilizado no trabalho, primeiro introduz sobre o programa SAP 2000, posteriormente, foi descrito o objeto de estudo até os procedimentos utilizados, apresentando as ferramentas e métodos adotados para a coleta e análise dos dados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelos dois métodos (manual e computacional), trazendo as variações encontradas por ambos e analisando essas diferenças observadas.

O capítulo 5 verifica o alcance dos objetivos, apresenta as contribuições da pesquisa, caracteriza as limitações do presente estudo e expõe as recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, estão dispostas as referências que compõem o embasamento teórico deste estudo, os apêndices desenvolvidos e os anexos necessários para a execução da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto Armado

O concreto armado foi descoberto por volta de 1849 de forma intuitiva e empírica pelo francês Joseph Louis Lambot. Sua invenção foi construir um barco de cimento armado que em testes chegou a flutuar na lagoa de sua propriedade (Carvalho, 2008).

O barco de Lambot foi patenteado em 1855 em uma exposição de Paris. Contudo, foi com Monier que o concreto armado expandiu pela Europa onde a principal característica foi a combinação adequada dos materiais. A Figura 1, a seguir, traz o protótipo original do barco no Museu de Brignoles, França.

Figura 1 – Barco de Lambot, 1849.



Fonte: Fontana (2014).

Com base no que a norma 6118:2014 fala sobre o concreto armado, Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 19, 20) o conceitua como:

“O concreto é um material composto de água, cimento e agregados. Contudo, [...] para utilização estrutural, o concreto sozinho não é adequado como elemento resistente, pois, enquanto tem uma boa resistência à compressão, pouco resiste a tração [...]. Conseqüentemente, para aumentar a resistência da viga é importante associar o concreto a um material que tenha boa resistência à tração e seja mais deformável, sendo mais comum o aço, que deve ser colocado longitudinalmente na região tracionada da peça.”

Dessa maneira, é possível identificar as principais características do concreto armado, onde o “concreto e armadura trabalham em conjunto devido à aderência e a possibilidade de ocorrência de regiões fissuradas” (Carvalho; Figueiredo Filho, 2016, p. 20). Sendo através desta aderência que permite manter a deformação nas regiões onde os dois materiais se interligam. Segundo Giongo (2007), as deformações provêm de ações diretas (forças) ou indiretas. As

ações diretas ocorrem quando é o peso próprio da estrutura que aplica uma força (Eurocode 2, 2004), logo os elementos de concreto devem suportar as cargas permanentes e variáveis, sem apresentar deformações excessivas.

Módulo de elasticidade, ou de deformação, quando submetido à compressão podem ser divididos em três tipos: tangente, deformação tangente na origem e secante. Para o módulo secante a norma apresenta valores tabelados que podem ser usados em projetos. Segue abaixo o Quadro 1 com módulos de elasticidade secante, considerando o granito como material de agregado.

Quadro 1 – Módulo de elasticidade do concreto.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,088	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

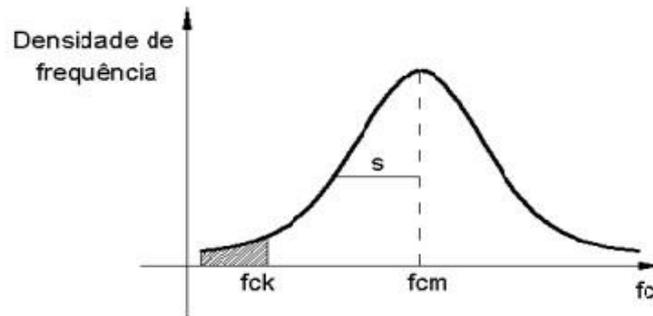
Fonte: NBR 6118 (2014).

2.1.1 Resistência a compressão do concreto

A resistência a compressão é a característica principal do concreto, obtida por ensaios de corpo de prova cilíndricos, moldados segundo a NBR 5738 e rompidos conforme a NBR 5739 (NBR 6118:2014, item 8.2.4). Os corpos de prova cilíndricos destinados para ensaio de resistência, segundo a norma, devem apresentar diâmetro de 15 cm e altura de 30 cm (Adão; Hemerly, 2010, p. 3). Apesar que, na prática os corpos de prova com dimensões 10x20cm, são mais usuais.

Para efeito da norma NBR 6118, na seção 12.2, a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), apresenta 95% de confiabilidade, ou seja, apenas 5% dos ensaios (parte hachurada do gráfico da figura 2) não alcançam o valor desejado. Esses valores estimados da resistência característica de compressão podem ser observados pela Curva de Gauss ou de Distribuição Normal, apresentado a seguir na Figura 2.

Figura 2 – Curva de Gauss para resistência do concreto a compressão.



Fonte: Pinheiro; Muzardo; Santos (2004).

Onde:

fck : Resistência característica do concreto à compressão;

fcm : Resistência média do concreto à compressão;

s : Desvio padrão, ponto em que a curva muda de concavidade.

A norma NBR 6118:2014 também cita que o ideal quando se deseja dimensionar uma estrutura de concreto armado, é fixar um valor único de para as vigas e os outros elementos estruturais. Para tanto, existe um valor fixo, especificado em norma, como o mínimo para ser usado em resistência estrutural, sendo este, $fck = 20 \text{ MPa}$ (Botelho; Marchetti, 2010).

Como já foi citado em seções anteriores, diversos fatores podem influenciar na resistência do concreto, como a relação do traço e a idade do concreto. A norma NBR 6118:2014, item 12.3.3.a, discorre que, a resistência de cálculo do concreto quando a verificação se faz em data igual ou superior a 28 dias, utiliza-se a equação 1:

$$f_{cd} = fck / 1,4 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

fcd : Resistência à compressão do concreto;

fck : Resistência à compressão característica;

γ_c : Coeficiente de ponderação no ELU ($\gamma_c=1,4$).

2.1.2 Resistência a tração do concreto

Já é de conhecimento que o concreto não trabalha sujeito a tração. Contudo, a resistência à tração diz respeito a capacidade que a peça tem de resistir aos esforços cortantes e as

fissurações, sendo assim de suma importância conhecê-la (Carvalho; Figueiredo Filho, 2016, p.16).

Existem três ensaios que determina a resistência à tração: a compressão diametral, deve ser obtida segundo a norma NBR 7222:2011, a flexo tração segundo a NBR 12142:2010 e a tração direta.

2.1.3 Características mecânicas do aço

Dentre as características mecânicas do aço as que mais se destacam são os valores característicos da resistência ao escoamento (f_{yk}), a tração (f_{stk}) e a deformação na ruptura (ϵ). Sendo estas obtidas por ensaio de tração obedecendo a NBR ISO 6892-1. Com base nos conceitos desta norma:

- **O limite elástico ou resistência de escoamento (f_{yk})**, é definido como a máxima tensão sofrida pela barra, podendo a partir de aí sofrer deformações permanentes. A resistência é igual para tração e compressão.

- **Resistência à tração ou limite de resistência (f_{stk})**, é a máxima tensão suportada pela barra, através do ensaio de tração. A tensão é obtida pela relação entre a força de ruptura e a área da seção transversal da amostra.

- **Deformação na ruptura (ϵ)**, ocorre quando durante o processo de ruptura há um aumento da extensão do corpo de prova.

Quanto a categoria, as barras de aço são de acordo com o valor característico da resistência de escoamento. Segue abaixo o Quadro 2, na qual Carvalho e Figueiredo Filho adaptaram da norma, contendo as propriedades mecânicas dos aços.

Quadro 2 – Propriedades mecânicas dos aços.

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

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016).

Onde:

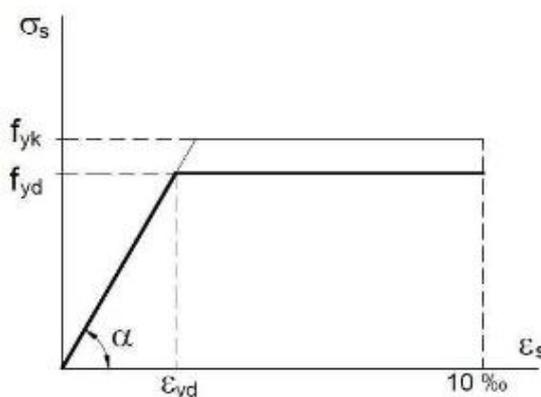
f_{yd} :Tensão de resistência de cálculo do aço, igual a $f_{yk}/1,15$;

f_{yk} :Resistência característica do aço à tração;

ϵ_{yd} :Deformação específica de escoamento.

Para o cálculo nos estados-limite de serviço e último a NBR 6118:2014 no “item” 8.3.6 dispõe que, pode-se utilizar o diagrama de tensão-deformação para os aços com ou sem patamar de escoamento. Este diagrama é válido para intervalos de temperatura entre -20 °C e 150 °C e pode ser aplicado para tração e compressão, indicado na Figura 3(figura 8.4 da NBR 6118:2014).

Figura 3 – Diagrama de tensão-deformação.



Fonte: NBR 6118 (2014).

Observa-se que a linearidade deste diagrama é decorrente do concreto não ser submetido a elevadas tensões, sendo a tensão e deformação proporcionais, obedecendo à lei de Hooke. A relação estabelecida no gráfico (σ/ϵ) é conhecida como Módulo de elasticidade, onde cada material tem um, pois, dependem de suas características de alongar, encurtar quando submetidos a tração ou compressão (Botelho; Marchetti, 2015). Em casos que o fabricante não fornece os dados ou por falta de ensaio, o módulo de elasticidade do aço é:

$$E_s = 210.000 \text{ Mpa } (2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2).$$

2.2 Elemento Estrutural: Viga

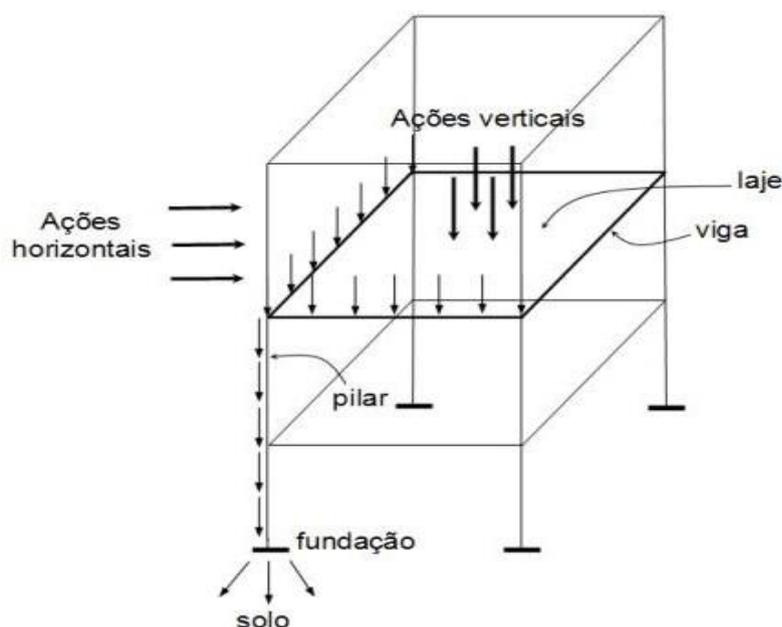
Conforme o “item” 14.4 da NBR 6118:2014, os elementos estruturais serão classificados e definidos quanto a sua forma e função. Se subdividem em dois grupos, os elementos lineares e de superfície. Elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, a exemplo, pilar e vigas.

O assunto a qual será abordado neste capítulo diz respeito a furos em vigas, logo será focado apenas neste componente, de modo a entender o seu desempenho na estrutura. A NBR 6118:2014, p.83, “item” 14.4.1.1 diz, vigas são “elementos lineares em que a flexão é

preponderante.”

A viga dentro da estrutura é responsável por recebe esforço da laje, contudo, quando se trata de múltiplos pavimentos, ela acaba recebendo o carregamento de todos os componentes que se encontram superiores a esta e, como consequência, a mesma absorve as cargas distribuídas por estes componentes e transmite para os apoios, geralmente os pilares, que agirão sobre a fundação e daí é dissipada no solo (Bastos, 2006). Como ilustrado na Figura 4, tem-se o esquema de distribuição das cargas que mostra a inter-relação da viga com os outros elementos estruturais.

Figura 4 – Inter-relação da viga com outros elementos estruturais.



Fonte: Brito e Silva (2010).

Segundo a norma NBR 6118:2014, na seção 13.2, que fala sobre as dimensões e limites que a viga deve atender não pode apresentar largura menor que 12 cm. Contudo, para casos excepcionais respeitando algumas condições impostas pela norma é possível encontrar viga com largura de 10 cm. As condições são:

- alojamento das armaduras e suas interferências com as armaduras de outros elementos estruturais, respeitando os espaçamentos e cobrimentos estabelecidos nesta Norma;
- lançamento e vibração do concreto de acordo com a NBR 14931:2004.

Pinheiro (2007, p. 6.3), estabelece que o pré-dimensionamento da altura de uma viga pode ser estimado de forma grosseira, sendo eles:

- Tramos internos: $hest = l_o/12$;
- Tramos externos ou viga bi apoiadas: $hest = l_o/10$;
- Balanços: $hest = l_o/5$.

A viga é composta por armaduras longitudinais e transversais, respectivamente, denominadas de barra longitudinal e estribos.

2.2.1 Vigas sob Flexão Normal

O estudo da flexão normal simples visa melhorar o entendimento do leitor sobre os mecanismos resistentes do concreto sob ação da compressão e o aço da tração (Bastos, 2015), é possível verificar três regiões na viga, entre elas estão uma região intermediária onde os esforços são nulos, conhecida como linha neutra e, à medida que vai se afastando desta linha, é perceptível o aumento (Augustinho, 2007).

A NBR 6118:2014, p.91 no “item” 14.6.4.3, diz a “capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU. Quanto menor for x/d , tanto maior será essa capacidade.” A norma também impõe um limite para a posição da linha neutra que deve ser obedecido para promover adequado comportamento dúctil em vigas. Contudo, haverá casos, como de confinamento, que este limite pode ser alterado:

- $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$.
- $x/d \leq 0,35$ para concretos com $50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$.

A Figura 5 ilustra a posição da linha neutra em uma viga de seção retangular. A partir dela é possível compreender o esforço suportado pelo aço à tração e o concreto à compressão.

Figura 5 – Posição da linha neutra na viga.



Fonte: Kaufmann (2016).

2.3 Estados Limites

Os estados limites de serviço, conforme a NBR 6118:2014 “item” 10.4, “são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização, seja em relação aos usuários, ou em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.” Os elementos lineares, neste caso a viga, estão sujeitos a solicitações normais, ou seja, os estados

limites em que a estrutura pode ser submetida, sendo este dividido em dois: estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS). É de fundamental importância conhecer os estados limites, pois é a partir deles que é verificada a segurança da estrutura, a durabilidade, aparência, e se ela pode chegar ao colapso.

Os estados limites últimos que devem ser analisados para garantir a segurança da estrutura de concreto de acordo com a NBR 6118:2014, p. 54 – 55, são:

- a) Perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na Seção 14, e admitindo-se, em geral, verificações separadas dessas solicitações;
- c) Esgotamento de capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) Provocado por solicitações dinâmicas (seção 23 da NBR 6118:2014);
- e) Colapso progressivo;
- f) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme a NBR 15200:2012;
- g) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas, de acordo com a NBR 15421:2006;
- h) Outros que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

Para garantir o bom desempenho de uma estrutura em serviço, deve-se respeitar limitações de flechas, de abertura de fissuras ou de vibrações. A seguir serão apresentados a definição de cada estado limite, importantes para a segurança da estrutura de concreto (NBR 6118:2014, p. 5 – 6).

- a) Formação de fissuras (ELS-F): estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado-limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a f_{ct} , f (ver 13.4.2 e 17.3.4 da NBR 6118:2014);
- b) Abertura das fissuras (ELS-W): estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados em 13.4.2 (ver 17.3.3 da NBR 6118:2014);
- c) Deformações excessivas (ELS-DEF): estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal, dados em 13.3 (ver 17.3.2 da NBR 6118:2014);

- d) Vibrações excessivas (ELS-VE): estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção (ver 23.3 da NBR 6118:2014).

Como o propósito é estudar e entender o comportamento da viga com furos durante o período de utilização, e sabendo que enquanto está sendo sobrecarregado está propício o surgimento de fissuras e deslocamento, posteriormente, será abordado esses dois tópicos com mais detalhes.

2.3.1 Fissuração

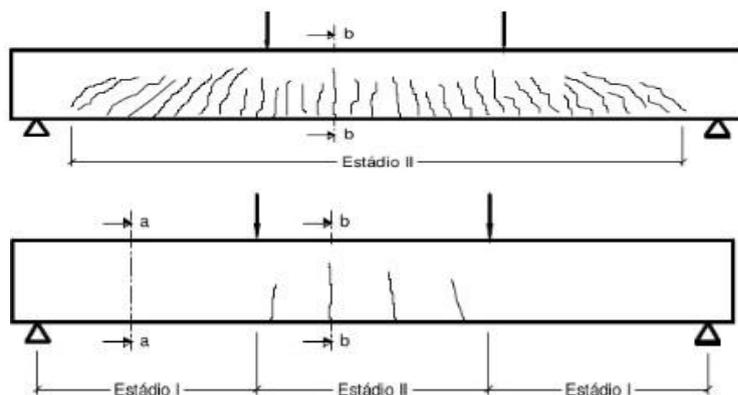
Atualmente, é imprescindível fazer o controle do nível de fissuração das peças, para assim, conseguir controlar os deslocamentos. Por isso, os estudos para minimizar os efeitos dos deslocamentos vêm sendo cada vez mais importante no desenvolvimento de projetos para prevenir futuros problemas na estrutura. Sendo assim, para segurança é necessário fazer a verificação do estado limite de serviço, para não evoluir a um estágio máximo, o colapso da estrutura. A NBR 6118:2014, p. 79, fala:

“A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração; mesmo sob as ações de serviço (utilização), valores críticos de tensões de tração são atingidos. Visando obter bom desempenho relacionado à proteção das armaduras quanto à corrosão e à aceitabilidade sensorial dos usuários, busca-se controlar a abertura dessas fissuras.”

O processo de fissuração é composto por graus e estádios que, respectivamente, dependerá do nível de esforço ou carga atuante na peça de concreto armado, da qualidade e quantidade de armadura, da retração, da desforma, reescoramento, etc. Estádios são as diversas fases pela qual passa à seção de concreto, ao longo desse carregamento, e são divididos em três níveis de deformação: estágio I, estágio II e estágio III (Barbosa, 2010).

Na Figura 6 apresenta o comportamento resistente e estádios de uma viga de concreto armado sujeito a cargas concentrada e simétrica. As fissuras que surgem em vigas têm a característica de serem inclinadas, com incidência nas regiões dos apoios, onde a força cortante é maior (Carvalho; Figueiredo Filho, 2016).

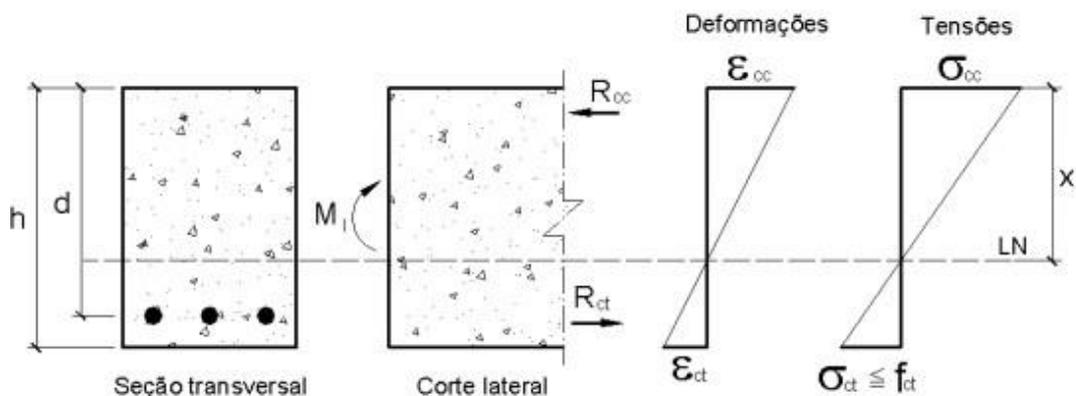
Figura 6 – Comportamento resistente e estádios de uma viga.



Fonte: Leonhardt e Monnig (2008).

Estádio I (estado elástico): é característico por não apresentar fissuras visíveis devido à ação das tensões ser de pequena intensidade, onde a estrutura de concreto suporta as tensões de tração. Nesse estágio o diagrama de tensão normal é linear, sendo válida a lei de Hooke (Figura 7).

Figura 7 – Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I).



Fonte: Pinheiro (2007).

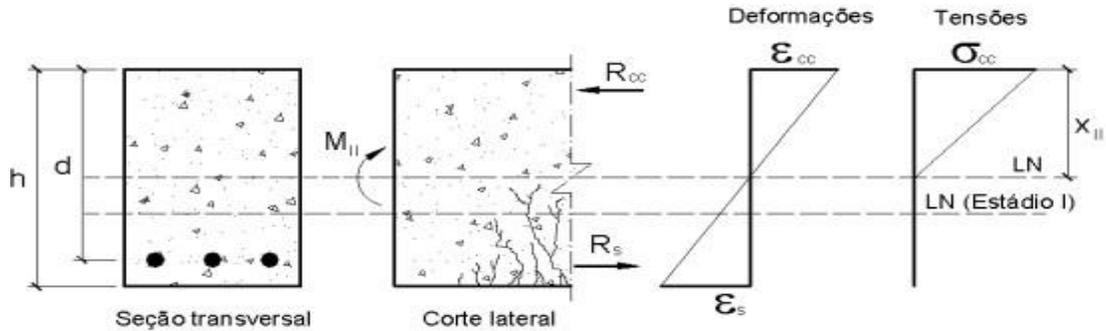
Segundo Pinheiro (2007), é nesse que é conhecido o momento de fissuração, e assim é calculado a armadura mínima. Logo, o estágio I finaliza quando inicia as fissurações, retomando a análise da Figura 6, os locais onde demarcam o estágio I não apresenta fissuras.

Estádio II (estado de fissuração): as tensões de tração abaixo da linha neutra são superiores ao da resistência característica do concreto. Nesta fase apenas o aço que está trabalhando para resistir aos esforços de tração e as fissuras são bastantes visíveis.

O diagrama neste estágio ainda obedece à lei de Hooke, por ser linear (Figura 8). Possui a funcionalidade de verificar o estado de serviço e termina quando inicia o estágio de plastificação

do concreto comprimido (Pinheiro, 2007).

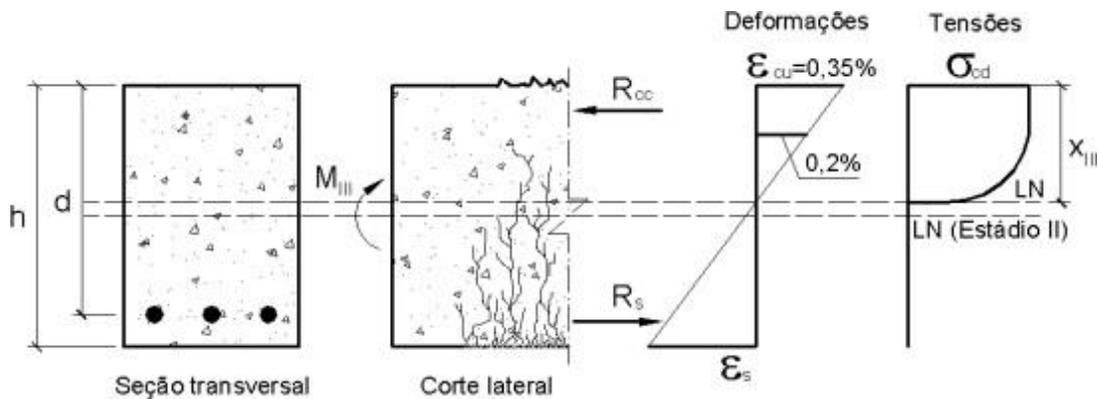
Figura 8 – Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II).



Fonte: Pinheiro (2007).

Estádio III: corresponde ao estado limite último da peça e só ocorre em casos extremos quando está em eminência de ruína. Admite um diagrama de tensões parábola-retângulo e a partir dele é feito o dimensionamento das estruturas. (Figura 9).

Figura 9 – Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III).



Fonte: Pinheiro (2007).

2.3.2 Abertura máxima de fissuras

As estruturas são feitas para suportar o carregamento desejado, contudo, quando houver o surgimento de aberturas é necessário verificar se estão dentro do limite estabelecido em norma para que não comprometa a estabilidade e durabilidade do elemento estrutural (Carvalho; Figueiredo Filho, 2016). Abaixo será apresentado um quadro que foi adaptado da Tabela 13.4 da NBR 6118:2014 com valores máximos permitidos para aberturas de fissuras conforme a

classe de agressividade (Quadro 3).

Quadro 3 – Abertura máxima de fissuras características (w_k).

Classe de agressividade ambiental (ver quadro 4)			
I	II	III	IV
w_k $\leq 0,4mm$	w_k $\leq 0,3mm$	w_k $\leq 0,3mm$	w_k $\leq 0,2mm$

Fonte: NBR 6118 (2014).

As aberturas (w_k) do Quadro 3 mostram quais limites devem ser obedecidos para garantir proteção adequada as armaduras quando propício à corrosão. É importante ressaltar que nem sempre os valores citados acima são de fato encontrados, podendo até ultrapassar estes limites (NBR 6118:2014, “item” 13.4.2).

Quando existe o controle da fissuração sem verificação, é viável que seja observado alguns detalhes como é relatado no “item” 17.3.3.3 da NBR 6118:2014, p. 129, “para dispensar a avaliação da grandeza da abertura de fissuras e atender ao estado-limite de fissuração um elemento estrutural deve ser dimensionado respeitando as restrições” do quadro 4 (adaptação da Tabela 17.2 da NBR 6118:2014).

Quadro 4 – Valores máximos de diâmetro e espaçamento com barras de alta aderência.

Tensão na barra	Concreto sem armadura ativas	
	σ_{si} (Mpa)	$\phi_{m\acute{a}x}$ (mm)
160	32	30
200	25	25
240	20	20
280	16	15
320	12,5	10
360	10	5
400	8	-

Fonte: NBR 6118 (2014).

2.3.3 Deslocamento

Com o passar dos anos é perceptível que houve uma mudança na arquitetura das construções, tornando as estruturas de concreto armado mais esbeltas e, conseqüentemente, a diminuição das seções transversais das vigas e das espessuras das lajes. Só que isso trouxe além de maior eficiência nas peças estruturais, um problema, os deslocamentos excessivos, normalmente comuns em elementos flexíveis. Portanto, a avaliação das estruturas em serviço torna-se imprescindível (Barbosa, 2010).

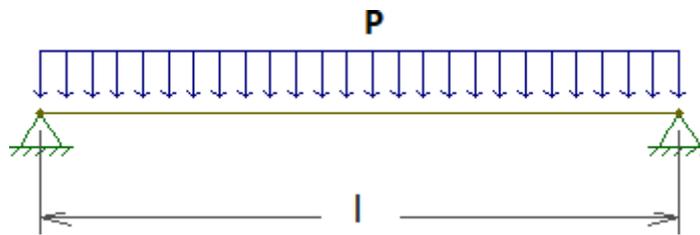
De acordo com a norma NBR 6118:2014 no “item”13.3 “deslocamentos-limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura.” Conforme a norma é classificada os limites de deslocamento em quatro grupos:

- Aceitabilidade sensorial: caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito indesejáveis. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na seção 23 da norma;
- Efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- Efeito em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade devem ser considerados, incorporando ao modelo estrutural adotado.

A verificação dos valores-limites de deslocamentos para um adequado comportamento da estrutura se encontra em Anexo A. Para vigas o cálculo de deslocamento a em um ponto K, é nomeado segundo a norma de flecha. Considerando o momento fletor devido ao carregamento atuante (M_o) e o de uma carga concentrada e unitária (M_1), as flechas obtidas podem ser observadas abaixo (Figura 10):

Figura 10 – Cálculo de deslocamento a em viga simplesmente apoiada.

Viga simplesmente apoiada com carregamento distribuído.



Flecha da viga simplesmente apoiada com carregamento distribuído.

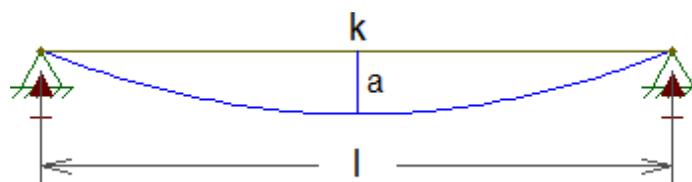


Diagrama de momento fletor (M_0) da viga com carregamento distribuído.



Viga simplesmente apoiada com carregamento concentrado e unitária.

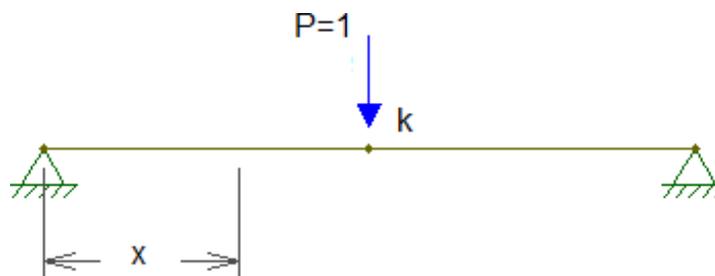
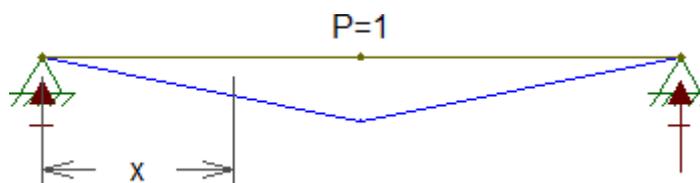


Diagrama de momento fletor (M_1) da viga com carregamento concentrado e unitária.



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016).

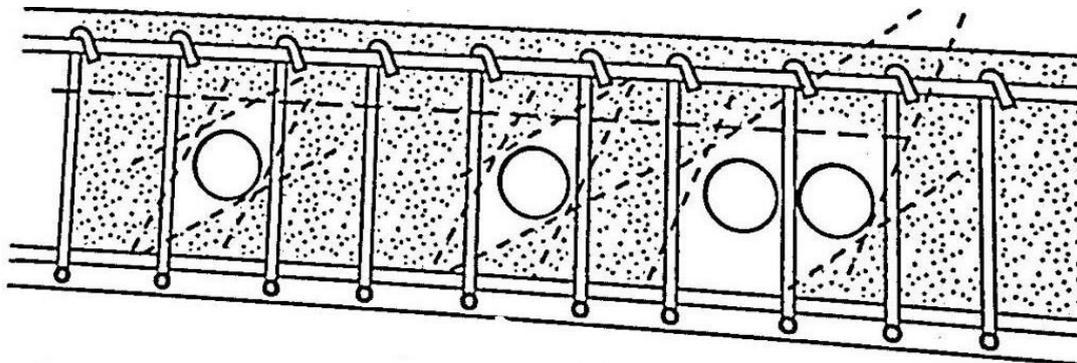
2.4 Aberturas em Vigas

Na maioria das vezes a definição de furos e aberturas se confundem, a norma estabelece que, “furos são os espaços de pequenas dimensões e, (...) aberturas, aqueles espaços de dimensões maiores. Um conjunto de furos muito próximos deverá ser avaliado como uma abertura” (NBR 6118:2014, p. 75). A Figura 11, apresenta uma sequência de furos, considerado como uma abertura.

Conforme NBR 6118:2014 é permitido a utilização de furos em elementos estruturais,

desde que atenda as especificações mínimas exigidas no “item” 13.2.5. Sendo necessário verificar os efeitos provocados pelos furos/aberturas na resistência e na deformação.

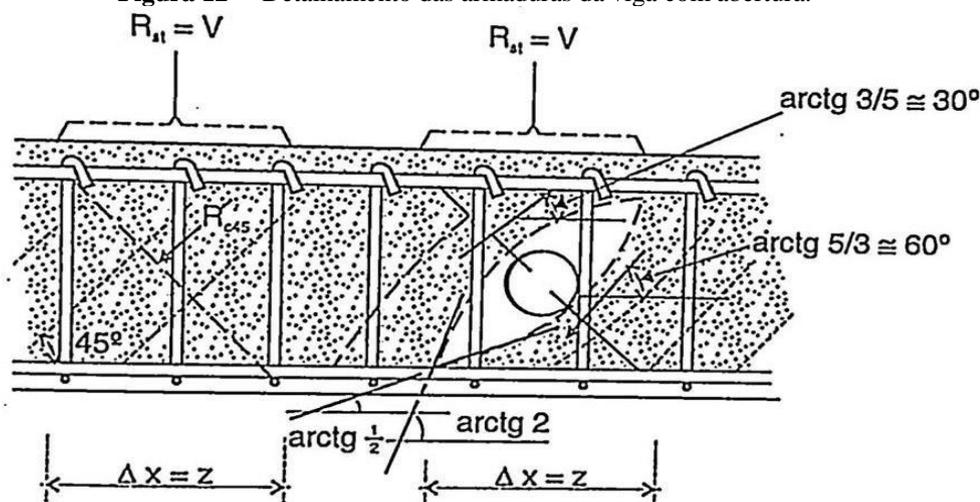
Figura 11 – Abertura na alma da viga.



Fonte: Fusco (2007).

Segundo Fusco (2007), o detalhamento de aberturas em vigas deve sempre ser considerado uma inclinação entre $\arctg(3/5)$ e $\arctg(5/3)$, por questões de segurança, das bielas diagonais de concreto em relação ao eixo longitudinal. Como ilustrado abaixo (Figura 12).

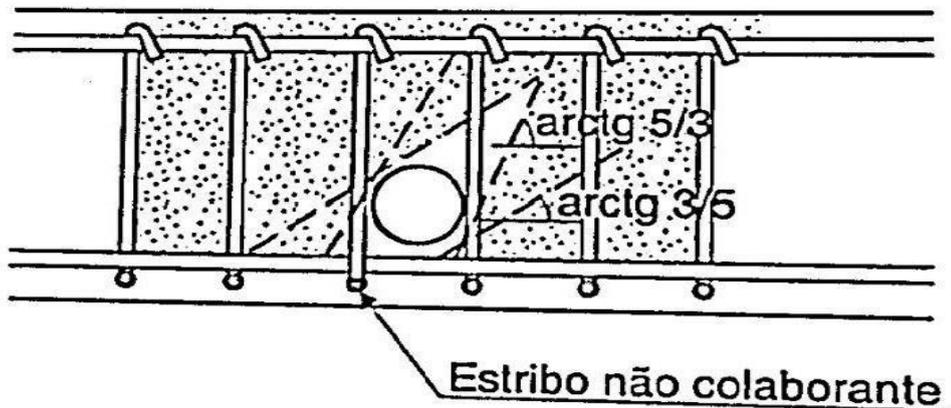
Figura 12 – Detalhamento das armaduras da viga com abertura.



Fonte: Fusco (2007).

Ainda conforme Fusco (2007, p. 331), “aberturas da alma podem tornar não colaborantes certos estribos (Figura 13) e que as aberturas múltiplas podem comprometer seriamente a resistência da peça.” Essas aberturas múltiplas diminuem a rigidez da viga, é preciso ter uma atenção maior para o surgimento de fissuras próximo a essas regiões. Por isso, deve-se ser aberto furo no trecho onde não há força cortante e favorecendo sempre as aberturas circulares do que as retangulares, devido ser mais fácil a execução (Leonhardt e Monnig, 2008).

Figura 13 – Estribos não colaborantes.



Fonte: Fusco (2007).

Atualmente, é muito comum a prática de furar vigas de forma aleatória, por vários fatores, falta de idealização e compatibilidade de projetos, ou até mesmo por não conhecimento de quem está executando a obra. Na Figura 14 mostra a presença de furos não previsto para passagem de dutos.

Figura 14 – Furos não previstos em projeto.



Fonte: Kaufmann (2016).

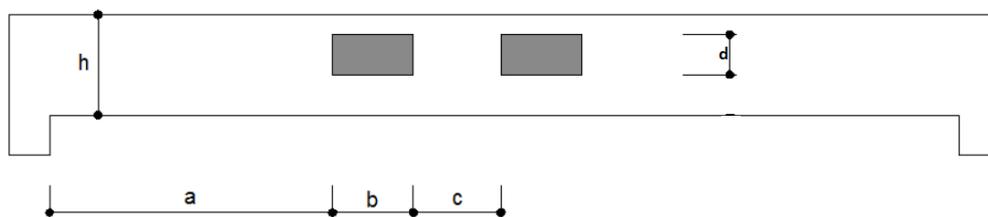
Dentre as situações que exigem furos, estão: furos que atravessam as vigas na direção da largura, furos que atravessam as vigas na direção da altura e casos que necessitam de canalização embutida.

2.4.1 Furos que Atravessam a Viga na Direção da Largura

Para os casos que necessitem a presença de um furo horizontal é previsto que atenda uma distância mínima igual a 5 cm do furo à face mais próxima e duas vezes o cobrimento para essa face. Na região onde efetuou o furo deve ser capaz de resistir aos esforços previstos no cálculo, além de permitir uma boa concretagem (NBR 6118:2014, p.75).

Existem algumas condições que devem ser respeitadas, a fim de serem dispensadas da verificação, a Figura 15 traz os limites que devem ser obedecidos, a seguir:

Figura 15 – Furo na direção da largura.



Fonte: Costa (2013).

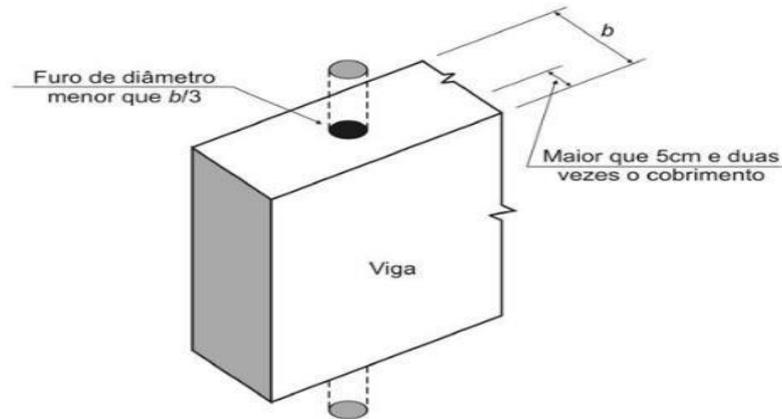
- Furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo $2h$, onde h é a altura da viga;
- Dimensão do furo de no máximo 12 cm e $h/3$;
- Distância entre faces do furo, num mesmo tramo, de no mínimo $2h$;
- Altura do furo de no máximo 12 cm e $h/3$.

2.4.2 Furos que Atravessam as Vigas na Direção da Altura

As aberturas em seu plano principal, atravessando na direção da altura (Figura 16), seguem os seguintes critérios, item 21.3.3:

- As aberturas não devem ter diâmetros superiores a $1/3$ da largura dessas vigas nas regiões desses furos;
- Deve ser verificada a redução da capacidade portante ao cisalhamento e à flexão na região da abertura;
- A distância de um furo à face mais próxima da viga no mínimo a 5 cm e duas vezes o cobrimento;
- Com mais de um furo seguido, deveram estar alinhados, distantes 5 cm ou a medida do diâmetro, e cada intervalo deve conter um estribo;
- Em casos de torção, esses limites devem ser ajustados de forma a atender adequadamente o funcionamento da peça.

Figura 16 – Furo vertical.



Fonte: NBR 6118 (2014).

2.5 Canalização Embutida

Os elementos estruturais não podem conter canalizações embutidas nos seguintes casos, item 13.2.6:

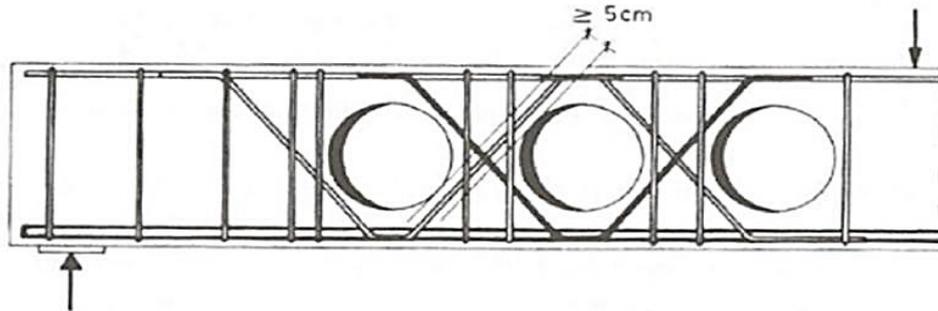
- Canalização sem isolamento adequado destinados a fluidos que ultrapassem 15° da temperatura ambiente;
- Canalização que suporte pressões internas acima de 0,3 Mpa;
- Canalização embutida em pilar de concreto sem a existência de abertura para drenagem.

2.6 Armadura de Reforço em Aberturas

Quando o projeto solicita que a estrutura (viga) apresente aberturas ou furos devem ser considerando em cálculo as perturbações das tensões que se concentram em seu entorno, prevendo, a existência de possíveis armaduras para resistir os esforços solicitados, assim como, armaduras complementares dispostas no contorno e nos cantos das aberturas (NBR 6118:2014) “item” 21.3.1.

Ao ser projetada e detalhada uma viga com furo deve ser considerada a presença de perturbações de tensões no em torno dessas aberturas, prevendo-se armaduras que equilibrem os esforços de tração para estes casos, estas armaduras são chamadas de complementares ou de reforço e são distribuídas no contorno dos furos (NBR 6118:2014). Para aberturas circulares próximas, Leonhardt sugeriu que deverá ser garantida uma distância mínima de 5 cm entre os furos, sendo conveniente adicionar armaduras de cisalhamento inclinadas, conforme a figura 17.

Figura 17 – Armadura de reforço em vigas com furos.



Fonte: Leonhardt e Monnig (2007).

Segundo Giugliani (2007), as etapas para o dimensionamento de armaduras de reforço em aberturas de vigas, são as seguintes:

- Definir diagramas de solicitações de momento e cortante da viga, para as cargas atuantes;
- Dimensionar a viga à flexão e ao cisalhamento considerando a seção cheia;

$$M \rightarrow A_{Sflexão}$$

$$V \rightarrow A_{SW}$$

- Definir a seção 's' onde será posicionado o centro da abertura, obtendo-se as solicitações M_s e V_s ;

M_s = Momento fletor na seção s;

V_s = Cortante na seção s.

- Posicionar a abertura na direção da altura da viga, priorizando-se preferencialmente a ocupação da zona tracionada da alma;

- Determinar as forças normais nos banzos;

$$N_c = N_t = M_s / Z \quad (\text{Equação 2})$$

N_c = Força de compressão no banzo comprimido;

N_t = Força de tração no banzo tracionado;

Z = Distância na vertical entre os eixos dos banzos.

- Determinar as forças cortantes nos banzos, a partir do V_s da seção, considerando-se que um maior percentual de V_s seja absorvido pelo banzo comprimido, pois o banzo tracionado é admitido fissurado;

$$V_c = 0,8 \text{ a } 0,9 V_s, \text{ no banzo comprimido;}$$

$$V_t = 0,2 \text{ a } 0,1 V_s, \text{ no banzo tracionado.}$$

- Determinar os momentos fletores nos banzos;

$$M_c = V_c \times L/2, \text{ momento no banzo comprimido; (Equação 3)}$$

$$M_t = V_t \times L/2, \text{ momento no banzo tracionado. (Equação 4)}$$

- Dimensionar os banzos à flexão composta;

$$M_c, N_c, V_c, A_{sc}, A_{swc}$$

$$M_t, N_t, V_t, A_{st}, A_{swt}$$

- Determinar armadura de suspensão (A_{sws}) nas extremidades da abertura para um esforço cortante equivalente a $0,80 V_s$, distribuída em uma largura de $h/4$, em ambos os lados.

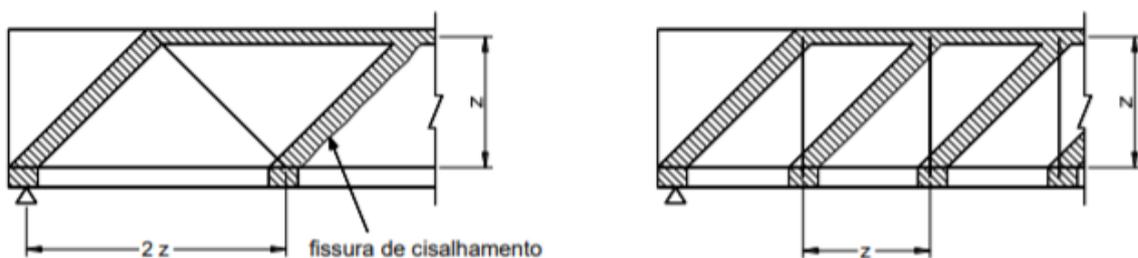
2.7 Método de Bielas e Tirantes

2.7.1 Analogia da Treliça

A analogia da Treliça de Ritter e Morsch consiste dizer que um carregamento qualquer aplicado na viga irá percorrer caminho semelhante ao de uma treliça até chegar aos apoios. A partir dessa teoria é possível explicar o comportamento das fissuras em peças de concreto armado. Analogicamente, o banzo superior é representado pelo concreto comprimido, o banzo tracionado pela armadura de flexão e as diagonais inclinadas tracionadas são formadas pela armadura transversal.

A Figura 18 representa o modelo da treliça de Ritter e Morsch, a partir dela é possível verificar que o concreto comprimido (bielas comprimidas) tem inclinação de 45° (Figura 18.a) e de 45° a 90° (Figura 18.b) para as armaduras transversais (tensões principais de tração).

Figura 18 – Analogia clássica de treliça.



a) Armadura transversal a 45° .

b) Armadura transversal a 90° .

Fonte: Bastos (2017).

Segundo a norma NBR 6118:14, p. 131, o dimensionamento de vigas à força cortante pode ser analisado admitindo “(...) dois modelos de cálculo que pressupõem a analogia com

modelo em treliça, de banzos paralelos, associado a mecanismos resistentes complementares desenvolvidos no interior do elemento estrutural e traduzidos por uma componente adicional V_c .” Admitindo que o modelo 1 da NBR 6118:2014 “item” 17.4.2.2, considera o ângulo de inclinação das diagonais comprimidas à (45°) , logo este servirá de apoio para o estudo da treliça clássica.

2.7.2 Descrição do Método de Bielas e Tirantes

Segundo Silva e Giongo (2000), o método de bielas e tirantes é utilizado para o calcular as forças atuantes em estruturas de concreto armado, objetivando representar os fluxos de tensões que envolvem o elemento estrutural, usando o processo do caminho de cargas (Figura 18). A partir deste modelo é possível localizar as fissuras na estrutura, assim como a posição das armaduras transversais. “Caso se disponha das tensões elásticas e suas direções principais por uma análise elástica, o desenvolvimento do modelo é imediato. Tal análise pode ser feita utilizando métodos numéricos, como, por exemplo, o método dos elementos finitos (Silva; Giongo, 2000, p.6).”

Para definir o modelo de bielas e tirantes segundo Silva e Giongo (2000) deve-se considerar os aspectos geométricos citados abaixo:

- Tipos de ações atuantes;
- Ângulos entre bielas e tirantes;
- Área de aplicação das ações e reações;
- Número de camadas da armadura;
- Cobrimento da armadura.

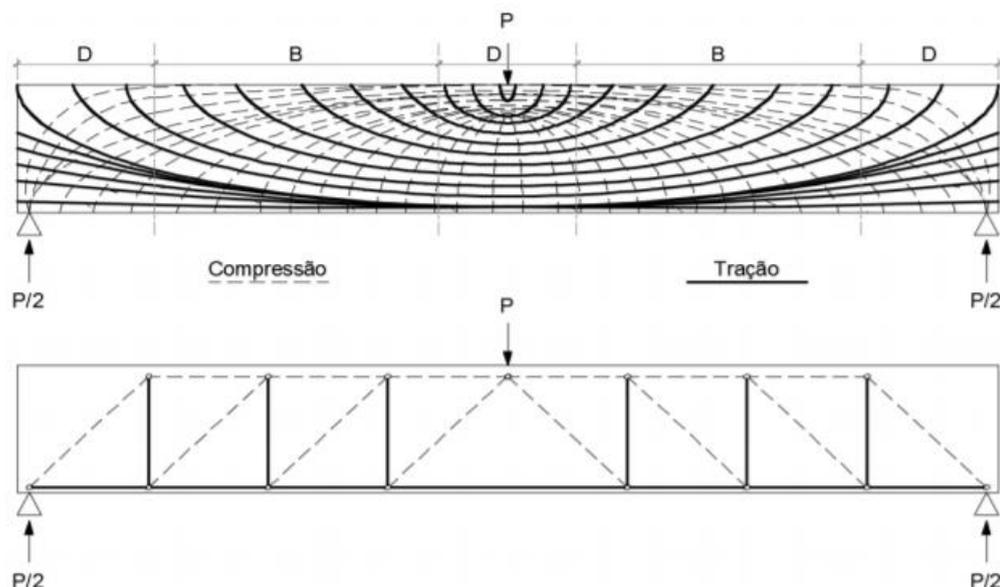
Com base nesses aspectos definidos anteriormente as ações atuantes determinaram os ângulos entre as bielas e tirantes, e as dimensões das bielas e regiões nodais dependem da área de aplicação das ações e reações, do número de camadas e do cobrimento da armadura (Silva e Giongo, 2000, p.6).

Para o dimensionamento do modelo de bielas e tirantes Silva e Giongo propõe um roteiro para projeto de elementos estruturais:

- Determinar e separar as regiões B e D;
- Identificar os esforços solicitantes que estão atuando próximo da região D;
- Determina o caminho das cargas;
- Dimensionam-se os tirantes;
- Verificam-se as tensões nas bielas e regiões nodais.

A Figura 19 representa o caminho que as cargas percorrem na viga bi apoiada com carga concentrada, sendo as linhas contínuas representadas por tensões de tração em tirantes e as tracejadas por compressão nas bielas.

Figura 19 – Campos de tensões de compressão e tração e modelo de biela e tirantes.



Fonte: Aguiar (2018).

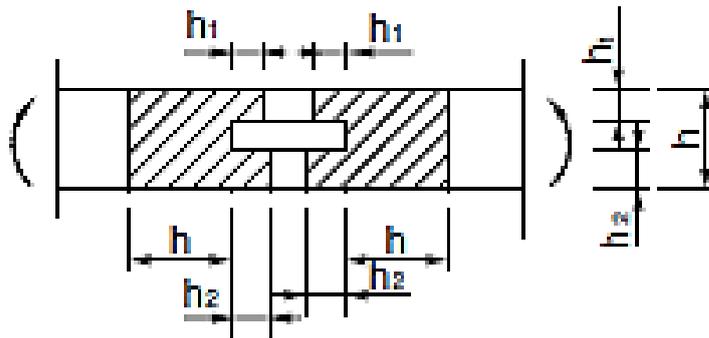
2.7.3 Regiões B e D

A norma NBR 6118 (2014, p.179) definem as regiões contínuas e descontínuas, como:

“São chamadas de regiões B de um elemento estrutural aquelas em que as hipóteses da seção plana, ou seja, de uma distribuição linear de deformações específicas na seção são aplicáveis. As regiões D são aquelas em que esta hipótese da seção plana não mais se aplica. Em geral, o limite entre as regiões B e D pode ser considerado localizado a uma distância h (altura da seção transversal do elemento estrutural considerado) da seção efetiva da descontinuidade.”

São exemplos de regiões descontínuas com deformação não-linear devido à descontinuidade geométrica, ocorridas em casos de aberturas, e estática, quando ocorrem ações de forças concentradas e reações nos apoios (Figura 19). Segundo Costa (2013) através do princípio de Saint-Venant, é possível identificar as localizações das regiões B e D, onde as descontinuidades equivalem a maior dimensão da seção transversal, neste caso, a altura da viga, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Viga com abertura.



Fonte: NBR 6118 (2014).

2.7.4 Bielas

Silva e Giongo (2000) dizem que as bielas são representadas como discretizações de tensão de compressão no concreto, e que estas variam de campos de acordo com as ações concentradas e reações que atuam na estrutura. Sendo assim, existem três representações típicas para bielas de concreto:

– Distribuição de tensão radial ou em leque: onde as tensões de tração transversais não se desenvolvem, campos de tensões com curvatura desprezível;

– Distribuição em linhas curvilíneas ou “garrafa”: as forças concentradas são introduzidas e propagadas por curvaturas acentuadas e se desenvolvem tensões de tração transversais. A combinação das tensões transversais com a compressão longitudinal, pode provocar fissuras na estrutura, podendo conduzir a ruptura do concreto a tensões inferiores à compressão do concreto.

– Distribuição de tensões paralela ou prismática: a tensão se distribui uniformemente, sem perturbações, presentes nas regiões B.

Existem alguns parâmetros para a verificação da resistência das bielas, visto que a resistência de compressão das bielas ser inferior ao do banzo comprimido. São eles, segundo a NBR 6118:14, p. 181, “item” 22.3.2:

- $f_{cd1} = 0,85 \alpha_{v2} f_{cd}$ (bielas prismáticas ou nós CCC);
- $f_{cd2} = 0,6 \alpha_{v2} f_{cd}$ (bielas atravessadas por mais de um tirante, ou nós CTT ou TTT);
- $f_{cd3} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd}$ (bielas atravessadas por um único tirante, ou nós CCT).

Onde, a NBR 6118:14, p. 179, “item” 22.1:

f_{cd1} – Tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo método de bielas e tirantes, em regiões com tensões de compressão transversal ou sem tensões de tração transversal e em nós onde confluem somente bielas de compressão (nós CCC);

f_{cd2} – Tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo método de bielas e tirantes, em regiões com tensões de tração transversal e em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados (nós CTT ou TTT);

f_{cd3} – Tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo método de bielas e tirantes, em nós onde conflui um tirante tracionado (nós CCT).

A NBR 6118:14, p.136, determina que o coeficiente α_{v2} seja obtido pela equação:

$$\alpha_{v2} = 1 - f_{ck}/250 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde, o f_{ck} representa a resistência a compressão do concreto, em MPa;

2.7.5 Tirantes

Silva e Giongo (2000) explica que as forças de tração nos tirantes são usualmente absorvidas pelas armaduras que possui eixo coincidindo com o do tirante no modelo. Através da relação entre forças de tração sobre a resistência de escoamento do aço considerando ELU é obtido os parâmetros de cálculo dos tirantes.

De acordo com NBR 6118:2014, item 22.3.3, obtém-se a área da armadura a ser aplicada em cada tirante:

$$A_S = \gamma_F R_{ST} / f_{yd} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

A_S = Área de aço, em cm^2 ;

γ_F = Coeficiente de majoração das ações;

R_{ST} = Força de tração atuante, em kN ;

f_{yd} = Resistencia ao escoamento do aço, em kN/cm^2 .

2.7.6 Nós

Conforme Silva e Giongo (2000, p.23) o “nó representa a mudança de direção da força [...] esse desvio normalmente ocorre em um certo comprimento e largura. Em nós onde há um

tirante ancorado, que consiste em várias barras de armadura uniformemente distribuídas, esse desvio pode ser efetuado adequadamente.”

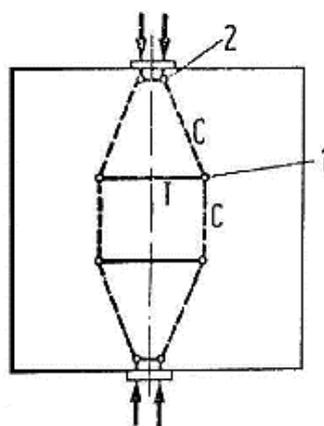
Existem algumas classificações para os nós:

– Nós concentrados ou singulares: aqueles em que forças concentradas são aplicadas e o desvio de forças é feito localizadamente;

– Nós distribuídos ou contínuos: os desvios das forças são em comprimentos plausíveis.

A Figura 21 traz os nós distribuídos e singulares, respectivamente 2 e 1, em regiões descontínuas.

Figura 21 – Nós singulares e distribuídos.



Fonte: Filho (1996).

2.8 SAP 2000

A partir do desenvolvimento dos sistemas construtivos, da grandiosidade das estruturas, e principalmente, da necessidade de segurança que elas devem proporcionar aos usuários, que os “softwares” computacionais andam aliados nesta evolução. Visto que é uma ferramenta que possibilita análise eficiente e prática simulando o comportamento real da estrutura.

No mercado existem uma variedade de programas computacionais utilizadas no dimensionamento de estruturas de concreto armado, a exemplo têm-se: AltoQi Eberick, TQS e Cypecad. Contudo, estes não possibilitam análise de algumas estruturas especiais, para tal existem alguns softwares comerciais que trabalham com soluções numéricas pelo MEF, é caso do SAP 2000.

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico que permite solução de equações diferenciais parciais. Sua principal característica é subdividir a estrutura em elementos finitos, os quais formam uma malha. Com a discretização do corpo é possível estudar

cada nó para obtenção de análises mais precisas (Santos; Neto, 2015).

Atualmente é muito difundido em diferentes campos das áreas exatas, principalmente na engenharia civil pelos projetistas de estruturas. Contudo, os engenheiros devem entender o funcionamento destes programas, pois, nada adianta saber modelar e não compreender os resultados obtidos. Segundo Azevedo (2003), a aplicação do método para verificação de uma estrutura objetiva determinar o estado de tensão e de deformação do sólido sujeito a ações exteriores.

O SAP 2000 é um software de análise estrutural por elementos finitos e admite um comportamento linear, não-linear estático e dinâmico para a estrutura. Através dele é possível modelar viga, pórticos, lajes, cascas e estruturas tridimensionais como treliças. Considerando em sua análise, carregamentos diversos, esforços dinâmicos, efeitos de gradiente de temperatura e pressões, analisar esforços devidos a deslocamentos impostos (Melo, 2016).

O programa possui uma interface gráfica que permite modelar, analisar e obter os resultados do modelo estrutural. A composição do modelo consiste nos seguintes componentes:

- Unidades;
- Objetos e elementos;
- Grupos de objetos e elementos;
- Propriedades;
- Casos de carregamento;
- Funções;
- Definição de casos;
- Combinações;
- Definições de projetos;
- Saída de dados.

3 METODOLOGIA

Nesta seção estão descritos os procedimentos utilizados para a realização desse estudo, foram modeladas vigas com aberturas em posições diferentes e para análise foi utilizado o software SAP 2000, que utiliza método de elementos finitos, além deste foi utilizado o método de bielas e tirantes para fazer o comparativo.

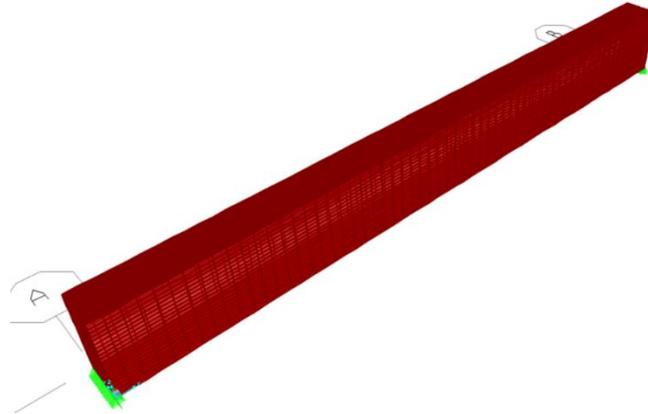
3.1 Geometria e Propriedades do Modelo

A geometria do modelo trata-se de vigas do tipo bi apoiada, com vão teórico de 3,6 m e seção transversal de 20 cm de largura por 40 cm de altura. Serão três modelos de vigas, o modelo 1 é uma viga contínua sem aberturas na seção transversal, esta servirá de referência para análise dos outros modelos. O modelo 2, apresenta uma abertura (20 x 40 cm) no momento máximo, ou seja, no centro da viga. O modelo 3, apresenta uma abertura de 40 cm de comprimento por 20 cm de altura para passagem de tubos, distante 1,5 h do apoio, visto que a norma NBR 6118:2014 orienta a distância mínima de 2h, e o propósito do trabalho é a verificação em situações não favoráveis.

Para criação da malha foi considerado a viga como um elemento sólido baseado na formulação isoparamétrica com esquema de integração numérica de $2 \times 2 \times 2$. A discretização da malha é um fator importante para obtenção dos resultados com precisão. No caso deste programa a divisão dos elementos na modelagem é através de quadrados e triângulos, sendo comumente utilizado, a discretização por áreas quadradas para estruturas simples. Sendo assim, para agilizar a obtenção dos resultados, foi optado por aberturas retangulares, invés de círculos.

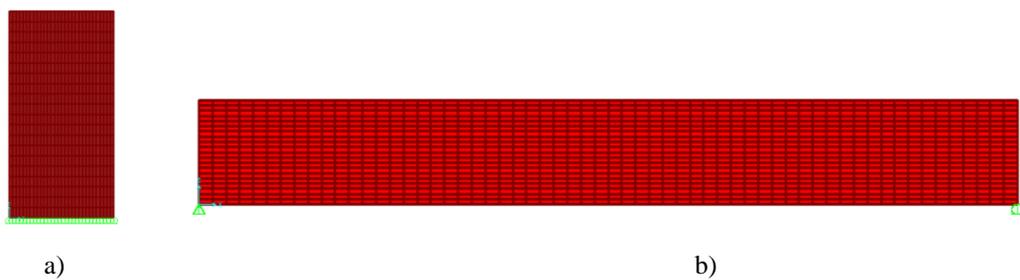
A Figura 22 exhibe as geometrias 3D das vigas relatadas anteriormente. A Figura 22.1 traz o modelo de viga contínua, evidenciando as vistas da seção transversal e longitudinal, em seguida, a Figura 22.2 e Figura 22.3, respectivamente, mostram a representação da viga com abertura próximo ao apoio e com abertura no centro.

Figura 22 – Geometria 3D da viga.



Fonte: Autora.

Figura 22.1 – Viga contínua: vista transversal (a) e vista longitudinal (b).



Fonte: Autora.

Figura 22.2 – Viga com abertura próximo ao apoio.



Fonte: Autora.

Figura 22.3 – Viga com abertura no centro.



Fonte: Autora.

Após discretização da viga é necessário definir as propriedades dos materiais que compoem o elemento estrutural, concreto e aço. Para o concreto, foram consideradas as

propriedades apresentadas na janela a seguir (Figura 23). Será considerado o concreto com resistência a compressão de $f_{ck} = 20\text{Mpa}$ e peso específico de 24 kN/m^3 , módulo de elasticidade de 21 GPa, coeficiente de Poisson do material igual a 0,2 e de dilatação térmica de 1×10^{-5} .

Figura 23 – Propriedades do material concreto.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a concrete material named 'C20'. The 'General Data' section includes the material name 'C20' and type 'Concrete'. The 'Weight and Mass' section shows a weight per unit volume of 24 and a mass per unit volume of 2.4473, with units set to 'KN, m, C'. The 'Isotropic Property Data' section lists a modulus of elasticity of 21000000, a Poisson's ratio of 0.2, a coefficient of thermal expansion of 1.000E-05, and a shear modulus of 8750000. The 'Other Properties for Concrete Materials' section shows a specified and expected concrete compressive strength of 20000, with a checkbox for 'Lightweight Concrete' which is unchecked.

Fonte: SAP 2000 (2019).

O elemento de barra (Rebar) utilizado foi o aço CA-50, o módulo de elasticidade de 210 GPa, peso específico de $78,5\text{ kN/m}^3$, as tensões de ruptura e escoamento, respectivamente, 550 MPa e 500 MPa. Como algumas grandezas não tinham relevância na análise, foram considerados os valores dados pelo programa. A Figura 24 mostra a janela de definição do aço.

Figura 24 – Propriedades do material aço.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a rebar material named 'Rebar CA-50'. The 'General Data' section includes the material name 'Rebar CA-50' and type 'Rebar'. The 'Weight and Mass' section shows a weight per unit volume of 78.5 and a mass per unit volume of 8.0048, with units set to 'KN, m, C'. The 'Uniaxial Property Data' section lists a modulus of elasticity of 2.100E+08, a Poisson's ratio of 0, a coefficient of thermal expansion of 1.170E-05, and a shear modulus of 0. The 'Other Properties for Rebar Materials' section shows a minimum yield stress of 500000, a minimum tensile stress of 550000, an expected yield stress of 500000, and an expected tensile stress of 550000.

Fonte: SAP 2000 (2019).

3.2 Carregamento

Para a viga bi apoiada em estudo, optou-se por carregamento distribuído uniformemente. A aplicação das cargas no SAP 2000 é feita através do comando *Assing/Area load*, posteriormente, seleciona o elemento e com o comando *Uniform* adiciona o valor na direção da gravidade. Contudo, antes é necessário determinar a carga aplicada.

Considerando uma viga de seção transversal 20 x 40 cm e que sobre ela existe uma parede de blocos furados ($\gamma_p = 13 \text{ kN/m}^3$; $e = 0,12 \text{ m}$; $h = 2,70 \text{ m}$) apoiada em sua extensão, e admitindo que a viga recebe a carga de uma laje com intensidade de 22 kN/m . A carga total recebida pela viga é:

- Peso próprio: $g_{pp} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,20 \text{ m} \times 0,40 \text{ m} = 2 \text{ kN/m}$;
- Parede: $g_p = 13 \text{ kN/m}^3 \times 0,12 \text{ m} \times 2,70 \text{ m} = 4,212 \text{ kN/m}$;
- Laje: $g_L = 22 \text{ kN/m}$
- Carga total da viga: $q = 2 + 4,212 + 22 = 28,212 \text{ kN/m}$.

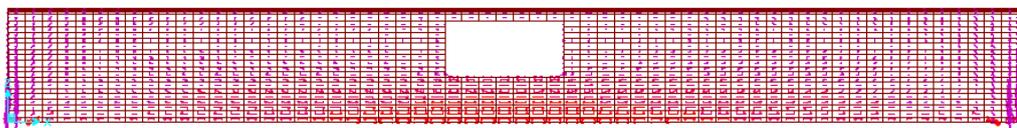
3.3 Procedimentos e Análise dos Dados

Primeiramente são definidas a geometria e parâmetros das vigas, e então é realizada a análise dos elementos estruturais estudados através do software SAP 2000, considerando o carregamento encontrado para obtenção dos esforços. Para tal, é fornecido ao programa o tipo de análise, para assim definir os graus de liberdade. Como resposta o programa mostrará a deformada da viga, tensões normais, cisalhantes e principais.

Os modelos de bielas e tirantes terão como base os mesmos parâmetros geométricos da viga analisada através do programa (SAP 2000). A seguir nas Figuras 25 e 26 serão apresentadas as tensões principais para as vigas em questão, calculados pelo programa, que servirá como apoio para definir a geometria da treliça.

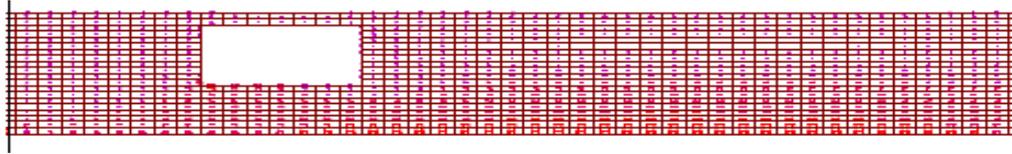
Como o objetivo deste trabalho é análise de aberturas em vigas, os resultados abordados a seguir se restringirão apenas aos casos com furos, excluindo assim a viga contínua.

Figura 25 – Fluxos de carga na viga com abertura no momento máximo.



Fonte: Autora.

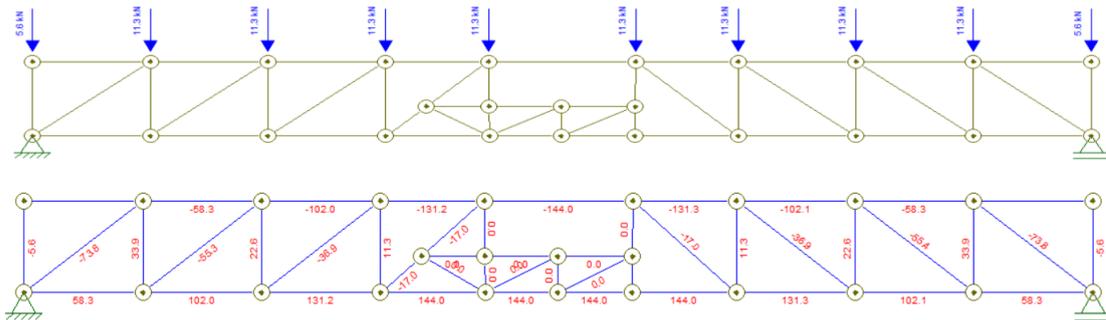
Figura 26 – Fluxos de carga na viga com abertura próximo ao cortante.



Fonte: Autora.

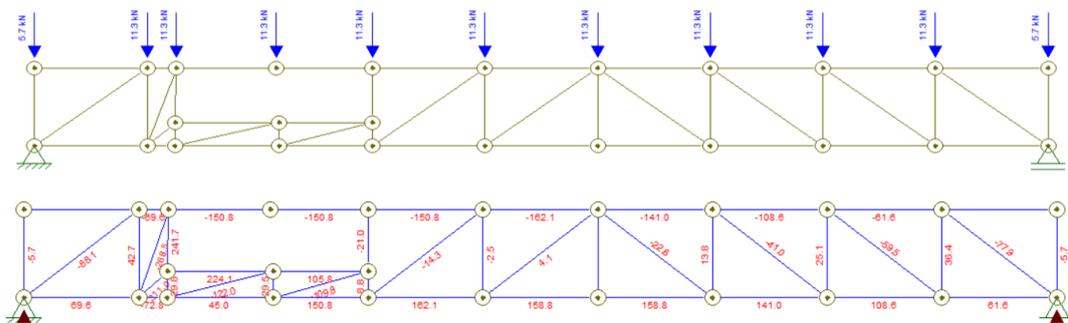
Com o caminho das tensões foi idealizado o modelo das bielas e dos tirantes e seus respectivos esforços em cada uma das vigas. Para determinar as cargas nas barras da treliça que compõe o modelo analisado, primeiramente foi transformado a carga distribuída para cargas pontuais e inseridos no software FTOOL, de modo que a treliça foi desenhada conforme o traçado das tensões do modelo de bielas e tirantes. As Figuras 27 e 28 ilustram o que foi dito anteriormente.

Figura 27 – Modelo de bielas e tirantes/solicitações para viga abertura no momento máximo.



Fonte: Autora.

Figura 28 – Modelo de bielas e tirantes/solicitações para viga abertura próximo ao cortante.



Fonte: Autora.

Para a verificação das bielas e tirantes tomará como base os valores negativos referentes a compressão e os positivos a tração. Ressaltando que o ângulo das bielas para modelagem da treliça considerado foi $\theta = 45^\circ$. No APÊNDICE A está o detalhamento de cálculo de um modelo de viga, visto que a outra segue o mesmo procedimento

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão obtidas as análises comparativas dos resultados, onde permitiu a visualização dos valores das tensões de compressão máximas de acordo com as descrições feitas no item anterior, bem como a deformada da viga. Sabendo do caráter comparativo desta pesquisa, primeiramente foi avaliado o desempenho da viga de alma cheia em relação às outras vigas. Para otimizar os resultados aqui apresentados, as tabelas das tensões estarão presentes nos apêndices.

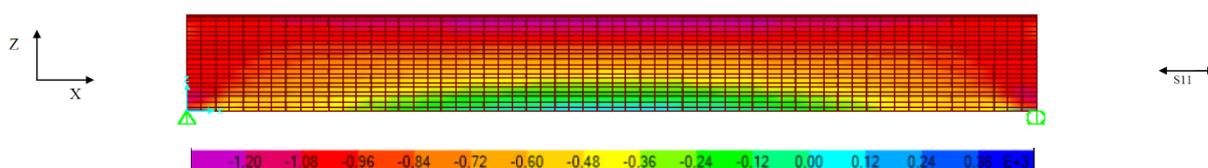
4.1 Análise Comparativa entre a Viga de Alma Cheia e a Viga com Abertura no Momento Máximo

Como referência para os estudos foram coletados os valores da viga de alma cheia, sem presença de descontinuidade. A partir das tabelas retiradas do programa (APÊNDICE B) possibilitou encontrar a maior tensão de compressão a qual a viga foi submetida, foram observados que a região central da viga contínua (Figura 29) a tensão máxima de compressão encontrada foi de 1259,18 kN/m², em módulo. Quando avaliado os maiores valores de tensões de compressão para a viga com furo no momento máximo, em módulo, resultou 1260,9 kN/m², e localizaram-se nas proximidades da abertura (Figura 30).

A Figura 30 mostra as tensões normais na direção X para o modelo 1 estudado e logo abaixo na Figura 31 é apresentado o modelo 2, para visualizar o comparativo entre ambas. A partir da análise visual é perceptível verificar que no modelo 2, onde há presença da abertura as regiões laterais e bordas ficaram avermelhadas, o que caracteriza compressões máximas, e a face inferior por estar próxima à região tracionada, os valores de compressão são mínimos.

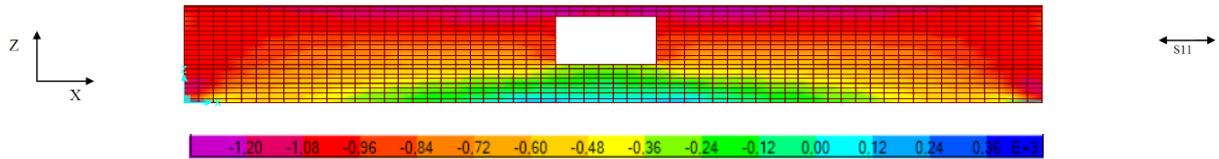
Observando a Figura 29, existe uma faixa que tem cor característica laranja no centro do vão, quando visualizado a Figura 30, esta faixa foi suprimida pela abertura, prevalecendo o tom vermelho. Vale ressaltar, que o programa associa as cores quentes (vermelho/laranja) como regiões de tensões comprimidas, e cores frias (azul/verde) à tração.

Figura 29 – Tensões (S11) na viga de modelo 1.



Fonte: Autora.

Figura 30 – Tensões (S11) na viga de modelo 2.

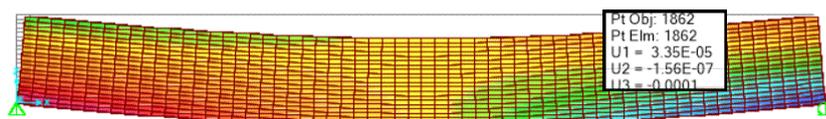


Fonte: Autora.

4.1.1 Deformada

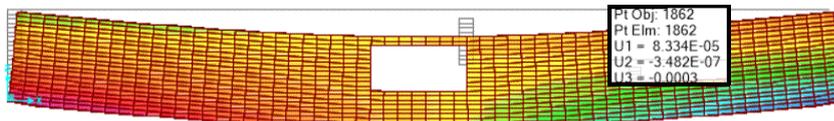
Outro critério muito importante para avaliação do comportamento estrutural é o estudo dos deslocamentos da viga quando submetida a carregamento, sendo necessário a verificação em serviço do estado-limite. Para tal, a Figura 31 e 32 apresenta o resultado do programa para o deslocamento vertical (U3) tomando como referência o topo no centro da viga, respectivamente, da viga contínua (modelo 1) e com abertura (modelo 2).

Figura 31 – Deformação na viga de modelo 1.



Fonte: Autora.

Figura 32 – Deformação na viga de modelo 2.



Fonte: Autora.

Como resultado da verificação do modelo 1 e 2 obtiveram deslocamentos distintos, respectivamente, $U_3 = 0,1$ mm e $U_3 = 0,3$ mm. Quando calculado o deslocamento imediato total admissível (ANEXO A) em uma viga, de acordo com a norma, o valor não pode exceder a relação do vão teórico da viga, dividido por 250, ou $l/250$. Para o vão de 360 cm, encontrou-se o resultado de 14,4 mm, portanto, não ultrapassou o valor da flecha imediata total.

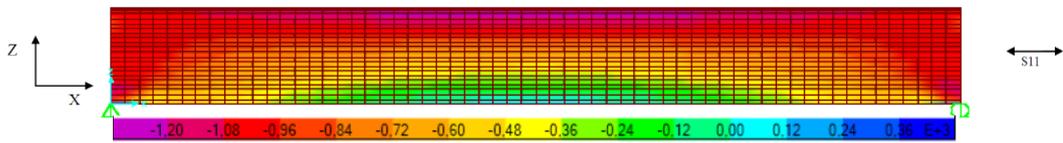
4.2 Análise Comparativa entre a Viga de Alma Cheia e a Viga com Abertura Próximo ao Apoio

Analogamente ao item anterior, a abertura foi posicionada próximo ao apoio e foram feitas as análises comparativas entre as vigas, obtendo as tabelas extraídas do programa (APÊNDICE C), destas tabelas possibilitou encontrar as tensões de compressão a qual a viga

foi submetida. Anteriormente, foi verificado para a viga contínua que a tensão encontrada próximo ao apoio, em módulo, fica na faixa de 1022,21 kN/m². Quando avaliado os valores de tensões de compressão na mesma região sendo com furo, em módulo, ficaram entre 1194 e 1269,04 kN/m², e localizaram-se nas proximidades da abertura, havendo um aumento considerado das tensões máximas de compressão.

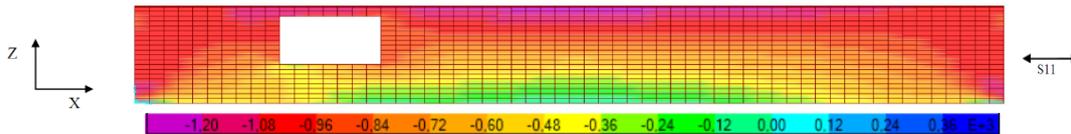
A Figura 33 mostra as tensões normais na direção X para o modelo 1 de viga estudado e logo abaixo na Figura 34 é apresentado o modelo 3, para visualizar o comparativo entre ambas. Seguindo o mesmo raciocínio do “item” 4.1, o modelo 3, onde há presença da abertura as regiões laterais encontram-se envoltas apenas de tensões de compressão.

Figura 33 – Tensões (S11) na viga de modelo 1.



Fonte: Autora.

Figura 34 – Tensões (S11) na viga de modelo 3.

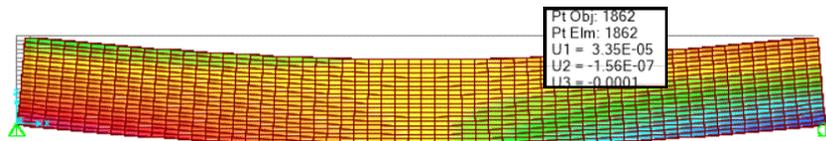


Fonte: Autora.

4.2.1 Deformada

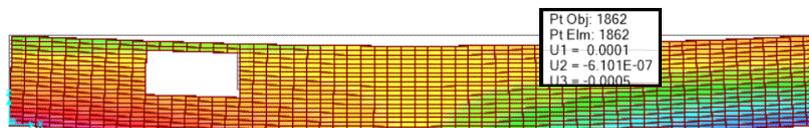
Analogamente ao item 4.1.1, as Figuras 35 e 36 apresentam o deslocamento vertical (U3), respectivamente, da viga contínua (modelo 1) e com abertura (modelo 3). Quando comparado o modelo 3 apresentou deslocamento de $U3 = 0,5$ mm, o que representa uma diferença de 4 mm a mais. Se comparado com o deslocamento admissível exigido segundo norma, o valor apresenta variação de 13,9 mm de diferença, sendo assim, não ultrapassou o valor limite.

Figura 35 – Deformação na viga de modelo 1.



Fonte: Autora.

Figura 36 – Deformação na viga de modelo 3.



Fonte: Autora.

4.3 Quadro Comparativo para as Tensões de Compressão e Deslocamento

Nesta seção foi elaborado quadros comparativos para melhor visualização dos resultados encontrados para cada caso abordado anteriormente. O Quadro 5, 6 e 7, traz a relação entre a viga contínua, viga com abertura no momento máximo e no cortante. A partir deles é possível prever que o pior caso é o da viga com abertura no cortante máximo, o outro caso mostrou sofrer alterações irrelevantes nos valores das tensões, porém, as posições das aberturas interferem na localização das tensões.

Quadro 5 – Viga contínua X Viga com abertura no momento máximo.

	Viga Contínua	Viga Furo Momento Máximo	Varição Δ (%)
Tensão (kN/m ²)	1259,18	1260,9	-0,14

Fonte: Autora.

Quadro 6 – Viga contínua X Viga com abertura no cortante.

	Viga Contínua	Viga Cortante	Varição Δ (%)
Tensão (kN/m ²)	1022,21	1269,04	-19,45

Fonte: Autora.

Quadro 7 – Viga com abertura no cortante X Viga com abertura no momento máximo.

	Viga Furo Cortante	Viga Abertura Momento Máximo	Varição Δ (%)
Tensão (kN/m ²)	1269,04	1260,9	0,64

Fonte: Autora.

Os Quadros 8, 9 a seguir representaram as variações discrepantes referentes aos deslocamentos extraídos do programa SAP 2000.

Quadro 8 – Viga contínua X Viga com abertura no momento máximo.

	Viga Contínua	Viga Abertura Momento Máximo	Varição Δ (%)
Deslocamento (mm)	-0,1	-0,3	200

Fonte: Autora.

Quadro 9 – Viga contínua X Viga com abertura no cortante.

	Viga Contínua	Viga Abertura Cortante	Varição Δ (%)
Deslocamento (mm)	-0,1	-0,5	400

Fonte: Autora.

A seguir os Quadros 10 e 11, permitem verificar as variações discrepantes quanto ao limite de deslocamento admissível e os encontrados pelo programa quando a viga é submetida a aberturas.

Quadro 10 – NBR 6118 X Viga com abertura no cortante.

	Norma NBR 6118	Viga Abertura Momento Máximo	Varição Δ (%)
Deslocamento (mm)	14,4	-0,3	97,92

Fonte: Autora.

Quadro 11 – NBR 6118 X Viga com aberturas no cortante.

	Norma NBR 6118	Viga Abertura Cortante	Varição Δ (%)
Deslocamento (mm)	14,4	-0,5	96,52

Fonte: Autora.

4.4 Verificação pelo Método de Bielas e Tirantes

Para obter os valores de referência para verificação das tensões de compressão nas bielas é preciso definir alguns parâmetros que a NRB 6118:2014 traz. Desta forma, considerando o $f_{ck} = 20$ MPa para o concreto, obtêm-se as verificações para f_{cd1} , f_{cd2} e f_{cd3} .

$$- \alpha_{v2} = 1 - f_{ck}/250 = 0,92 \text{ MPa}$$

$$- f_{cd1} = 0,85 \alpha_{v2} f_{cd} = 11171,43 \text{ kN/m}^2$$

$$- f_{cd2} = 0,6 \alpha_{v2} f_{cd} = 7885,7 \text{ kN/m}^2$$

$$- f_{cd3} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd} = 9462,85 \text{ kN/m}^2$$

A treliça foi analisada conforme os trechos mais solicitados, ou seja, para análise foi escolhido o maior valor de compressão da região. Para a viga com abertura no centro a maior

carga axial de compressão foi $V_K = 144 \text{ kN}$ na biela do banzo comprimido, sendo assim considerando a dimensão da biela (0,20 x 0,10 m):

$$\sigma_c = \frac{1,4 V_K}{b h'} = 10080 \text{ kN/m}^2 \leq f_{cd1} \text{ OK!}$$

Analogamente, para a análise da abertura próximo ao cortante, a maior carga axial de compressão máxima $V_K = 150.8 \text{ kN}$, sendo assim considerando a dimensão da biela (0,20 x 0,10 m):

$$\sigma_c = \frac{V_K}{b h'} = 10556 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \leq f_{cd1} \text{ OK!}$$

A seguir o Quadro 12 permite verificar as variações quanto às tensões encontradas pelo programa SAP 2000 contra Método de Bielas e Tirantes quando a viga é submetida a aberturas.

Quadro 12 – SAP 2000 X Bielas e Tirantes.

	SAP 2000	BIELAS E TIRANTES	Variação Δ (%)
Viga Abertura Momento Máximo Tensão (kN/m²)	1260,9 ¹	10080	694,3
Viga Abertura Cortante Tensão (kN/m²)	1269,04 ¹	10556	737,2

Fonte: Autora.

¹ Lembrando que esta tensão foi encontrada para uma área discretizada de 0,04 x 0,02 m, logo explica o porquê da diferença tão discrepante, se pegarmos essa área e diminuir ainda mais para ter um resultado mais preciso ao real, por exemplo, dividir por 10, a tensão para a viga com abertura no momento máximo é de 12609 kN/m², muito próxima ao encontrado por bielas e tirantes. Analogamente, para a outra viga a tensão seria de 12690,4 kN/m².

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados mostrou-se satisfatória quando comparada a idealização do Modelo de Biela e Tirante em uma treliça plana com o modelo tridimensional de uma viga com furos em posições distintas, através da modelagem no software comercial SAP 2000, sendo este um método mais sofisticado e refinado. Observou-se também que o software é uma importante ferramenta, quando aliada ao Método de Bielas e Tirantes, pois ele já determina os caminhos das tensões no elemento estrutural, principalmente quando se tem abertura.

O cálculo manual possui algumas limitações e é baseado em arranjos estruturais que não representam o comportamento real da estrutura, o que acaba tornando a sua utilização limitada. Apesar da análise simplificada do método de bielas e tirantes, este pode ser utilizado com segurança por proporcionar boa representação da estrutura das peças, entretanto, o método mais recomendado é o software computacional, pois, ele melhor simula o comportamento real das estruturas.

Os resultados obtidos manualmente permitem perceber que, de modo geral, as bielas localizadas nas vigas com abertura mais próxima aos apoios obtiveram valores maiores para a relação entre a tensão atuante e a tensão limite que aquela com abertura posicionada mais próxima ao centro do vão. Quanto ao SAP, não muito diferente, as tensões próximas à abertura nos apoios, apresentam valores mais relevantes quanto a abertura no centro da viga. Portanto, através do estudo é preferível optar por posicionar aberturas nas proximidades da região central e inferior do elemento.

Quanto aos deslocamentos, que visam proporcionar um adequado comportamento da estrutura em serviço, quando verificado as situações em relação à deformação nenhum ultrapassaram o limite admissível.

Como sugestão para edições futuras deste trabalho, tem-se a análise comparativa a partir do método experimental e outros softwares computacionais, com o objetivo de se observar as análises e critérios adotados entre eles, além de verificar as possíveis discrepâncias encontradas pelos métodos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). **NBR 15200/12 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro - RJ. 48p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). **NBR 6118/14 – Projetos de estruturas de concreto armado - procedimento**. Rio de Janeiro - RJ. 238p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). **NBR 5738/15 – Concreto – procedimento na moldagem e cura de corpo de prova**. Rio de Janeiro - RJ. 9p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). **NBR 5739/18 – Concreto – ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico**. Rio de Janeiro - RJ. 4p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). **NBR 12142/10 – Concreto – determinação da resistência a tração na flexão em corpo de prova prismático**. Rio de Janeiro - RJ. 5p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). **NBR ISO 6892-1/18 – Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro - RJ. 70p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). **NBR 7222/11 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro - RJ. 5p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). **NBR 15421/06 – Projeto de estrutura resistente a sismo - procedimento**. Rio de Janeiro - RJ. 26p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). **NBR 14931/06 – Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ. 53p.

ADÃO, F. X; HEMERLY A. CH. **Concreto armado : novo milênio: cálculo prático e econômico**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 205 p. ISBN 85-7193-058-9

AGUIAR, C. C. P. (2018). **Dimensionamento de estruturas especiais de concreto armado pelo método de bielas e tirantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2171.pdf>>. Acesso em: Novembro de 2018.

AGUSTINHO, S. R. (2009). **Análise da influência de furos horizontais em vigas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia, Universidade Do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/2593779-Analise-da-influencia-de-furos-horizontais-em-vigas-de-concreto-armado.html>>. Acesso em: Agosto de 2018.

AMÉRICO, C. F. (1996). **Detalhamento das estruturas de concreto pelo método das bielas e dos tirantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia,

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em:
<<https://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/topicos/bielas.pdf>>. Acesso em: Fevereiro de 2019.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1ª edição, 2003.

BARBOSA, M. D. A. (2010). **Análise de flechas em vigas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza. Disponível em:
<http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2010/Marcelo_Barbosa_Analise%20de%20Flechas%20em%20Vigas%20de%20Concreto%20Armado.pdf>. Acesso em: Setembro de 2018.

BASTOS, P. S. S. (2017). **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Notas de Aula – Departamento de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru – SP. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf>>. Acesso em: Setembro de 2018.

BASTOS, P. S. S. (2015). **Flexão Normal Simples – Vigas**. Notas de Aula – Departamento de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru/SP. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>>. Acesso em: Agosto de 2018.

BASTOS, P. S. S. (2006). **Fundamentos do Concreto Armado**. Notas de Aula – Departamento de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru/SP. Disponível em:
<<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>>. Acesso em: Julho de 2018.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado, eu te amo**. v. 1. 7. ed. rev. ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado – segundo a NBR6118 2014**. 4ª ed. EDUFSCAR. São Carlos – SP. 2016.

COSTA, D. B. (2013). **Análise de furos em vigas de concreto armado pelo modelo de bielas e tirantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em:
<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2147/1/CT_EPC_2013_1_19.pdf>. Acesso em: Novembro de 2018.

FUSCO, P. B. (2003) **Técnicas de Armar as Estruturas de Concreto**. 1ª Edição. Editora Pini – São Paulo/SP.

GIUGLIANI, E. (2007). **Aberturas em elementos estruturais de concreto**. Notas de Aula – Departamento de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em:
<http://www.politecnica.pucrs.br/professores/giugliani/ENGENHARIA_CIVIL_-_Concreto_Armado_III/03_Aberturas_em_Elementos_Estruturais.pdf>. Acesso em: Setembro de 2018.

KAUFMANN, B. (2016). **Verificação de vigas de concreto armado com aberturas na alma**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia, Centro Universitário Univates. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1267/1/2016BrunaKaufmann.pdf>>. Acesso em: Agosto de 2018.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. (1978b). **Construções de concreto - volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro, Editora Interciência.

MELO, C. E. L. (2016). **Análise estrutural com sap 2000**. Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Tecnologia – TEC Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB, Ribeirão Preto, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309851471_Analise_Estrutural_com_o_SAP_2000>. Acesso em: Fevereiro de 2019.

PINHEIRO, L. M. (2007) **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Notas de Aula. São Carlos: USP, 2007. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf>. Acesso em: Julho de 2018.

PINHEIRO, L. M. (2004) **Estruturas De Concreto – Capítulo 2**. Notas de Aula. São Carlos: USP, 2004. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf>. Acesso em: Julho de 2018.

SANTOS, A. A. de B; NETO, G.C.S. (2015). **Modelagem computacional de uma viga com abertura na alma utilizando o SAP 2000**. Apostila. Disponível em: <https://docgo.net/viewdoc.html?utm_source=exemplo-sap-2000-modelagem-computacional-de-uma-viga-com-abertura-na-alma-utilizando-o-sap-2000>. Acesso em: Agosto de 2018.

SILVA, M. C. de B. (2010). **Estrutura de Concreto Armado**. Apostila. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAABsZgAH/apostila-sobre-concreto-armado>>. Acesso em: Agosto de 2018.

SILVA, R. C., GIONGO, J. S., 2000. **Modelos de bielas e tirantes aplicados a estruturas de concreto armado**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

APÊNDICE A – Cálculos Realizados para o Dimensionamento Manual

DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES

Como forma de ilustração dos cálculos realizados através do método analítico para a viga com abertura no momento máximo, segue abaixo todo o roteiro para o dimensionamento:

- **Propriedades Gerais**

O modelo constitui uma viga de concreto armado bi apoiada, com carregamento distribuído. A seção transversal é retangular de 20 cm x 40 cm.

Dados:

$$b_w = 20 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$\text{Vão} = 360 \text{ cm} = 3,6 \text{ m}$$

$$C 20 \rightarrow f_{ck} = 20 \text{ MPa}$$

CA-50

- **Momento e Cortante**

$$M_K = q l^2 / 8 = 28,212 \times 3,6^2 / 8 = 45,70 \text{ kNm}$$

$$M_d = 1,4 \times 45,70 = 63,98 \text{ kNm}$$

$$V_K = 0$$

- **Determinação de k_c , k_s e A_s**

$$k_c = b d^2 / M_d = 20 \times 36^2 / 6398 \cong 4,1 \text{ cm}^2 / \text{kN}$$

Considerando 2 \emptyset 10 mm e 2 \emptyset 6,3 mm

$$d = 40 - 3 - 0,63 - 0,5 \cong 36 \text{ cm}$$

Calculo da linha neutra

$$\beta_x = 0,28 \quad (\text{Tabela, Anexo B})$$

$$\beta_x = x / d$$

$$x = 0,28 \times 36 = 10 \text{ cm}$$

$$k_s = 0,026, \text{ o que caracteriza o domínio 3. (Anexo B)}$$

Calculando a nova área:

$$A_s = k_s M_d / d = 0,026 \times 6398 / 36 = 4,62 \text{ cm}^2$$

- **Verificações da Resistência das Regiões Comprimidas**

$$\alpha_{V2} = 1 - f_{ck}/250 = 1 - 20/250 = 0,92 \text{ MPa}$$

$$f_{cd1} = 0,85 \alpha_{V2} f_{cd} = 0,85 \times 0,92 \times \left(\frac{20000}{1,4}\right) = 11171,43 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cd2} = 0,6 \alpha_{V2} f_{cd} = 0,6 \times 0,92 \times \left(\frac{20000}{1,4}\right) = 7885,7 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cd3} = 0,72 \alpha_{V2} f_{cd} = 0,72 \times 0,92 \times \left(\frac{20000}{1,4}\right) = 9462,85 \text{ kN/m}^2$$

- **Área dos Tirantes e Tensão da Biela**

Para efeito de cálculo, as análises serão feitas para o banzo mais tracionado e para o banzo mais comprimido da região do furo. Segundo a Figura 26 da metodologia o banzo mais tracionado equivale $V_k = 144 \text{ kN}$:

$$A_s = 1,4 V_k / f_{yd} = 1,4 \times 144 / 43,5 = 4,63 \text{ cm}^2 \rightarrow 3\emptyset 12,5 \text{ mm}$$

Diagonal mais tracionada, o valor de $V_k = 17 \text{ kN}$:

$$A_s = 1,4 V_k / f_{yd} = 1,4 \times 17 / 43,5 = 0,54 \text{ cm}^2 \rightarrow 2\emptyset 6,3 \text{ mm}$$

Tensão na biela no banzo mais comprimido, o valor de $V_k = 144 \text{ kN}$, sendo as dimensões da adotadas para bielas ($h'=10 \text{ cm}$ x $b=20 \text{ cm}$):

$$\sigma_c = 1,4 V_k / b h' = 1,4 \times 144 / 0,2 \times 0,1 = 10080 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_c = 10080 \text{ kN/m}^2 \leq f_{cd1} \text{ OK!}$$

APÊNDICE B – Tabelas com os Esforços Obtidos pelo SAP 2000

Tabela 1 – Esforços S11 obtidos na região central da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
j	29	Shell-Thin	59	COMB1	Combination	-1248,27	-0,1	1,39
29	29	Shell-Thin	58	COMB1	Combination	-1248,27	-0,23	1,3
29	29	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1252,74	0,24	1,06
29	29	Shell-Thin	61	COMB1	Combination	-1252,74	0,37	1,15
30	30	Shell-Thin	61	COMB1	Combination	-1254,65	-0,008581	0,89
30	30	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1254,64	-0,14	0,83
30	30	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1257,33	0,15	0,59
30	30	Shell-Thin	63	COMB1	Combination	-1257,33	0,28	0,64
31	31	Shell-Thin	63	COMB1	Combination	-1258,29	0,08666	0,38
31	31	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,28	-0,04282	0,36
31	31	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1259,17	0,05246	0,11
31	31	Shell-Thin	65	COMB1	Combination	-1259,18	0,18	0,13
32	32	Shell-Thin	65	COMB1	Combination	-1259,18	0,18	-0,13
32	32	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1259,17	0,05246	-0,11
32	32	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1258,28	-0,04282	-0,36
32	32	Shell-Thin	67	COMB1	Combination	-1258,29	0,08665	-0,38
33	33	Shell-Thin	67	COMB1	Combination	-1257,33	0,28	-0,64
33	33	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1257,33	0,15	-0,59
33	33	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1254,64	-0,14	-0,83
33	33	Shell-Thin	69	COMB1	Combination	-1254,65	-0,008581	-0,89
34	34	Shell-Thin	69	COMB1	Combination	-1252,74	0,37	-1,15
34	34	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1252,74	0,24	-1,06
34	34	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1248,27	-0,23	-1,3
34	34	Shell-Thin	71	COMB1	Combination	-1248,27	-0,1	-1,39
90	90	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1254,63	-0,08137	0,8
90	90	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1254,63	-0,21	0,8
90	90	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,31	0,07298	0,57
90	90	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1257,32	0,2	0,57
91	91	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,27	0,01381	0,34
91	91	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1258,26	-0,12	0,34
91	91	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1259,16	-0,02241	0,11
91	91	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1259,16	0,11	0,11
92	92	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1259,16	0,11	-0,11
92	92	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1259,16	-0,02241	-0,11
92	92	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1258,26	-0,12	-0,34
92	92	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1258,27	0,01381	-0,34
93	93	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1257,32	0,2	-0,57
93	93	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,31	0,07298	-0,57
93	93	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1254,63	-0,21	-0,8
93	93	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1254,63	-0,08137	-0,8
94	94	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1252,73	0,3	-1,03
94	94	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1252,72	0,17	-1,03
94	94	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1248,25	-0,31	-1,26
94	94	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1248,26	-0,18	-1,26
150	150	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1254,61	-0,14	0,76
150	150	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1254,61	-0,27	0,72
150	150	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,29	0,0145	0,51
150	150	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,3	0,14	0,55
151	151	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1258,25	-0,04948	0,33
151	151	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1258,25	-0,18	0,31
151	151	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1259,14	-0,08091	0,1
151	151	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1259,14	0,04576	0,11
152	152	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1259,14	0,04576	-0,11
152	152	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1259,14	-0,08091	-0,1
152	152	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1258,25	-0,18	-0,31
152	152	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1258,25	-0,04948	-0,33
153	153	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,3	0,14	-0,55
153	153	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,29	0,0145	-0,51
153	153	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1254,61	-0,27	-0,72
153	153	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1254,61	-0,14	-0,76
154	154	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1252,71	0,24	-0,99
154	154	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1252,7	0,11	-0,92
154	154	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1248,24	-0,37	-1,14
154	154	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1248,24	-0,24	-1,2
210	210	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1254,6	-0,21	0,69
210	210	Shell-Thin	275	COMB1	Combination	-1254,6	-0,33	0,68
210	210	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1257,28	-0,04385	0,48
210	210	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,28	0,07585	0,5
211	211	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1258,23	-0,11	0,3
211	211	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1258,23	-0,23	0,29
211	211	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1259,13	-0,14	0,0953

Fonte: Autora.

Tabela 1 – Esforços S11 obtidos na região central da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
212	212	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1259,13	-0,14	-0,0953
212	212	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1258,23	-0,23	-0,29
212	212	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1258,23	-0,11	-0,3
213	213	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,28	0,07585	-0,5
213	213	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1257,28	-0,04385	-0,48
213	213	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1254,6	-0,33	-0,68
213	213	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1254,6	-0,21	-0,69
214	214	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1252,69	0,17	-0,89
214	214	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1252,69	0,05184	-0,87
214	214	Shell-Thin	280	COMB1	Combination	-1248,22	-0,42	-1,07
214	214	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1248,22	-0,3	-1,09
269	269	Shell-Thin	274	COMB1	Combination	-1248,21	-0,37	1,01
269	269	Shell-Thin	335	COMB1	Combination	-1248,21	-0,48	0,96
269	269	Shell-Thin	336	COMB1	Combination	-1252,68	-0,004736	0,78
269	269	Shell-Thin	275	COMB1	Combination	-1252,68	0,11	0,83
270	270	Shell-Thin	275	COMB1	Combination	-1254,59	-0,27	0,64
270	270	Shell-Thin	336	COMB1	Combination	-1254,58	-0,39	0,61
270	270	Shell-Thin	337	COMB1	Combination	-1257,27	-0,1	0,43
270	270	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1257,27	0,0109	0,46
271	271	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1258,22	-0,18	0,27
271	271	Shell-Thin	337	COMB1	Combination	-1258,22	-0,29	0,26
271	271	Shell-Thin	338	COMB1	Combination	-1259,11	-0,2	0,08435
271	271	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1259,12	-0,08455	0,09529
272	272	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1259,12	-0,08455	-0,0953
272	272	Shell-Thin	338	COMB1	Combination	-1259,11	-0,2	-0,08435
272	272	Shell-Thin	339	COMB1	Combination	-1258,22	-0,29	-0,26
272	272	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1258,22	-0,18	-0,27
273	273	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1257,27	0,01089	-0,46
273	273	Shell-Thin	339	COMB1	Combination	-1257,27	-0,1	-0,43
273	273	Shell-Thin	340	COMB1	Combination	-1254,58	-0,39	-0,61
273	273	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1254,59	-0,27	-0,64
274	274	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1252,68	0,11	-0,83
274	274	Shell-Thin	340	COMB1	Combination	-1252,68	-0,004735	-0,78
274	274	Shell-Thin	341	COMB1	Combination	-1248,21	-0,48	-0,96
274	274	Shell-Thin	280	COMB1	Combination	-1248,21	-0,37	-1,01
330	330	Shell-Thin	336	COMB1	Combination	-1254,57	-0,34	0,58
330	330	Shell-Thin	397	COMB1	Combination	-1254,57	-0,44	0,56
330	330	Shell-Thin	398	COMB1	Combination	-1257,25	-0,15	0,4
330	330	Shell-Thin	337	COMB1	Combination	-1257,26	-0,05244	0,42
333	333	Shell-Thin	339	COMB1	Combination	-1257,26	-0,05244	-0,42
333	333	Shell-Thin	400	COMB1	Combination	-1257,25	-0,15	-0,4
333	333	Shell-Thin	401	COMB1	Combination	-1254,57	-0,44	-0,56
333	333	Shell-Thin	340	COMB1	Combination	-1254,57	-0,34	-0,58
334	334	Shell-Thin	340	COMB1	Combination	-1252,67	0,04333	-0,75
334	334	Shell-Thin	401	COMB1	Combination	-1252,67	-0,05887	-0,71
334	334	Shell-Thin	402	COMB1	Combination	-1248,2	-0,53	-0,88
334	334	Shell-Thin	341	COMB1	Combination	-1248,2	-0,43	-0,91
390	390	Shell-Thin	397	COMB1	Combination	-1254,56	-0,4	0,52
390	390	Shell-Thin	458	COMB1	Combination	-1254,56	-0,49	0,49
390	390	Shell-Thin	459	COMB1	Combination	-1257,24	-0,21	0,35
390	390	Shell-Thin	398	COMB1	Combination	-1257,25	-0,11	0,38
393	393	Shell-Thin	400	COMB1	Combination	-1257,25	-0,11	-0,38
393	393	Shell-Thin	461	COMB1	Combination	-1257,24	-0,21	-0,35
393	393	Shell-Thin	462	COMB1	Combination	-1254,56	-0,49	-0,49
393	393	Shell-Thin	401	COMB1	Combination	-1254,56	-0,4	-0,52
394	394	Shell-Thin	401	COMB1	Combination	-1252,66	-0,01682	-0,68
394	394	Shell-Thin	462	COMB1	Combination	-1252,66	-0,11	-0,63
394	394	Shell-Thin	463	COMB1	Combination	-1248,19	-0,58	-0,78
394	394	Shell-Thin	402	COMB1	Combination	-1248,19	-0,49	-0,82
451	451	Shell-Thin	459	COMB1	Combination	-1258,19	-0,36	0,2
451	451	Shell-Thin	520	COMB1	Combination	-1258,19	-0,44	0,19
451	451	Shell-Thin	521	COMB1	Combination	-1259,08	-0,35	0,06044
451	451	Shell-Thin	460	COMB1	Combination	-1259,08	-0,26	0,06799
452	452	Shell-Thin	460	COMB1	Combination	-1259,08	-0,26	-0,06799
452	452	Shell-Thin	521	COMB1	Combination	-1259,08	-0,35	-0,06044
452	452	Shell-Thin	522	COMB1	Combination	-1258,19	-0,44	-0,19
452	452	Shell-Thin	461	COMB1	Combination	-1258,19	-0,36	-0,2
453	453	Shell-Thin	461	COMB1	Combination	-1257,24	-0,17	-0,33
453	453	Shell-Thin	522	COMB1	Combination	-1257,24	-0,25	-0,31
453	453	Shell-Thin	523	COMB1	Combination	-1254,55	-0,54	-0,44
453	453	Shell-Thin	462	COMB1	Combination	-1254,55	-0,45	-0,46
454	454	Shell-Thin	462	COMB1	Combination	-1252,65	-0,07293	-0,6
454	454	Shell-Thin	523	COMB1	Combination	-1252,65	-0,16	-0,56
454	454	Shell-Thin	524	COMB1	Combination	-1248,18	-0,63	-0,69

Fonte: Autora.

Tabela 1 – Esforços S11 obtidos na região central da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
454	454	Shell-Thin	463	COMB1	Combination	-1248,18	-0,55	-0,73
511	511	Shell-Thin	520	COMB1	Combination	-1258,18	-0,41	0,17
511	511	Shell-Thin	581	COMB1	Combination	-1258,18	-0,48	0,16
511	511	Shell-Thin	582	COMB1	Combination	-1259,08	-0,39	0,05125
511	511	Shell-Thin	521	COMB1	Combination	-1259,08	-0,32	0,06044
512	512	Shell-Thin	521	COMB1	Combination	-1259,08	-0,32	-0,06044
512	512	Shell-Thin	582	COMB1	Combination	-1259,08	-0,39	-0,05125
512	512	Shell-Thin	583	COMB1	Combination	-1258,18	-0,48	-0,16
512	512	Shell-Thin	522	COMB1	Combination	-1258,18	-0,41	-0,17
513	513	Shell-Thin	522	COMB1	Combination	-1257,23	-0,22	-0,29
513	513	Shell-Thin	583	COMB1	Combination	-1257,23	-0,29	-0,27
513	513	Shell-Thin	584	COMB1	Combination	-1254,55	-0,58	-0,38
513	513	Shell-Thin	523	COMB1	Combination	-1254,55	-0,51	-0,4
514	514	Shell-Thin	523	COMB1	Combination	-1252,64	-0,12	-0,52
514	514	Shell-Thin	584	COMB1	Combination	-1252,64	-0,2	-0,48
514	514	Shell-Thin	585	COMB1	Combination	-1248,17	-0,67	-0,59
514	514	Shell-Thin	524	COMB1	Combination	-1248,17	-0,6	-0,64
569	569	Shell-Thin	579	COMB1	Combination	-1248,16	-0,65	0,54
569	569	Shell-Thin	640	COMB1	Combination	-1248,16	-0,71	0,5
569	569	Shell-Thin	641	COMB1	Combination	-1252,63	-0,23	0,4
569	569	Shell-Thin	580	COMB1	Combination	-1252,63	-0,17	0,45
570	570	Shell-Thin	580	COMB1	Combination	-1254,54	-0,55	0,34
570	570	Shell-Thin	641	COMB1	Combination	-1254,54	-0,61	0,32
570	570	Shell-Thin	642	COMB1	Combination	-1257,22	-0,33	0,22
570	570	Shell-Thin	581	COMB1	Combination	-1257,22	-0,27	0,25
571	571	Shell-Thin	581	COMB1	Combination	-1258,18	-0,46	0,15
571	571	Shell-Thin	642	COMB1	Combination	-1258,17	-0,52	0,14
571	571	Shell-Thin	643	COMB1	Combination	-1259,07	-0,42	0,04317
571	571	Shell-Thin	582	COMB1	Combination	-1259,07	-0,36	0,05125
572	572	Shell-Thin	582	COMB1	Combination	-1259,07	-0,36	-0,05124
572	572	Shell-Thin	643	COMB1	Combination	-1259,07	-0,42	-0,04317
572	572	Shell-Thin	644	COMB1	Combination	-1258,17	-0,52	-0,14
572	572	Shell-Thin	583	COMB1	Combination	-1258,18	-0,46	-0,15
573	573	Shell-Thin	583	COMB1	Combination	-1257,22	-0,27	-0,25
573	573	Shell-Thin	644	COMB1	Combination	-1257,22	-0,33	-0,22
573	573	Shell-Thin	645	COMB1	Combination	-1254,54	-0,61	-0,32
573	573	Shell-Thin	584	COMB1	Combination	-1254,54	-0,55	-0,34
574	574	Shell-Thin	584	COMB1	Combination	-1252,63	-0,17	-0,45
574	574	Shell-Thin	645	COMB1	Combination	-1252,63	-0,23	-0,4
574	574	Shell-Thin	646	COMB1	Combination	-1248,16	-0,71	-0,5
574	574	Shell-Thin	585	COMB1	Combination	-1248,16	-0,65	-0,54
629	629	Shell-Thin	640	COMB1	Combination	-1248,16	-0,68	0,45
629	629	Shell-Thin	701	COMB1	Combination	-1248,16	-0,74	0,4
629	629	Shell-Thin	702	COMB1	Combination	-1252,63	-0,26	0,33
629	629	Shell-Thin	641	COMB1	Combination	-1252,63	-0,21	0,37
630	630	Shell-Thin	641	COMB1	Combination	-1254,54	-0,59	0,28
630	630	Shell-Thin	702	COMB1	Combination	-1254,53	-0,64	0,26
630	630	Shell-Thin	703	COMB1	Combination	-1257,22	-0,36	0,18
630	630	Shell-Thin	642	COMB1	Combination	-1257,22	-0,31	0,21
631	631	Shell-Thin	642	COMB1	Combination	-1258,17	-0,5	0,12

Fonte: Autora.

Tabela 2 – Esforços S11 obtidos na região central da viga com abertura no momento máximo.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
27	27	Shell-Thin	55	COMB1	Combination	-1194,52	0,0866	5,16
27	27	Shell-Thin	54	COMB1	Combination	-1194,77	0,0173	4,93
27	27	Shell-Thin	56	COMB1	Combination	-1216,24	0,12	4,75
27	27	Shell-Thin	57	COMB1	Combination	-1216,68	0,21	4,98
28	28	Shell-Thin	57	COMB1	Combination	-1218,28	-0,11	4,58
28	28	Shell-Thin	56	COMB1	Combination	-1218,44	-0,32	4,44
28	28	Shell-Thin	58	COMB1	Combination	-1235,89	-0,07092	4,05
28	28	Shell-Thin	59	COMB1	Combination	-1236,28	0,11	4,18
29	29	Shell-Thin	59	COMB1	Combination	-1236,74	0,01727	3,59
29	29	Shell-Thin	58	COMB1	Combination	-1236,92	-0,28	3,45
29	29	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1249,84	-0,24	2,91
29	29	Shell-Thin	61	COMB1	Combination	-1250,04	0,03037	3,05
30	30	Shell-Thin	61	COMB1	Combination	-1250,31	-0,02421	2,33
30	30	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1250,25	-0,32	2,26
30	30	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,05	-0,29	1,66
30	30	Shell-Thin	63	COMB1	Combination	-1258,3	-0,01876	1,72
31	31	Shell-Thin	63	COMB1	Combination	-1258,12	0,01662	1
31	31	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,1	-0,3	0,97
31	31	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,7	-0,3	0,34
31	31	Shell-Thin	65	COMB1	Combination	-1260,78	0,007884	0,36
32	32	Shell-Thin	65	COMB1	Combination	-1260,88	-0,01318	-0,37
32	32	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,69	-0,3	-0,35
32	32	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1258,09	-0,33	-0,99
32	32	Shell-Thin	67	COMB1	Combination	-1258,21	-0,03092	-1,01
33	33	Shell-Thin	67	COMB1	Combination	-1257,93	0,02522	-1,75
33	33	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1257,82	-0,27	-1,66
33	33	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1250,16	-0,27	-2,27
33	33	Shell-Thin	69	COMB1	Combination	-1250,06	0,05219	-2,36
34	34	Shell-Thin	69	COMB1	Combination	-1250,29	0,00762	-3,07
34	34	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1249,9	-0,22	-3
34	34	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1237,16	-0,42	-3,52
34	34	Shell-Thin	71	COMB1	Combination	-1237,12	-0,14	-3,59
35	35	Shell-Thin	71	COMB1	Combination	-1236,5	-0,01373	-4,23
35	35	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1235,97	-0,18	-4,03
35	35	Shell-Thin	72	COMB1	Combination	-1216,69	-0,04115	-4,36
35	35	Shell-Thin	73	COMB1	Combination	-1216,52	0,09175	-4,55
87	87	Shell-Thin	54	COMB1	Combination	-1194,76	0,09149	4,72
87	87	Shell-Thin	150	COMB1	Combination	-1194,67	0,0618	4,55
87	87	Shell-Thin	151	COMB1	Combination	-1216,16	-0,04697	4,43
87	87	Shell-Thin	56	COMB1	Combination	-1216,24	0,11	4,59
88	88	Shell-Thin	56	COMB1	Combination	-1218,45	-0,33	4,31
88	88	Shell-Thin	151	COMB1	Combination	-1218,33	-0,48	4,2
88	88	Shell-Thin	152	COMB1	Combination	-1235,82	-0,3	3,8
88	88	Shell-Thin	58	COMB1	Combination	-1235,89	-0,0668	3,9
89	89	Shell-Thin	58	COMB1	Combination	-1236,91	-0,27	3,36
89	89	Shell-Thin	152	COMB1	Combination	-1236,8	-0,49	3,25
89	89	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1249,79	-0,5	2,68
89	89	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1249,84	-0,23	2,79
90	90	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1250,25	-0,31	2,2
90	90	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1250,13	-0,57	2,13
90	90	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,98	-0,57	1,51
90	90	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,05	-0,29	1,58
91	91	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,1	-0,3	0,95
91	91	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,97	-0,57	0,93
91	91	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,59	-0,58	0,29
91	91	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,7	-0,31	0,31
92	92	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,69	-0,3	-0,33
92	92	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,6	-0,59	-0,3
92	92	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,98	-0,59	-0,94
92	92	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1258,09	-0,32	-0,96
93	93	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1257,82	-0,26	-1,58
93	93	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,77	-0,55	-1,52
93	93	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1250,05	-0,54	-2,17
93	93	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1250,16	-0,28	-2,23
94	94	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1249,9	-0,23	-2,89
94	94	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1249,79	-0,49	-2,83
94	94	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1236,99	-0,69	-3,37
94	94	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1237,17	-0,47	-3,43
95	95	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1235,98	-0,23	-3,89
95	95	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1235,82	-0,46	-3,72
95	95	Shell-Thin	159	COMB1	Combination	-1216,53	-0,08657	-4,01

Fonte: Autora.

Tabela 2 – Esforços S11 obtido na região central da viga com abertura no momento máximo.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
89	89	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1249,84	-0,23	2,79
90	90	Shell-Thin	60	COMB1	Combination	-1250,25	-0,31	2,2
90	90	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1250,13	-0,57	2,13
90	90	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,98	-0,57	1,51
90	90	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,05	-0,29	1,58
91	91	Shell-Thin	62	COMB1	Combination	-1258,1	-0,3	0,95
91	91	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,97	-0,57	0,93
91	91	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,59	-0,58	0,29
91	91	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,7	-0,31	0,31
92	92	Shell-Thin	64	COMB1	Combination	-1260,69	-0,3	-0,33
92	92	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,6	-0,59	-0,3
92	92	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,98	-0,59	-0,94
92	92	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1258,09	-0,32	-0,96
93	93	Shell-Thin	66	COMB1	Combination	-1257,82	-0,26	-1,58
93	93	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,77	-0,55	-1,52
93	93	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1250,05	-0,54	-2,17
93	93	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1250,16	-0,28	-2,23
94	94	Shell-Thin	68	COMB1	Combination	-1249,9	-0,23	-2,89
94	94	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1249,79	-0,49	-2,83
94	94	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1236,99	-0,69	-3,37
94	94	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1237,17	-0,47	-3,43
95	95	Shell-Thin	70	COMB1	Combination	-1235,98	-0,23	-3,89
95	95	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1235,82	-0,46	-3,72
95	95	Shell-Thin	159	COMB1	Combination	-1216,53	-0,08657	-4,01
95	95	Shell-Thin	72	COMB1	Combination	-1216,68	-0,003144	-4,18
147	147	Shell-Thin	150	COMB1	Combination	-1194,66	0,15	4,36
147	147	Shell-Thin	211	COMB1	Combination	-1194,64	0,08972	4,16
147	147	Shell-Thin	212	COMB1	Combination	-1216,07	-0,19	4,06
147	147	Shell-Thin	151	COMB1	Combination	-1216,16	-0,0363	4,25
148	148	Shell-Thin	151	COMB1	Combination	-1218,32	-0,47	4,04
148	148	Shell-Thin	212	COMB1	Combination	-1218,25	-0,62	3,88
148	148	Shell-Thin	213	COMB1	Combination	-1235,7	-0,51	3,51
148	148	Shell-Thin	152	COMB1	Combination	-1235,82	-0,3	3,67
149	149	Shell-Thin	152	COMB1	Combination	-1236,8	-0,5	3,12
149	149	Shell-Thin	213	COMB1	Combination	-1236,73	-0,71	3,01
149	149	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1249,69	-0,74	2,49
149	149	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1249,79	-0,5	2,59
150	150	Shell-Thin	153	COMB1	Combination	-1250,13	-0,56	2,03
150	150	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1250,05	-0,81	1,96
150	150	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,88	-0,83	1,4
150	150	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,98	-0,58	1,47
151	151	Shell-Thin	154	COMB1	Combination	-1257,97	-0,58	0,87
151	151	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,87	-0,83	0,85
151	151	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1260,48	-0,85	0,28
151	151	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,59	-0,59	0,3
152	152	Shell-Thin	155	COMB1	Combination	-1260,6	-0,59	-0,3
152	152	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1260,51	-0,85	-0,27
152	152	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,89	-0,84	-0,86
152	152	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,97	-0,58	-0,89
153	153	Shell-Thin	156	COMB1	Combination	-1257,77	-0,54	-1,48
153	153	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,67	-0,79	-1,43
153	153	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1249,98	-0,81	-2,03
153	153	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1250,06	-0,56	-2,09
154	154	Shell-Thin	157	COMB1	Combination	-1249,79	-0,51	-2,75
154	154	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1249,63	-0,75	-2,64
154	154	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1236,87	-0,94	-3,13
154	154	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1236,99	-0,73	-3,24
155	155	Shell-Thin	158	COMB1	Combination	-1235,83	-0,5	-3,58
155	155	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1235,67	-0,7	-3,42
155	155	Shell-Thin	220	COMB1	Combination	-1216,44	-0,15	-3,66
155	155	Shell-Thin	159	COMB1	Combination	-1216,52	-0,04575	-3,83
207	207	Shell-Thin	211	COMB1	Combination	-1194,63	0,16	3,97
207	207	Shell-Thin	272	COMB1	Combination	-1194,62	0,09702	3,8
207	207	Shell-Thin	273	COMB1	Combination	-1216,02	-0,33	3,72
207	207	Shell-Thin	212	COMB1	Combination	-1216,07	-0,18	3,89

Fonte: Autora.

Tabela 2 – Esforços S11 obtido na região central da viga com abertura no momento máximo.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
208	208	Shell-Thin	212	COMB1	Combination	-1218,25	-0,62	3,71
208	208	Shell-Thin	273	COMB1	Combination	-1218,18	-0,76	3,58
208	208	Shell-Thin	274	COMB1	Combination	-1235,6	-0,71	3,25
208	208	Shell-Thin	213	COMB1	Combination	-1235,7	-0,52	3,38
209	209	Shell-Thin	213	COMB1	Combination	-1236,74	-0,73	2,89
209	209	Shell-Thin	274	COMB1	Combination	-1236,66	-0,92	2,78
209	209	Shell-Thin	275	COMB1	Combination	-1249,61	-0,96	2,29
209	209	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1249,69	-0,73	2,39
210	210	Shell-Thin	214	COMB1	Combination	-1250,05	-0,81	1,87
210	210	Shell-Thin	275	COMB1	Combination	-1249,96	-1,03	1,8
210	210	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1257,79	-1,07	1,28
210	210	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,88	-0,84	1,35
211	211	Shell-Thin	215	COMB1	Combination	-1257,87	-0,83	0,8
211	211	Shell-Thin	276	COMB1	Combination	-1257,78	-1,07	0,78
211	211	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1260,39	-1,08	0,25
211	211	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1260,48	-0,85	0,28
212	212	Shell-Thin	216	COMB1	Combination	-1260,51	-0,85	-0,27
212	212	Shell-Thin	277	COMB1	Combination	-1260,43	-1,09	-0,24
212	212	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1257,81	-1,07	-0,79
212	212	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,89	-0,83	-0,81
213	213	Shell-Thin	217	COMB1	Combination	-1257,67	-0,79	-1,38
213	213	Shell-Thin	278	COMB1	Combination	-1257,58	-1,02	-1,32
213	213	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1249,9	-1,07	-1,89
213	213	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1249,98	-0,84	-1,95
214	214	Shell-Thin	218	COMB1	Combination	-1249,64	-0,77	-2,56
214	214	Shell-Thin	279	COMB1	Combination	-1249,49	-0,99	-2,47
214	214	Shell-Thin	280	COMB1	Combination	-1236,75	-1,18	-2,91
214	214	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1236,87	-0,98	-3
215	215	Shell-Thin	219	COMB1	Combination	-1235,68	-0,74	-3,28
215	215	Shell-Thin	280	COMB1	Combination	-1235,56	-0,94	-3,12
215	215	Shell-Thin	281	COMB1	Combination	-1216,36	-0,23	-3,33
215	215	Shell-Thin	220	COMB1	Combination	-1216,43	-0,12	-3,48
267	267	Shell-Thin	272	COMB1	Combination	-1194,6	0,16	3,61
267	267	Shell-Thin	333	COMB1	Combination	-1194,6	0,08896	3,43
267	267	Shell-Thin	334	COMB1	Combination	-1215,98	-0,47	3,37

Fonte: Autora.

APÊNDICE C – Tabelas com os Esforços Obtidos pelo SAP 2000

Tabela 3 – Esforços S11 obtidos na região próxima do apoio da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
12	12	Shell-Thin 25	COMB1	Combination	-708,28	-1,8	12,11	
12	12	Shell-Thin 24	COMB1	Combination	-708,17	-2,07	11,36	
12	12	Shell-Thin 26	COMB1	Combination	-749,44	1,59	10,82	
12	12	Shell-Thin 27	COMB1	Combination	-749,45	1,85	11,57	
15	15	Shell-Thin 31	COMB1	Combination	-870,55	-1,46	9,12	
15	15	Shell-Thin 30	COMB1	Combination	-870,44	-1,64	8,52	
15	15	Shell-Thin 32	COMB1	Combination	-901,36	1,46	8,13	
15	15	Shell-Thin 33	COMB1	Combination	-901,31	1,66	8,73	
16	16	Shell-Thin 33	COMB1	Combination	-916,37	-1,36	8,36	
16	16	Shell-Thin 32	COMB1	Combination	-916,28	-1,52	7,8	
16	16	Shell-Thin 34	COMB1	Combination	-944,7	1,41	7,46	
16	16	Shell-Thin 35	COMB1	Combination	-944,65	1,58	8,02	
72	72	Shell-Thin 24	COMB1	Combination	-708,17	-2,06	11,03	
72	72	Shell-Thin 135	COMB1	Combination	-708,09	-2,32	10,91	
72	72	Shell-Thin 136	COMB1	Combination	-749,39	1,37	10,37	
72	72	Shell-Thin 26	COMB1	Combination	-749,44	1,61	10,48	
75	75	Shell-Thin 30	COMB1	Combination	-870,43	-1,6	8,26	
75	75	Shell-Thin 138	COMB1	Combination	-870,41	-1,8	8,2	
75	75	Shell-Thin 139	COMB1	Combination	-901,31	1,34	7,84	
75	75	Shell-Thin 32	COMB1	Combination	-901,35	1,51	7,9	
76	76	Shell-Thin 32	COMB1	Combination	-916,27	-1,47	7,56	
76	76	Shell-Thin 139	COMB1	Combination	-916,26	-1,65	7,51	
76	76	Shell-Thin 140	COMB1	Combination	-944,65	1,3	7,2	
76	76	Shell-Thin 34	COMB1	Combination	-944,69	1,46	7,25	
132	132	Shell-Thin 135	COMB1	Combination	-708,09	-2,3	10,47	
132	132	Shell-Thin 196	COMB1	Combination	-708,03	-2,55	9,89	
132	132	Shell-Thin 197	COMB1	Combination	-749,32	1,17	9,4	
132	132	Shell-Thin 136	COMB1	Combination	-749,38	1,4	9,98	
135	135	Shell-Thin 138	COMB1	Combination	-870,4	-1,75	7,87	
135	135	Shell-Thin 199	COMB1	Combination	-870,37	-1,93	7,42	
135	135	Shell-Thin 200	COMB1	Combination	-901,28	1,23	7,09	
135	135	Shell-Thin 139	COMB1	Combination	-901,3	1,4	7,54	
192	192	Shell-Thin 196	COMB1	Combination	-708,03	-2,53	9,51	
192	192	Shell-Thin 257	COMB1	Combination	-707,97	-2,76	9,26	
192	192	Shell-Thin 258	COMB1	Combination	-749,27	0,99	8,8	
192	192	Shell-Thin 197	COMB1	Combination	-749,32	1,2	9,05	
195	195	Shell-Thin 199	COMB1	Combination	-870,36	-1,89	7,13	
195	195	Shell-Thin 260	COMB1	Combination	-870,33	-2,06	6,96	
195	195	Shell-Thin 261	COMB1	Combination	-901,25	1,13	6,65	
195	195	Shell-Thin 200	COMB1	Combination	-901,27	1,28	6,83	
255	255	Shell-Thin 260	COMB1	Combination	-870,32	-2,02	6,64	
255	255	Shell-Thin 321	COMB1	Combination	-870,3	-2,18	6,26	
255	255	Shell-Thin 322	COMB1	Combination	-901,22	1,03	5,98	
255	255	Shell-Thin 261	COMB1	Combination	-901,24	1,17	6,36	
256	256	Shell-Thin 261	COMB1	Combination	-916,19	-1,82	6,08	
256	256	Shell-Thin 322	COMB1	Combination	-916,17	-1,96	5,73	
256	256	Shell-Thin 323	COMB1	Combination	-944,58	1,04	5,49	
256	256	Shell-Thin 262	COMB1	Combination	-944,59	1,17	5,84	
315	315	Shell-Thin 321	COMB1	Combination	-870,29	-2,14	5,96	
315	315	Shell-Thin 382	COMB1	Combination	-870,27	-2,28	5,73	
315	315	Shell-Thin 383	COMB1	Combination	-901,2	0,94	5,48	
315	315	Shell-Thin 322	COMB1	Combination	-901,21	1,07	5,71	
318	318	Shell-Thin 324	COMB1	Combination	-998,04	-1,57	4,62	
318	318	Shell-Thin 385	COMB1	Combination	-998,03	-1,69	4,44	
318	318	Shell-Thin 386	COMB1	Combination	-1022,19	0,91	4,25	
318	318	Shell-Thin 325	COMB1	Combination	-1022,2	1,02	4,43	
372	372	Shell-Thin 379	COMB1	Combination	-707,87	-3,12	7,2	
372	372	Shell-Thin 440	COMB1	Combination	-707,82	-3,29	6,76	
372	372	Shell-Thin 441	COMB1	Combination	-749,14	0,53	6,42	
372	372	Shell-Thin 380	COMB1	Combination	-749,18	0,68	6,86	
375	375	Shell-Thin 382	COMB1	Combination	-870,26	-2,26	5,41	
375	375	Shell-Thin 443	COMB1	Combination	-870,24	-2,38	5,07	
375	375	Shell-Thin 444	COMB1	Combination	-901,18	0,85	4,85	
375	375	Shell-Thin 383	COMB1	Combination	-901,19	0,97	5,19	
378	378	Shell-Thin 385	COMB1	Combination	-998,02	-1,65	4,19	
378	378	Shell-Thin 446	COMB1	Combination	-998,01	-1,75	3,92	
378	378	Shell-Thin 447	COMB1	Combination	-1022,18	0,86	3,76	
378	378	Shell-Thin 386	COMB1	Combination	-1022,18	0,96	4,02	
432	432	Shell-Thin 440	COMB1	Combination	-707,82	-3,28	6,35	
432	432	Shell-Thin 501	COMB1	Combination	-707,78	-3,42	5,99	
432	432	Shell-Thin 502	COMB1	Combination	-749,1	0,41	5,69	

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Esforços S11 obtido na região próxima do apoio da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
432	432	Shell-Thin	502	COMB1	Combination	-749,1	0,41	5,69
432	432	Shell-Thin	441	COMB1	Combination	-749,14	0,54	6,05
492	492	Shell-Thin	501	COMB1	Combination	-707,78	-3,42	5,56
492	492	Shell-Thin	562	COMB1	Combination	-707,75	-3,55	5,14
492	492	Shell-Thin	563	COMB1	Combination	-749,07	0,3	4,88
492	492	Shell-Thin	502	COMB1	Combination	-749,1	0,42	5,31
555	555	Shell-Thin	565	COMB1	Combination	-870,2	-2,53	3,55
555	555	Shell-Thin	626	COMB1	Combination	-870,19	-2,62	3,26
555	555	Shell-Thin	627	COMB1	Combination	-901,13	0,65	3,12
555	555	Shell-Thin	566	COMB1	Combination	-901,14	0,73	3,4
556	556	Shell-Thin	566	COMB1	Combination	-916,09	-2,26	3,25
556	556	Shell-Thin	627	COMB1	Combination	-916,08	-2,34	2,99
556	556	Shell-Thin	628	COMB1	Combination	-944,51	0,72	2,86
556	556	Shell-Thin	567	COMB1	Combination	-944,51	0,79	3,12
615	615	Shell-Thin	626	COMB1	Combination	-870,18	-2,6	2,95
615	615	Shell-Thin	687	COMB1	Combination	-870,17	-2,67	2,63
615	615	Shell-Thin	688	COMB1	Combination	-901,12	0,61	2,51
615	615	Shell-Thin	627	COMB1	Combination	-901,13	0,67	2,83
616	616	Shell-Thin	627	COMB1	Combination	-916,07	-2,32	2,7
616	616	Shell-Thin	688	COMB1	Combination	-916,06	-2,38	2,41
616	616	Shell-Thin	689	COMB1	Combination	-944,5	0,68	2,31
616	616	Shell-Thin	628	COMB1	Combination	-944,5	0,74	2,59
675	675	Shell-Thin	687	COMB1	Combination	-870,17	-2,66	2,32
675	675	Shell-Thin	748	COMB1	Combination	-870,16	-2,71	2,02
675	675	Shell-Thin	749	COMB1	Combination	-901,11	0,57	1,93
675	675	Shell-Thin	688	COMB1	Combination	-901,12	0,62	2,23
735	735	Shell-Thin	748	COMB1	Combination	-870,16	-2,7	1,71
735	735	Shell-Thin	809	COMB1	Combination	-870,15	-2,74	1,4
735	735	Shell-Thin	810	COMB1	Combination	-901,1	0,55	1,33
735	735	Shell-Thin	749	COMB1	Combination	-901,11	0,58	1,64
795	795	Shell-Thin	809	COMB1	Combination	-870,15	-2,74	1,08
795	795	Shell-Thin	870	COMB1	Combination	-870,15	-2,76	0,78
795	795	Shell-Thin	871	COMB1	Combination	-901,1	0,53	0,74
795	795	Shell-Thin	810	COMB1	Combination	-901,1	0,55	1,04
852	852	Shell-Thin	867	COMB1	Combination	-707,66	-3,87	0,62
852	852	Shell-Thin	928	COMB1	Combination	-707,66	-3,88	0,21
852	852	Shell-Thin	929	COMB1	Combination	-748,99	0,003477	0,19
852	852	Shell-Thin	868	COMB1	Combination	-748,99	0,01269	0,6
855	855	Shell-Thin	870	COMB1	Combination	-870,15	-2,76	0,46
855	855	Shell-Thin	931	COMB1	Combination	-870,15	-2,77	0,16
855	855	Shell-Thin	932	COMB1	Combination	-901,1	0,53	0,14
855	855	Shell-Thin	871	COMB1	Combination	-901,1	0,53	0,45
912	912	Shell-Thin	928	COMB1	Combination	-707,66	-3,88	-0,21
912	912	Shell-Thin	989	COMB1	Combination	-707,66	-3,87	-0,62
912	912	Shell-Thin	990	COMB1	Combination	-748,99	0,01269	-0,6
912	912	Shell-Thin	929	COMB1	Combination	-748,99	0,003477	-0,19
915	915	Shell-Thin	931	COMB1	Combination	-870,15	-2,77	-0,16
915	915	Shell-Thin	992	COMB1	Combination	-870,15	-2,76	-0,46
915	915	Shell-Thin	993	COMB1	Combination	-901,1	0,53	-0,45
915	915	Shell-Thin	932	COMB1	Combination	-901,1	0,53	-0,14
975	975	Shell-Thin	992	COMB1	Combination	-870,15	-2,76	-0,78
975	975	Shell-Thin	1053	COMB1	Combination	-870,15	-2,74	-1,08
975	975	Shell-Thin	1054	COMB1	Combination	-901,1	0,55	-1,04
975	975	Shell-Thin	993	COMB1	Combination	-901,1	0,53	-0,74
1035	1035	Shell-Thin	1053	COMB1	Combination	-870,15	-2,74	-1,4
1035	1035	Shell-Thin	1114	COMB1	Combination	-870,16	-2,7	-1,71
1035	1035	Shell-Thin	1115	COMB1	Combination	-901,11	0,58	-1,64
1035	1035	Shell-Thin	1054	COMB1	Combination	-901,1	0,55	-1,33
1036	1036	Shell-Thin	1054	COMB1	Combination	-916,05	-2,44	-1,28
1036	1036	Shell-Thin	1115	COMB1	Combination	-916,05	-2,41	-1,56
1036	1036	Shell-Thin	1116	COMB1	Combination	-944,49	0,66	-1,5
1036	1036	Shell-Thin	1055	COMB1	Combination	-944,49	0,62	-1,22
1092	1092	Shell-Thin	1111	COMB1	Combination	-707,68	-3,8	-2,69
1092	1092	Shell-Thin	1172	COMB1	Combination	-707,7	-3,73	-3,09
1092	1092	Shell-Thin	1173	COMB1	Combination	-749,02	0,14	-2,95
1092	1092	Shell-Thin	1112	COMB1	Combination	-749,01	0,0767	-2,55
1095	1095	Shell-Thin	1114	COMB1	Combination	-870,16	-2,71	-2,02
1095	1095	Shell-Thin	1175	COMB1	Combination	-870,17	-2,66	-2,32
1095	1095	Shell-Thin	1176	COMB1	Combination	-901,12	0,62	-2,23
1095	1095	Shell-Thin	1115	COMB1	Combination	-901,11	0,57	-1,93
1152	1152	Shell-Thin	1172	COMB1	Combination	-707,7	-3,73	-3,51
1152	1152	Shell-Thin	1233	COMB1	Combination	-707,72	-3,65	-3,92
1152	1152	Shell-Thin	1234	COMB1	Combination	-749,05	0,22	-3,74
1152	1152	Shell-Thin	1173	COMB1	Combination	-749,03	0,13	-3,33
1155	1155	Shell-Thin	1175	COMB1	Combination	-870,17	-2,67	-2,63
1155	1155	Shell-Thin	1236	COMB1	Combination	-870,18	-2,6	-2,95
1155	1155	Shell-Thin	1237	COMB1	Combination	-901,13	0,67	-2,83

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Esforços S11 obtido na região próxima do apoio da viga contínua.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
1155	1155	Shell-Thin	1176	COMB1	Combination	-901,12	0,61	-2,51
1336	1336	Shell-Thin	1359	COMB1	Combination	-916,11	-2,21	-4,12
1336	1336	Shell-Thin	1420	COMB1	Combination	-916,12	-2,11	-4,37
1336	1336	Shell-Thin	1421	COMB1	Combination	-944,54	0,92	-4,19
1336	1336	Shell-Thin	1360	COMB1	Combination	-944,53	0,82	-3,94
1395	1395	Shell-Thin	1419	COMB1	Combination	-870,24	-2,38	-5,07
1395	1395	Shell-Thin	1480	COMB1	Combination	-870,26	-2,26	-5,41
1395	1395	Shell-Thin	1481	COMB1	Combination	-901,19	0,97	-5,19
1395	1395	Shell-Thin	1420	COMB1	Combination	-901,18	0,85	-4,85
1398	1398	Shell-Thin	1422	COMB1	Combination	-998,01	-1,75	-3,92
1398	1398	Shell-Thin	1483	COMB1	Combination	-998,02	-1,65	-4,19
1398	1398	Shell-Thin	1484	COMB1	Combination	-1022,18	0,96	-4,02
1398	1398	Shell-Thin	1423	COMB1	Combination	-1022,18	0,86	-3,76
1455	1455	Shell-Thin	1480	COMB1	Combination	-870,27	-2,28	-5,73
1455	1455	Shell-Thin	1541	COMB1	Combination	-870,29	-2,14	-5,97
1455	1455	Shell-Thin	1542	COMB1	Combination	-901,21	1,07	-5,71
1455	1455	Shell-Thin	1481	COMB1	Combination	-901,2	0,94	-5,48
1458	1458	Shell-Thin	1483	COMB1	Combination	-998,03	-1,69	-4,44
1458	1458	Shell-Thin	1544	COMB1	Combination	-998,04	-1,57	-4,62
1458	1458	Shell-Thin	1545	COMB1	Combination	-1022,2	1,02	-4,43
1458	1458	Shell-Thin	1484	COMB1	Combination	-1022,19	0,91	-4,25
1515	1515	Shell-Thin	1541	COMB1	Combination	-870,3	-2,18	-6,26
1515	1515	Shell-Thin	1602	COMB1	Combination	-870,32	-2,02	-6,64
1515	1515	Shell-Thin	1603	COMB1	Combination	-901,24	1,17	-6,36
1515	1515	Shell-Thin	1542	COMB1	Combination	-901,22	1,03	-5,98
1516	1516	Shell-Thin	1542	COMB1	Combination	-916,17	-1,96	-5,73
1516	1516	Shell-Thin	1603	COMB1	Combination	-916,19	-1,82	-6,08
1516	1516	Shell-Thin	1604	COMB1	Combination	-944,59	1,17	-5,84
1516	1516	Shell-Thin	1543	COMB1	Combination	-944,58	1,04	-5,49
1517	1517	Shell-Thin	1543	COMB1	Combination	-958,66	-1,78	-5,27
1517	1517	Shell-Thin	1604	COMB1	Combination	-958,67	-1,65	-5,59
1517	1517	Shell-Thin	1605	COMB1	Combination	-984,86	1,14	-5,37
1517	1517	Shell-Thin	1544	COMB1	Combination	-984,85	1,02	-5,05
1518	1518	Shell-Thin	1544	COMB1	Combination	-998,05	-1,62	-4,85
1518	1518	Shell-Thin	1605	COMB1	Combination	-998,05	-1,5	-5,14
1518	1518	Shell-Thin	1606	COMB1	Combination	-1022,21	1,1	-4,94
1518	1518	Shell-Thin	1545	COMB1	Combination	-1022,21	0,98	-4,64
1572	1572	Shell-Thin	1599	COMB1	Combination	-707,97	-2,76	-9,26
1572	1572	Shell-Thin	1660	COMB1	Combination	-708,03	-2,53	-9,51
1572	1572	Shell-Thin	1661	COMB1	Combination	-749,32	1,2	-9,05
1572	1572	Shell-Thin	1600	COMB1	Combination	-749,27	0,99	-8,8
1575	1575	Shell-Thin	1602	COMB1	Combination	-870,33	-2,06	-6,96
1575	1575	Shell-Thin	1663	COMB1	Combination	-870,36	-1,89	-7,13
1575	1575	Shell-Thin	1664	COMB1	Combination	-901,27	1,28	-6,83
1575	1575	Shell-Thin	1603	COMB1	Combination	-901,25	1,13	-6,65
1576	1576	Shell-Thin	1603	COMB1	Combination	-916,2	-1,86	-6,38
1576	1576	Shell-Thin	1664	COMB1	Combination	-916,21	-1,71	-6,53
1576	1576	Shell-Thin	1665	COMB1	Combination	-944,62	1,26	-6,26
1576	1576	Shell-Thin	1604	COMB1	Combination	-944,6	1,12	-6,11
1577	1577	Shell-Thin	1604	COMB1	Combination	-958,68	-1,69	-5,86

Fonte: Autora.

Tabela 4 – Esforços S11 obtidos na região próxima do apoio da viga com abertura no cortante máximo.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
663	663	Shell-Thin	676	COMB1	Combination	-32,93	9,73	1,24
664	664	Shell-Thin	676	COMB1	Combination	-60,27	4,26	1,59
664	664	Shell-Thin	737	COMB1	Combination	-60,34	4,35	1,38
664	664	Shell-Thin	738	COMB1	Combination	-87,42	8,22	1,66
664	664	Shell-Thin	677	COMB1	Combination	-87,36	8,14	1,88
665	665	Shell-Thin	677	COMB1	Combination	-118,09	2	2,16
665	665	Shell-Thin	738	COMB1	Combination	-118,13	2,07	1,87
665	665	Shell-Thin	739	COMB1	Combination	-155,4	5,42	2,05
665	665	Shell-Thin	678	COMB1	Combination	-155,38	5,38	2,34
666	666	Shell-Thin	678	COMB1	Combination	-186,14	-0,77	2,47
666	666	Shell-Thin	739	COMB1	Combination	-186,14	-0,73	2,15
666	666	Shell-Thin	740	COMB1	Combination	-225,58	3,19	2,22
666	666	Shell-Thin	679	COMB1	Combination	-225,59	3,18	2,54
667	667	Shell-Thin	679	COMB1	Combination	-254,81	-2,67	2,56
667	667	Shell-Thin	740	COMB1	Combination	-254,79	-2,65	2,23
667	667	Shell-Thin	741	COMB1	Combination	-290,89	2,49	2,23
667	667	Shell-Thin	680	COMB1	Combination	-290,92	2,47	2,56
668	668	Shell-Thin	680	COMB1	Combination	-317,74	-2,89	2,57
668	668	Shell-Thin	741	COMB1	Combination	-317,71	-2,87	2,24
668	668	Shell-Thin	742	COMB1	Combination	-348,76	3,97	2,32
668	668	Shell-Thin	681	COMB1	Combination	-348,78	3,92	2,64
669	669	Shell-Thin	681	COMB1	Combination	-373,33	-0,99	2,83
669	669	Shell-Thin	742	COMB1	Combination	-373,36	-0,95	2,46
669	669	Shell-Thin	743	COMB1	Combination	-402,19	7,93	2,73
669	669	Shell-Thin	682	COMB1	Combination	-402,13	7,82	3,1
670	670	Shell-Thin	682	COMB1	Combination	-424,31	3,39	3,58
670	670	Shell-Thin	743	COMB1	Combination	-424,44	3,48	3,09
670	670	Shell-Thin	744	COMB1	Combination	-460,03	13,15	3,47
670	670	Shell-Thin	683	COMB1	Combination	-459,88	12,99	3,97
671	671	Shell-Thin	683	COMB1	Combination	-478,84	9,2	4,39
671	671	Shell-Thin	744	COMB1	Combination	-479,03	9,35	3,78
671	671	Shell-Thin	745	COMB1	Combination	-539,42	14,03	4,08
671	671	Shell-Thin	684	COMB1	Combination	-539,24	13,87	4,68
672	672	Shell-Thin	684	COMB1	Combination	-556,47	10,43	4,83
672	672	Shell-Thin	745	COMB1	Combination	-556,64	10,59	4,18
672	672	Shell-Thin	746	COMB1	Combination	-650,91	6,38	4,46
672	672	Shell-Thin	685	COMB1	Combination	-650,76	6,31	5,11
673	673	Shell-Thin	685	COMB1	Combination	-660,95	4,27	5,53
673	673	Shell-Thin	746	COMB1	Combination	-661,04	4,36	4,77
673	673	Shell-Thin	747	COMB1	Combination	-760,06	0,16	5,03
673	673	Shell-Thin	686	COMB1	Combination	-760,01	0,17	5,78
674	674	Shell-Thin	686	COMB1	Combination	-761,87	-0,21	6,02
674	674	Shell-Thin	747	COMB1	Combination	-761,87	-0,2	5,21
674	674	Shell-Thin	748	COMB1	Combination	-854,94	-1,72	5,25
674	674	Shell-Thin	687	COMB1	Combination	-854,96	-1,67	6,07
675	675	Shell-Thin	687	COMB1	Combination	-855,74	-1,82	5,96
675	675	Shell-Thin	748	COMB1	Combination	-855,72	-1,87	5,18
675	675	Shell-Thin	749	COMB1	Combination	-943,71	-2,66	5,02
675	675	Shell-Thin	688	COMB1	Combination	-943,75	-2,56	5,8
676	676	Shell-Thin	688	COMB1	Combination	-944,58	-2,73	5,54
676	676	Shell-Thin	749	COMB1	Combination	-944,54	-2,82	4,82
676	676	Shell-Thin	750	COMB1	Combination	-1027,08	-4,28	4,44
676	676	Shell-Thin	689	COMB1	Combination	-1027,14	-4,13	5,16
677	677	Shell-Thin	689	COMB1	Combination	-1028,33	-4,37	4,53
677	677	Shell-Thin	750	COMB1	Combination	-1028,21	-4,51	3,96
677	677	Shell-Thin	751	COMB1	Combination	-1106,44	-8,75	3,37
677	677	Shell-Thin	690	COMB1	Combination	-1106,59	-8,52	3,94
678	678	Shell-Thin	690	COMB1	Combination	-1115,07	-10,22	3,13
678	678	Shell-Thin	751	COMB1	Combination	-1114,87	-10,44	2,76
678	678	Shell-Thin	752	COMB1	Combination	-1179,01	-14,79	2,24
678	678	Shell-Thin	691	COMB1	Combination	-1179,22	-14,5	2,61
679	679	Shell-Thin	691	COMB1	Combination	-1193,08	-17,27	2,28
679	679	Shell-Thin	752	COMB1	Combination	-1192,87	-17,57	2,01
679	679	Shell-Thin	753	COMB1	Combination	-1213,07	-11,89	1,56
679	679	Shell-Thin	692	COMB1	Combination	-1213,26	-11,62	1,84
680	680	Shell-Thin	692	COMB1	Combination	-1228,41	-14,65	1,29

Fonte: Autora.

Tabela 4 – Esforços S11 obtido na região próxima do apoio da viga com abertura no momento máximo.

TABLE: Element Stresses - Area Shells								
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	S11Top	S22Top	S12Top
Text	Text	Text	Text	Text	Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2
688	688	Shell-Thin	701	COMB1	Combination	-1260,09	1,15	-0,06351
689	689	Shell-Thin	701	COMB1	Combination	-1264,48	0,27	-0,05185
689	689	Shell-Thin	762	COMB1	Combination	-1264,5	0,25	-0,04376
689	689	Shell-Thin	763	COMB1	Combination	-1264,45	0,72	-0,04213
689	689	Shell-Thin	702	COMB1	Combination	-1264,44	0,74	-0,05022
690	690	Shell-Thin	702	COMB1	Combination	-1267,49	0,13	-0,05694
690	690	Shell-Thin	763	COMB1	Combination	-1267,51	0,11	-0,04761
690	690	Shell-Thin	764	COMB1	Combination	-1267,22	0,36	-0,06094
690	690	Shell-Thin	703	COMB1	Combination	-1267,21	0,39	-0,07028
691	691	Shell-Thin	703	COMB1	Combination	-1269,03	0,02508	-0,09283
691	691	Shell-Thin	764	COMB1	Combination	-1269,04	-0,0004565	-0,07842
691	691	Shell-Thin	765	COMB1	Combination	-1268,07	0,05914	-0,1
691	691	Shell-Thin	704	COMB1	Combination	-1268,06	0,08854	-0,12
692	692	Shell-Thin	704	COMB1	Combination	-1268,71	-0,04217	-0,15
692	692	Shell-Thin	765	COMB1	Combination	-1268,72	-0,07149	-0,13
692	692	Shell-Thin	766	COMB1	Combination	-1266,73	-0,2	-0,17
692	692	Shell-Thin	705	COMB1	Combination	-1266,73	-0,16	-0,19
693	693	Shell-Thin	705	COMB1	Combination	-1266,27	-0,07223	-0,24
693	693	Shell-Thin	766	COMB1	Combination	-1266,27	-0,1	-0,2
693	693	Shell-Thin	767	COMB1	Combination	-1263	-0,41	-0,25
693	693	Shell-Thin	706	COMB1	Combination	-1263	-0,38	-0,28
694	694	Shell-Thin	706	COMB1	Combination	-1261,46	-0,07008	-0,33
694	694	Shell-Thin	767	COMB1	Combination	-1261,47	-0,1	-0,29
694	694	Shell-Thin	768	COMB1	Combination	-1256,74	-0,59	-0,34
694	694	Shell-Thin	707	COMB1	Combination	-1256,74	-0,56	-0,38
695	695	Shell-Thin	707	COMB1	Combination	-1254,15	-0,04073	-0,44
695	695	Shell-Thin	768	COMB1	Combination	-1254,15	-0,07706	-0,38
695	695	Shell-Thin	769	COMB1	Combination	-1247,84	-0,75	-0,43
695	695	Shell-Thin	708	COMB1	Combination	-1247,84	-0,71	-0,49
696	696	Shell-Thin	708	COMB1	Combination	-1244,23	0,009754	-0,56
696	696	Shell-Thin	769	COMB1	Combination	-1244,23	-0,02778	-0,48
696	696	Shell-Thin	770	COMB1	Combination	-1236,23	-0,89	-0,54
696	696	Shell-Thin	709	COMB1	Combination	-1236,23	-0,85	-0,61
697	697	Shell-Thin	709	COMB1	Combination	-1231,62	0,07644	-0,68
697	697	Shell-Thin	770	COMB1	Combination	-1231,62	0,0381	-0,59
697	697	Shell-Thin	771	COMB1	Combination	-1221,89	-1,01	-0,64
697	697	Shell-Thin	710	COMB1	Combination	-1221,89	-0,97	-0,74
698	698	Shell-Thin	710	COMB1	Combination	-1216,28	0,15	-0,8
698	698	Shell-Thin	771	COMB1	Combination	-1216,28	0,12	-0,69
698	698	Shell-Thin	772	COMB1	Combination	-1204,79	-1,12	-0,75
698	698	Shell-Thin	711	COMB1	Combination	-1204,79	-1,08	-0,86
699	699	Shell-Thin	711	COMB1	Combination	-1198,19	0,24	-0,93
699	699	Shell-Thin	772	COMB1	Combination	-1198,19	0,2	-0,8
699	699	Shell-Thin	773	COMB1	Combination	-1184,92	-1,22	-0,86
699	699	Shell-Thin	712	COMB1	Combination	-1184,93	-1,19	-0,99
700	700	Shell-Thin	712	COMB1	Combination	-1177,35	0,33	-1,06
700	700	Shell-Thin	773	COMB1	Combination	-1177,35	0,29	-0,92
700	700	Shell-Thin	774	COMB1	Combination	-1162,3	-1,33	-0,98
700	700	Shell-Thin	713	COMB1	Combination	-1162,3	-1,29	-1,12
701	701	Shell-Thin	713	COMB1	Combination	-1153,75	0,42	-1,19

Fonte: Autora.

ANEXO A

Tabela 5 – Limites para deslocamento.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350+$ contraflecha ^b
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H_i/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400^g$ e 15 mm

^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell/350$.

^c O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

^d Rotação nos elementos que suportam paredes.

^e H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do Intel.

^g O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS

1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor ℓ é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.

3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.

4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

Fonte: NBR 6118 (2014).

ANEXO B

Tabela 6 – Valores de k_c e k_s para aço CA-50 e $f_{ck} \leq 50$ Mpa.

FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR - ARMADURA SIMPLES												
$\beta_x = \frac{x}{d}$	K_c (cm ² /kN)								K_s (cm ² /kN)			Dom.
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-25	CA-50	CA-60	
0.01	137.8	103.4	82.7	68.9	59.1	51.7	45.9	41.3	0.046	0.023	0.019	2
0.02	69.2	51.9	41.5	34.6	29.6	25.9	23.1	20.8	0.046	0.023	0.019	
0.03	46.3	34.7	27.8	23.2	19.8	17.4	15.4	13.9	0.047	0.023	0.019	
0.04	34.9	26.2	20.9	17.4	14.9	13.1	11.6	10.5	0.047	0.023	0.019	
0.05	28.0	21.0	16.8	14.0	12.0	10.5	9.3	8.4	0.047	0.023	0.020	
0.06	23.4	17.6	14.1	11.7	10.0	8.8	7.8	7.0	0.047	0.024	0.020	
0.07	20.2	15.1	12.1	10.1	8.6	7.6	6.7	6.1	0.047	0.024	0.020	
0.08	17.7	13.3	10.6	8.9	7.6	6.6	5.9	5.3	0.048	0.024	0.020	
0.09	15.8	11.9	9.5	7.9	6.8	5.9	5.3	4.7	0.048	0.024	0.020	
0.10	14.3	10.7	8.6	7.1	6.1	5.4	4.8	4.3	0.048	0.024	0.020	
0.12	12.0	9.0	7.2	6.0	5.1	4.5	4.0	3.6	0.048	0.024	0.020	
0.13	11.1	8.4	6.7	5.6	4.8	4.2	3.7	3.3	0.049	0.024	0.020	
0.14	10.4	7.8	6.2	5.2	4.5	3.9	3.5	3.1	0.049	0.024	0.020	
0.15	9.7	7.3	5.8	4.9	4.2	3.7	3.2	2.9	0.049	0.024	0.020	
0.16	9.2	6.9	5.5	4.6	3.9	3.4	3.1	2.7	0.049	0.025	0.020	
0.17	8.7	6.5	5.2	4.3	3.7	3.2	2.9	2.6	0.049	0.025	0.021	
0.18	8.2	6.2	4.9	4.1	3.5	3.1	2.7	2.5	0.050	0.025	0.021	
0.19	7.8	5.9	4.7	3.9	3.4	2.9	2.6	2.3	0.050	0.025	0.021	
0.20	7.5	5.6	4.5	3.7	3.2	2.8	2.5	2.2	0.050	0.025	0.021	
0.21	7.1	5.4	4.3	3.6	3.1	2.7	2.4	2.1	0.050	0.025	0.021	
0.22	6.8	5.1	4.1	3.4	2.9	2.6	2.3	2.1	0.050	0.025	0.021	
0.23	6.6	4.9	3.9	3.3	2.8	2.5	2.2	2.0	0.051	0.025	0.021	
0.24	6.3	4.7	3.8	3.2	2.7	2.4	2.1	1.9	0.051	0.025	0.021	
0.25	6.1	4.6	3.7	3.1	2.6	2.3	2.0	1.8	0.051	0.026	0.021	
0.26	5.9	4.4	3.5	2.9	2.5	2.2	2.0	1.8	0.051	0.026	0.021	
0.27	5.7	4.3	3.4	2.8	2.4	2.1	1.9	1.7	0.052	0.026	0.021	
0.28	5.5	4.1	3.3	2.8	2.4	2.1	1.8	1.7	0.052	0.026	0.022	
0.29	5.4	4.0	3.2	2.7	2.3	2.0	1.8	1.6	0.052	0.026	0.022	
0.30	5.2	3.9	3.1	2.6	2.2	1.9	1.7	1.6	0.052	0.026	0.022	
0.31	5.1	3.8	3.0	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	0.053	0.026	0.022	
0.32	4.9	3.7	3.0	2.5	2.1	1.8	1.6	1.5	0.053	0.026	0.022	
0.33	4.8	3.6	2.9	2.4	2.1	1.8	1.6	1.4	0.053	0.026	0.022	
0.34	4.7	3.5	2.8	2.3	2.0	1.8	1.6	1.4	0.053	0.027	0.022	
0.35	4.6	3.4	2.7	2.3	2.0	1.7	1.5	1.4	0.053	0.027	0.022	
0.36	4.5	3.3	2.7	2.2	1.9	1.7	1.5	1.3	0.054	0.027	0.022	
0.37	4.4	3.3	2.6	2.2	1.9	1.6	1.5	1.3	0.054	0.027	0.022	
0.38	4.3	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	0.054	0.027	0.023	
0.40	4.1	3.1	2.5	2.0	1.8	1.5	1.4	1.2	0.055	0.027	0.023	
0.42	3.9	2.9	2.4	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	0.055	0.028	0.023	
0.44	3.8	2.8	2.3	1.9	1.6	1.4	1.3	1.1	0.056	0.028	0.023	
0.45	3.7	2.8	2.2	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1	0.056	0.028	0.023	
0.46	3.7	2.7	2.2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1	0.056	0.028	0.023	
0.48	3.5	2.7	2.1	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1	0.057	0.028	0.024	
0.50	3.4	2.6	2.1	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0	0.058	0.029	0.024	
0.52	3.3	2.5	2.0	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0	0.058	0.029	0.024	
0.54	3.2	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	0.059	0.029	0.024	
0.56	3.2	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1	0.9	0.059	0.030	0.025	
0.58	3.1	2.3	1.8	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9	0.060	0.030	0.025	
0.59	3.0	2.3	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.060	0.030	0.025	
0.60	3.0	2.3	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.061	0.030	0.025	
0.62	2.9	2.2	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.061	0.031	0.025	
0.63	2.9	2.2	1.7	1.5	1.2	1.1	1.0	0.9	0.061	0.031	0.026	
0.64	2.9	2.2	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.062	0.031	0.026	
0.66	2.8	2.1	1.7	1.4	1.2	1.1	0.9	0.8	0.063	0.031	0.026	
0.70	2.7	2.0	1.6	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.064	0.032	0.027	
0.74	2.6	2.0	1.6	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.065	0.033	0.027	
0.77	2.6	1.9	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.066	0.033	0.028	

Fonte: Notas de aula do Prof. Dr. Bastos (2015).