



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ VINÍCIUS MELO COUTO

Projeto estrutural de vigas-parede biapoiadas de concreto armado

Cabo de Santo Agostinho – PE
2022

ANDRÉ VINÍCIUS MELO COUTO

Projeto estrutural de vigas-parede biapoiadas de concreto armado

Monografia apresentada ao Curso Graduação de Engenharia Civil da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Jordlly Reydson de Barros Silva

Cabo de Santo Agostinho – PE
2022

C871p

Couto, André Vinícius Melo

PROJETO ESTRUTURAL DE VIGAS-PAREDE BIAPOIADAS DE CONCRETO ARMADO / André Vinícius
Melo Couto. - 2019.
44 f. : il.

Orientador: Jordlly Reydson de Barros Silva.
Inclui referências e anexo(s).

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em
Engenharia Civil, Cabo de Santo Agostinho, 2022.

1. Viga-parede. 2. elementos finitos. 3. modelagem estrutural. I. Silva, Jordlly Reydson de Barros, orient. II. Título

ANDRÉ VINÍCIUS MELO COUTO

Projeto estrutural de vigas-parede biapoiadas de concreto armado

Monografia apresentada ao Curso Graduação de Engenharia Civil da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Data de aprovação: 09/07/2019

Banca examinadora

Prof.^a MSc. Jordlly Reydon de Barros Silva
Orientador

Prof.^o MSc. Wesley Imperiano de Melo
Examinador Interna

Prof.^a Dr.^a Cecília Maria Mota Silva Lins
Examinadora Interna

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao bom Deus e à sua bem-aventurada Mãe, Maria, por terem me dado a ciência e a força para permanecer nesta caminhada até o fim, pois, mesmo com minhas baixas, sempre estiveram ao meu lado.

À minha esposa, Marcela Vanessa, que sempre foi uma companheira incomparável, estando comigo desde o começo desta graduação, me apoiando em todo o tempo e agora carregando o fruto no nosso amor em seu ventre. Ofereço esta conquista a vocês. Amo vocês!

A toda a minha família, principalmente meu avô Gilvan, meus tios Fábio e Tertuliano que sempre foram meus exemplos e me ajudaram imensamente em tudo que precisei durante a graduação, não me deixando faltar nada para que eu pudesse concluir esta caminhada.

Ao meu orientador, professor Jordlly, que alimentou o meu gosto pelo cálculo estrutural, ao qual eu conhecia muito pouco e suas aulas o fizeram crescer. Agradeço pela paciência, apoio e ensinamentos adquiridos neste tempo que passamos juntos.

Por fim, agradeço aos meus amigos do grupo AlfaSigma que se tornaram indispensáveis em todo o processo, pois tornaram a universidade um ambiente muito mais proveitoso e agradável desde o primeiro período. Sentirei saudades das nossas noites estudando com vários momentos de divagações e boas risadas, vocês deixam tudo mais divertido. Muito obrigado pela amizade.

“Aqueles coisas que valorizamos de verdade são exatamente as que hesitamos em atribuir um preço, como a vida, o amor e o conhecimento. O valor começa onde termina o cálculo, pois o que mais nos importa é aquilo que não trocamos.”
(Roger Scruton)

RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade, além de apresentar os principais fundamentos do projeto estrutural de vigas-parede biapoiadas, estudar a análise desses elementos por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Isso é feito através do software MEF *ABAQUS/CAE*, versão estudantil. No decorrer do estudo, é discutido um procedimento de cálculo, o qual é implementado em uma rotina computacional, no software *Smath Studio*. Também é feita uma discussão sobre o procedimento necessário para realizar a modelagem da peça estrutural, no software MEF, como a implantação de informações sobre a viga-parede, tal como especificações do material, rigidez do apoio e carregamentos aplicados. Assim, para um problema presente na literatura, os valores das tensões causadas nos apoios, fornecidos pelos softwares são comparados, verificando-se a proximidade das respostas obtidas. Por fim, é feito um estudo paramétrico do problema, através da rotina computacional, observando-se a influência de parâmetros geométricos e carregamentos no comportamento da estrutura.

Palavras-chave: Viga-parede, elementos finitos, modelagem estrutural

ABSTRACT

The purpose of this work is to present the main fundamentals of single-span deep beams structural design, and analyze these elements through the Finite Element Method (FEM), using ABAQUS/CAE software, student version. During the study, a design procedure is discussed, which is implemented in the Smath Studio software. A discussion is also made about the FEM modeling procedure, such as the deep beam information implementation, such as material, supports and applied loads. Thus, for a problem present in the literature, the support tensions, provided by the software are compared, verifying the proximity of the answers obtained. Finally, a parameter study of the problem is made, through the Smath Studio routine, observing the influence of geometric parameters and loads on the behavior of the structure.

Key-words: Deep beam, finite elements, structural modeling;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Viga parede com vão.....	11
Figura 2: Viga-parede contínua	11
Figura 3: Trajetórias das tensões principais em vigas-parede	13
Figura 4: Padrão de fissuração em vigas-parede	13
Figura 5: Componentes de forças em uma viga	15
Figura 6: Distribuição da armadura do banzo tracionado.....	15
Figura 7: Suspensão com barras dobradas.....	17
Figura 8: Suspensão com barras dobradas.....	17
Figura 9: Modelo biela-tirante para uma viga-parede biapoiada.....	18
Figura 10: Tensões nos apoios de extremidade	18
Figura 11: Tipos de elementos.....	20
Figura 12: Resultado experimental e análise não-linear de uma viga-parede	21
Figura 13: Análise não-linear de viga-parede via elementos finitos	22
Figura 14: Geometria e carregamento da viga-parede.....	23
Figura 15: Distribuição de tensões na peça	24
Figura 16: Criando o plano de corte	24
Figura 17: Determinação do ângulo do plano de corte.....	25
Figura 18: Configurando o plano de corte.....	25
Figura 19: Configuração final do View Cut Manager	26
Figura 20: Detalhes das tensões do apoio.....	26
Figura 21: Cálculo da componente F_y	27
Figura 22: Dimensões em metros do elemento	36
Figura 23: Seções do modelo.....	36
Figura 24: Propriedades mecânicas	38
Figura 25: Modelo após a aplicação das interações e da pressão.....	40
Figura 26: Configuração da pressão gerada pelo peso próprio	41
Figura 27: Elemento da malha.....	42
Figura 28: Quantidade de elementos	43
Figura 29: Malha de elementos finitos	43
Figura 30: Processamento.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator corretor k_1	16
Tabela 2: Resultados do estudo paramétrico em uma viga parede.....	28
Tabela 3: Módulo de elasticidade em função do f_{ck} do concreto (para granito como agregado gráúdo).....	37

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	14
Equação 2.....	14
Equação 3.....	14
Equação 4.....	15
Equação 5.....	16
Equação 6.....	19
Equação 7.....	19
Equação 8.....	19
Equação 9.....	19
Equação 10.....	19
Equação 11.....	19
Equação 12.....	27
Equação 13.....	27
Equação 14.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 VIGAS-PAREDE	11
2.1 Definições	11
2.2 Comportamento estrutural elástico-linear	12
2.3 Tipos de rupturas e critérios de dimensionamento	13
2.3.1 Armadura do banzo tracionado	14
2.3.2 Armadura vertical	16
2.3.3 Verificação das tensões de compressão nos apoios	17
3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	20
3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)	20
3.2 Análises não-lineares de estruturas de concreto armado via MEF	21
3.3 Modelagem computacional via MEF	22
4 EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE	23
4.1 Memória de cálculo computacional	23
4.2 Exemplo de modelagem usando o ABAQUS/CAE	23
4.3 Estudo paramétrico	28
5 CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS	30
ANEXO A: MEMÓRIA DE CÁLCULO COMPUTACIONAL	32
ANEXO B: EXEMPLO DE MODELAGEM USANDO O ABAQUS/CAE	35

1 INTRODUÇÃO

A constante necessidade de adaptação das construções, com o intuito de atender às exigências do mercado, faz com que a engenharia civil procure cada vez mais o uso de alternativas a fim de melhorar processos e aumentar a qualidade dos produtos. Na área estrutural, em construções de edifícios, por exemplo, existe uma frequente preocupação quanto ao equilíbrio entre a segurança estrutural e a eficiência na ocupação do espaço disponível. Com isso, alguns elementos podem surgir de acordo com as necessidades, é o exemplo das vigas-parede.

Análises como vigas-parede podem ser adotadas no projeto de paredes de reservatórios de água, ou em situações específicas, como vigas de transição. Para o tipo de elemento em questão, de acordo com Araújo (2010), não é possível a aplicação de hipóteses clássicas como a das seções planas de Navier-Bernoulli, visto que a estrutura da peça sofre distorções muito grandes e as deformações normais não possuem uma variação linear ao longo da peça, fazendo com que as tensões normais variem de forma não-linear, diferente das vigas esbeltas mais comuns. Com isso, o uso de recursos computacionais para uma análise se torna uma opção, muitas vezes, atrativa.

O advento e aperfeiçoamento dos computadores proporcionaram às análises estruturais rapidez e acurácia nos resultados obtidos e foram incorporados a estes alguns métodos de análise mais eficientes, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos (MEF). Segundo Vaz (2011), o MEF iniciou na análise estática de estruturas com comportamento linear, porém, devido ao avanço da tecnologia, seu uso foi estendido também às análises de estruturas com comportamento não-linear, tanto físico quanto geométrico e problemas de dinâmica.

Uma má avaliação do comportamento dessa estrutura pode resultar em prejuízos econômicos e, em casos mais extremos, o colapso da construção. Neste contexto, esta pesquisa tem o intuito de avaliar o comportamento desse tipo de elemento, através da descrição e implementação de uma rotina de cálculo utilizada para o dimensionamento de vigas-parede biapoiadas, com base em um problema proposto por Araújo (2010), o qual também é modelado no software ABAQUS/CAE versão estudantil, que realiza a análise através do MEF. Além disso, por fim, é proposto um estudo parâmetro, com o intuito de verificar a sensibilidade de algumas variáveis para o comportamento estrutural.

2 VIGAS-PAREDE

2.1 Definições

Segundo o item 22.4 da ABNT NBR 6118 (2014), vigas-parede (*deep beams*) são as vigas altas em que a relação entre o vão L e a altura h é inferior a 2, em vigas biapoiadas, e inferior a 3, em vigas contínuas. Além disso, a mesma norma, no item 14.4.2.2, ao definir chapas como elementos de superfície sujeitos a ações contidas no seu plano, também estabelece que vigas-parede são chapas de concreto em que o vão é menor que três vezes a maior dimensão da seção transversal.

Modelos estruturais de vigas-parede podem ser adotados na análise de, por exemplo, paredes de reservatórios de água, ou ainda, conforme apresenta Wight & Macgregor (2012), vigas de transição, as quais podem ser um recurso útil na acomodação da estrutura a disposições arquitetônicas, Figuras 1 e 2.

Figura 1: Viga parede com vão



Fonte: WIGHT & MACGREGOR (2012)

Figura 2: Viga-parede contínua



Fonte: WIGHT & MACGREGOR (2012)

2.2 Comportamento estrutural elástico-linear

Segundo Araújo (2010), em vigas-parede, não é mais aplicável a clássica hipótese das seções planas de Bernoulli, item 21 – Regiões especiais, ABNT NBR 6118 (2014). Como consequência disso, neste tipo de estrutura, as deformações específicas normais ε_{xx} , assim como as tensões correspondentes σ_{xx} , não possuem uma variação linear ao longo da altura da viga-parede, mesmo quando o material é considerado elástico-linear,

Leonhardt & Mönning (1978) apresentam um estudo sobre a influência da relação L/h na distribuição das tensões σ_{xx} e nas resultantes de tração F_t e compressão F_c , em vigas-parede biapoiadas com carga uniformemente distribuída no bordo superior. Nesse estudo, foi possível observar que:

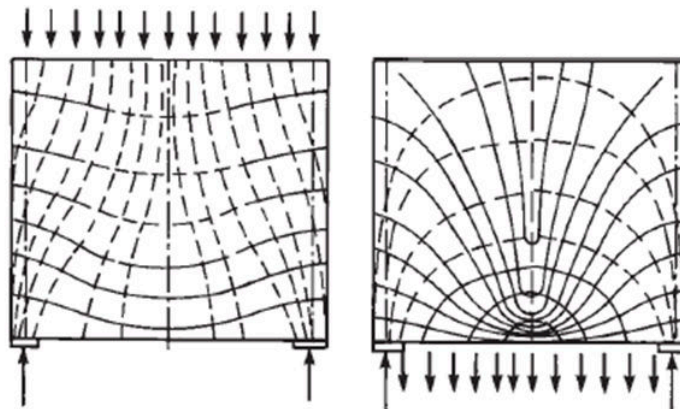
- Para relações L/h inferiores a 2, a distância entre as resultantes de tração de compressão (braço de alavanca Z), é claramente menor que a distância correspondente no modelo usual que considera a hipótese de Bernoulli;
- Para relações L/h inferiores a 1, o braço de alavanca Z diminui, enquanto que a resultante de tração relativa varia pouco, fato esse que demonstra que apenas a parte inferior da viga-parede, com altura aproximadamente igual ao vão, colabora para a resistência da estrutura, sendo, na prática, a parte superior correspondente a um carregamento adicional.

Alguns fatores que têm grande influência no comportamento das vigas-parede são o tipo de apoio (direto e indireto, sendo também relevante a existência de enrijecedores nos apoios) e o ponto de aplicação do carregamento (bordo superior ou inferior). Quanto aos apoios, deve-se ter atenção especial no caso de vigas hiperestáticas, pois os mesmos podem sofrer recalque, o que altera significativamente os esforços devido a grande rigidez das peças, Araújo (2010).

A Figura 3 mostra duas vigas-parede: uma submetida a um carregamento distribuído no bordo superior e a outra no inferior, onde, as linhas tracejadas representam as tensões principais de compressão e as linhas sólidas as tensões principais de tração. Por outro lado, a Figura 4 ilustra os padrões de fissuração típicos correspondentes, próximo à ruptura. Pode-se observar que as fissuras apresentam a tendência de ser perpendiculares às tensões principais de tração (ou seja, paralelas às tensões principais de compressão). De acordo com isso, segundo Leonhardt & Mönning (1978), em problemas práticos, é suficiente para o dimensionamento de chapas de concreto armado, conhecermos, aproximadamente, a direção e o valor das tensões principais no Estádio I (concreto não fissurado). Assim, as vigas-parede

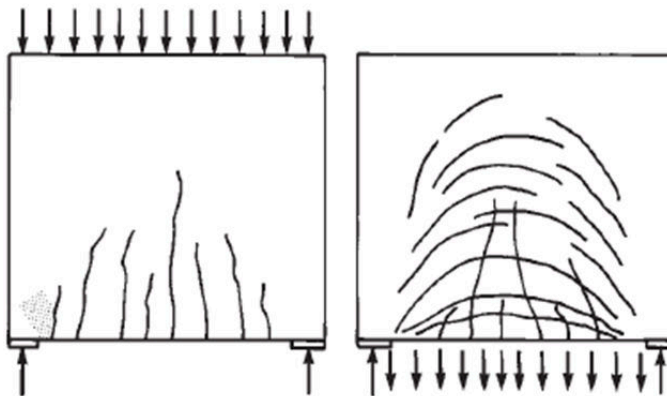
podem ser analisadas como um problema de estado plano de tensões (EPT), sendo possível utilizar técnicas numéricas, como o método dos elementos finitos (MEF), como será discutido no Capítulo 3. Contudo, de acordo com Araújo (2010), os esforços solicitantes nas vigas-parede usuais podem ser obtidos de forma satisfatória do mesmo modo que em vigas comuns.

Figura 3: Trajetórias das tensões principais em vigas-parede



Fonte: WIGHT & MACGREGOR (2012) (Adaptado)

Figura 4: Padrão de fissuração em vigas-parede



Fonte: WIGHT & MACGREGOR (2012) (Adaptado)

2.3 Tipos de rupturas e critérios de dimensionamento

De acordo com Leonhardt & Mönning (1978) apud Araújo (2010), através de ensaios experimentais realizados em vigas-parede de concreto armado, alguns modelos de rupturas foram estabelecidos:

- Escoamento da armadura longitudinal no banzo tracionado;
- Ruptura da ancoragem da armadura longitudinal do banzo tracionado;
- Esmagamento do concreto nas diagonais comprimidas próximas aos apoios, e;
- Ruptura da armadura de suspensão para as cargas suspensas.

A ABNT NBR 6118 (2014), no item 22.4.3, permite a consideração de modelos de cálculo elásticos lineares e não lineares, em elementos finitos, além de, para o dimensionamento ao estado limite último, modelos de bielas e tirantes, seção 2.3.3.

Essa subseção é dedicada à exposição da formulação referente ao dimensionamento de vigas-parede biapoiadas, segundo a literatura, em especial, Araújo (2010), a qual foi implementada em uma rotina de cálculo no software *Smath Studio*, presente no Anexo I.

2.3.1 Armadura do banzo tracionado

Resultados experimentais concluíram que os esforços de tração no banzo são aproximadamente constantes entre os apoios, não sendo válida a distribuição parabólica esforços, usual em vigas comuns, nem a aplicação de correspondentes técnicas de decalagem da armadura longitudinal. Com isso, a armadura deve ser dimensionada para o esforço máximo e ancorada de forma apropriada nos apoios, Leonhardt & Mönning (1978).

A área da armadura longitudinal de tração A_s é obtida através da razão entre o momento fletor de projeto M_d e o produto entre o braço de alavanca Z , que separa as resultantes de tração F_t e compressão F_c , e a tensão de escoamento de projeto do aço f_{yd} , conforme ilustrado na Figura 5.

$$A_s = \frac{M_d}{Z f_{yd}} \quad (1)$$

Segundo Leonhardt & Mönning (1978), para o dimensionamento, é suficiente considerar fórmulas empíricas aproximadas para o braço de alavanca Z , referentes ao Estádio I, Equações (2), (3) e (4), sendo que a adoção de um braço de alavanca relacionado ao Estádio II, que é maior que o do Estádio I, conduziria a uma armadura menor e maiores aberturas de fissuras, além de piores condições de ancoragem para as barras. Dessa forma:

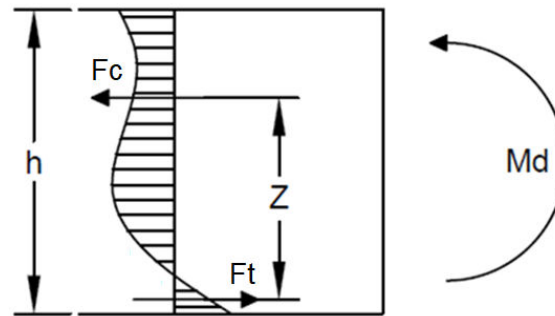
a) Viga-parede biapoiada:

$$Z = \begin{cases} 0.15h(3 + L/h) & \text{se } 1 < L/h < 2 \\ 0.60L & \text{se } L/h \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

b) Viga-parede de dois vãos:

$$Z = \begin{cases} 0.10h(2.5 + 2L/h) & \text{se } 1 < L/h < 2.5 \\ 0.45L & \text{se } L/h \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Figura 5: Componentes de forças em uma viga



Fonte: Autor

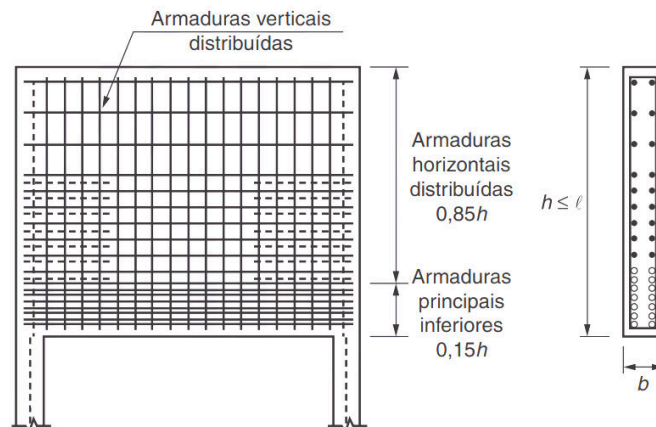
- c) Viga-parede contínua com mais de dois vãos: para os vãos extremos e os primeiros apoios intermediários adota-se os itens **a)** e **b)**, para os demais vãos e apoios, adota-se:

$$Z = \begin{cases} 0.15h(2 + L/h) & \text{se } 1 < L/h < 3 \\ 0.45L & \text{se } L/h \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Em vigas-parede biapoiadas, a armadura longitudinal de tração A_s deve ser distribuída em uma faixa de altura igual a $15\%h$, assim como mostrado na Figura 6, evitando-se concentração de armaduras em poucas camadas, sendo o valor de h limitado pelo valor do vão L , conforme a altura máxima estruturalmente colaborante, discutida na seção 2.2.

Além disso, segundo Araújo (2010), deve-se garantir a ancoragem nos apoios de no mínimo 80% da força correspondente ao escoamento da armadura longitudinal, $80\%A_s f_{yd}$. A ABNT NBR-6118 (2014) prescreve que nessa ancoragem não podem ser usados ganchos no plano vertical, dando-se preferência a laços ou grampos no plano horizontal, ou dispositivos especiais.

Figura 6: Distribuição da armadura do banzo tracionado



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Araújo (2010) apresenta uma formulação para o cálculo da armadura longitudinal mínima $A_{s,min}$, aplicando um fator corretor k_1 no momento de fissuração M_r , obtido com base em análises numéricas de vigas-parede biapoiadas, via elementos finitos, Tabela 1, sendo b a base da seção transversal da viga-parede:

Tabela 1: Fator corretor k_1

L/h	k_1
2,00	0,91
1,50	0,73
1,25	0,57
1,00	0,38

Fonte: Araújo (2010)

$$A_{s,min} = \frac{M_r}{Z f_{yd}} = k_1 \frac{b h^2}{6Z} \frac{f_{ct}}{f_{yd}} \quad (5)$$

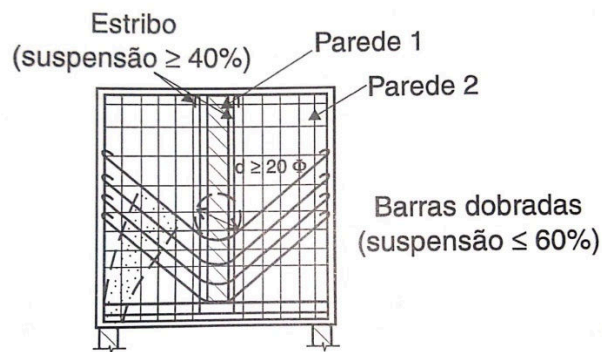
2.3.2 Armadura vertical

Quando existe um carregamento uniformemente distribuído ao longo da face inferior p_d da viga-parede faz-se necessário o emprego de uma armadura de suspensão A_{susp} formada por estribos verticais. Além disso, a parcela do peso próprio da viga-parede referente à porção inferior da estrutura também deve ser suspensa, sendo, portanto, sempre necessária armadura de suspensão, Leonhardt & Mönning (1978). Essa armadura, definida como a razão entre p_d e f_{yd} , deve envolver a armadura longitudinal e alcançar no mínimo uma altura maior que o menor valor entre L e h .

Segundo Fusco (1995), a suspensão das cargas concentradas indiretas pode ser dada via barras dobradas, as quais absorvem no máximo 60% da carga, conforme ilustra a Figura 7.

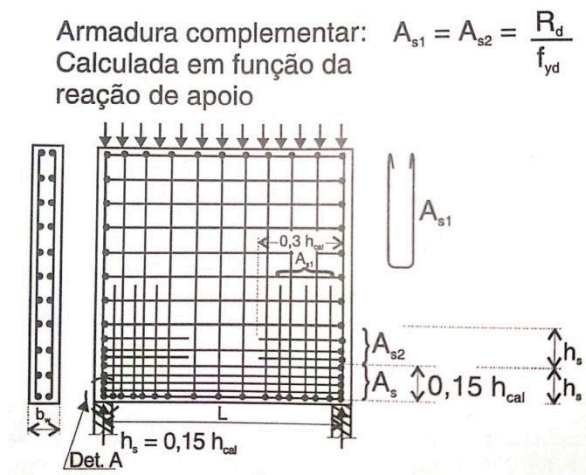
Em todo caso, de acordo com a ABNT NBR-6118 (2014), a armadura vertical deve respeitar um valor mínimo de $0.075\%b$, por face, por metro, tendo como valor mínimo para base da seção transversal 15 cm, conforme estabelece o item 13.2.2 da mesma norma. Por outro lado, Fusco (1995) recomenda o uso de no mínimo uma malha com taxa 0.10%, por face, nas duas direções, com espaçamento máximo igual a $2b$ ou $30cm$. A Figura 8 ilustra essa malha assim como as armaduras complementares A_{s1} e A_{s2} , calculadas com base na reação de apoio de projeto R_d .

Figura 7: Suspensão com barras dobradas



Fonte: Fusco (1995)

Figura 8: Suspensão com barras dobradas



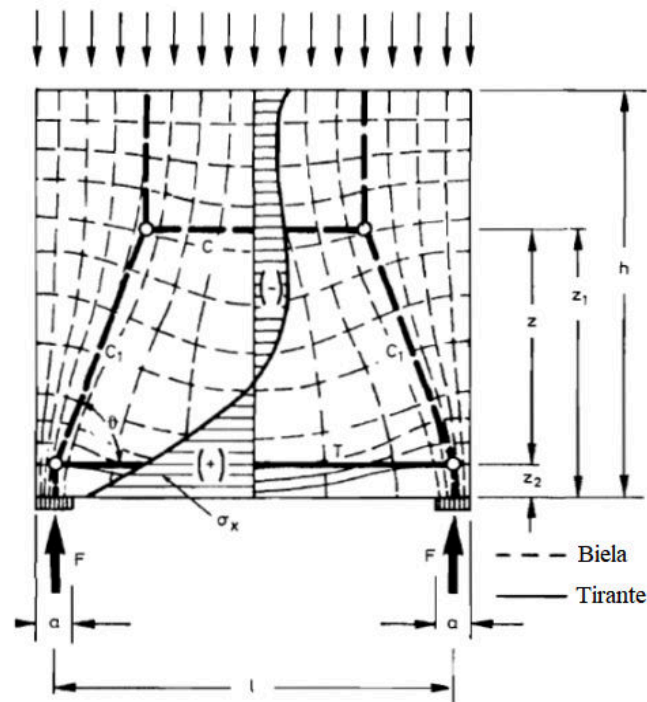
Fonte: Fusco (1995)

2.3.3 Verificação das tensões de compressão nos apoios

A ABNT NBR 6118 (2014) também permite o emprego de modelos de bielas e tirante no projeto de vigas-parede. Segundo Franco (2015), modelos de biela e tirante são representações discretas dos campos de tensões de tração (tirantes) e compressão (bielas), da estrutura. De acordo com Wight & Macgregor (2012), um modelo de biela e tirante deve, além de satisfazer as equações de equilíbrio, não exceder o critério de resistência correspondente, em nenhuma seção da estrutura, sendo essa uma estimativa do limite inferior da capacidade resistente real da estrutura (teorema do limite inferior da teoria da plasticidade). Além disso, segundo Souza (2004), para a aplicação apropriada desse teorema, deve-se garantir que o esmagamento do concreto nas escoras e regiões nodais ocorra após o escoamento da armadura. A Figura 9 mostra um modelo de cálculo usualmente utilizado para a verificação dos apoios de uma viga-parede biapoiada submetida a uma carga uniformemente

distribuída, onde, pode-se perceber o alinhamento entre o modelo de biela e tirante e as linhas de fluxo das tensões principais, sendo essa uma abordagem muitas vezes viável para traçar a geométrica do modelo de biela e tirante.

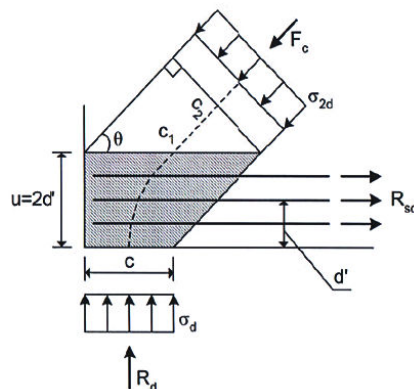
Figura 9: Modelo biela-tirante para uma viga-parede biapoiada



Fonte: SCHLAICH & SCHAFER (1991) apud Franco (2015)

A verificação do esmagamento do concreto é feita limitando-se as tensões de compressão nos apoios σ_d e σ_{2d} , ilustradas na Figura 10, a qual representa as tensões nos apoios da Figura 9.

Figura 10: Tensões nos apoios de extremidade



Fonte: Araújo (2010)

A tensão σ_d pode ser definida pela Equação (6), onde o parâmetro R_d é a reação do apoio, tida como metade do carregamento distribuído, e c é a largura do apoio.

$$\sigma_d = \frac{R_d}{bc} \quad (6)$$

Segundo Araújo (2010), aplicando o equilíbrio das forças verticais no nó do apoio, é possível determinar a tensão correspondente na biela de compressão σ_{2d} , Equação (7), onde é feito o uso de algumas transformações trigonométricas para a definição da distância c_2 , Equação (8), Figura 10, sendo a inclinação da biela de compressão θ definida para esse problema, com carga uniforme definida, como ilustra a Equação (9):

$$\sigma_{2d} = \frac{F_c}{bc_2} = \frac{R_d}{\text{sen}(\theta)bc_2} \quad (7)$$

$$c_2 = (c + 2d' \cdot \cot g(\theta)) \text{sen}(\theta) \quad (8)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{4Z}{L}\right) \quad (9)$$

O parâmetro d' é a distância entre o centróide das armaduras do banzo tracionado e a face inferior da viga-parede.

Conforme mencionado anteriormente, as tensões σ_d e σ_{2d} devem ser limitadas a fim de evitar o esmagamento do concreto na região do apoio:

$$\sigma_d \leq f_{cdr} = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (10)$$

$$\sigma_{2d} \leq f_{cdr} = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (11)$$

onde, conforme mostram as Equações (10) e (11), f_{cdr} é uma resistência obtida com base na minoração da resistência de projeto de concreto f_{cd} , obtida pela divisão da resistência característica de compressão f_{ck} , pelo coeficiente de redução apropriado. A minoração da resistência de projeto de concreto se justifica pelo efeito prejudicial das tensões de tração transversal, que surgem no material.

3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

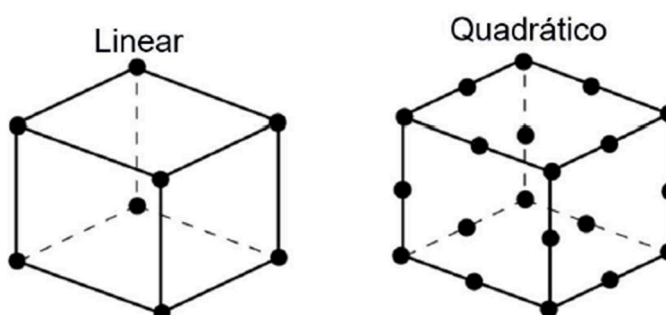
3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado em diversas áreas da engenharia, tais como: problemas acústicos, térmicos, eletromagnéticos, e, o foco deste trabalho, estruturais. Ele proporciona resultados que permitem identificar pontos de concentração de tensões, além do comportamento global da estrutura.

De acordo com Vaz (2011), o MEF estima os campos de deslocamentos da estrutura, através da discretização da mesma, em elementos finitos ou subdomínios, os quais usam funções de aproximação (funções de forma). Para obter-se um resultado melhor, pode ser necessário aumentar a quantidade de elementos (elevando o grau de discretização da estrutura) ou a utilização de outro elemento finito mais apropriado. A escolha correta do tipo de elemento para o seu problema faz com que sejam obtidos resultados mais adequados, facilitando a análise. De acordo com Simulia (2009), esses elementos são interligados por nós, que unidos formam a malha de elementos finitos que percorre toda a geometria da peça.

O presente trabalho faz uso, para análises lineares de vigas-parede, do software ABAQUS/CAE, versão estudantil, o qual dispõe de dois tipos de elementos: linear e quadrático, ilustrados na Figura 11. A principal diferença entre esses elementos é basicamente a quantidade de nós que cada um dispõe, e as correspondentes funções de forma. A análise computacional feita pelo software ABAQUS/CAE, versão estudantil, utiliza de diversos conceitos que necessitam de um conhecimento prévio necessário para que o modelador insira os dados de forma correta no software, e seja capaz de interpretar os resultados gerados e analisar se estes são condizentes com a realidade.

Figura 11: Tipos de elementos



Fonte: Simulia (2009)

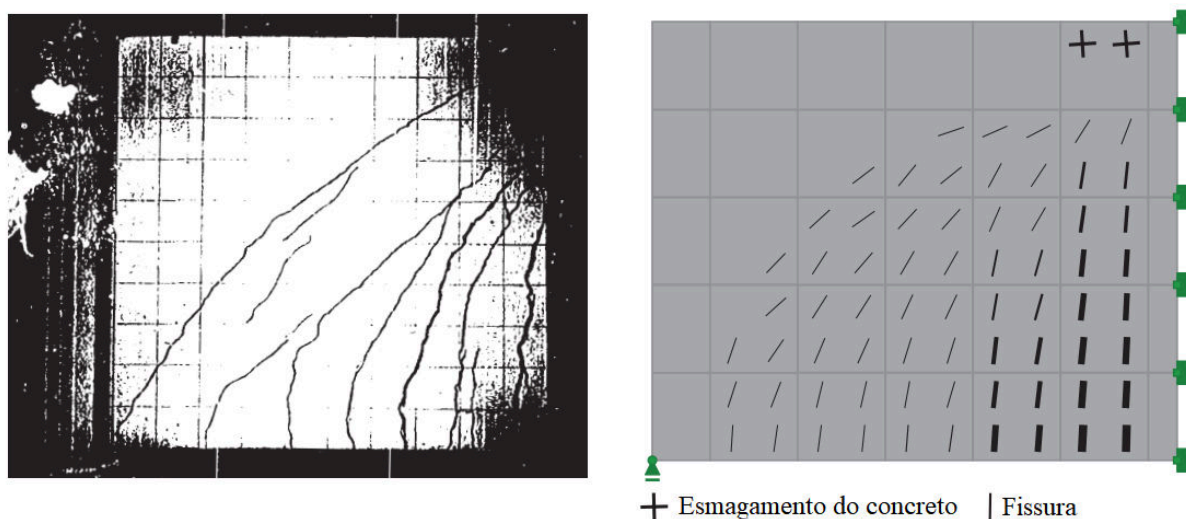
3.2 Análises não-lineares de estruturas de concreto armado via MEF

Desde a década de 90, de acordo com Vecchio (1990), os procedimentos para análises não-lineares de elementos de concreto armado têm alcançado um ótimo patamar de aceitação e desenvolvimento, podendo ser utilizados nos dimensionamentos estruturais. Esse tipo de análise usualmente faz uso de técnicas iterativa-incrementais, baseadas no método de Newton-Raphson para conseguir retratar a evolução do comportamento estrutural.

Porém, independente da abordagem escolhida, Vecchio (1990) comenta que a utilidade de qualquer procedimento depende de dois fatores chaves: a formulação deve incorporar diversas relações sobre o concreto e armadura que modelem de forma realista o comportamento da peça fissura; e a formulação deve ser compatível numericamente e estável para uma grande variedade de projetos e condições de carregamento.

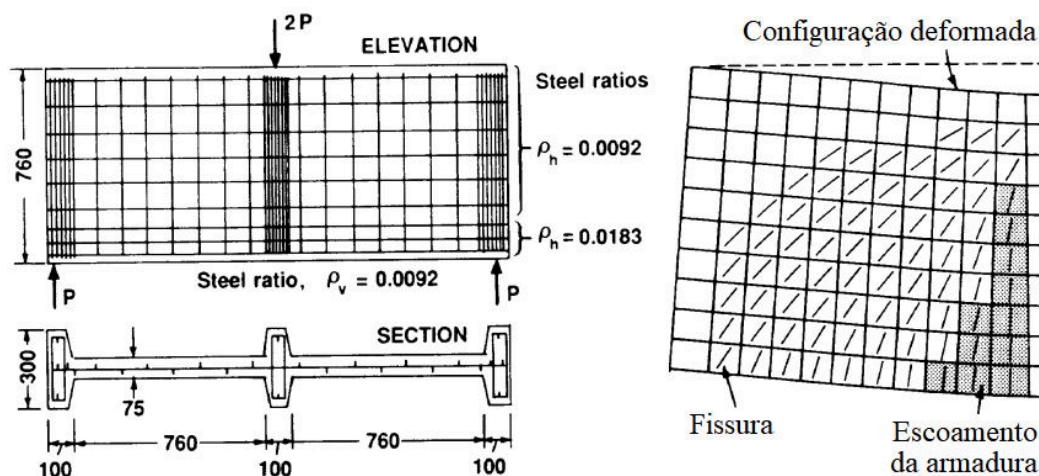
Com isso, Vecchio (1989) mostra que o comportamento das estruturas de concreto armado pode ser previsto precisamente através do MEF, desde que o modelo incorpore relações constitutivas realistas dos materiais que compõem a peça, pois isso pode ser mais importante para conseguir um bom resultado do que a própria formulação de elementos. Além disso, o pesquisador conclui que a análise não-linear obtida através do MEF pode ser uma ferramenta muito útil na investigação de detalhes de dimensionamento ou da relação carga-deformação de estruturas de concreto armado. As Figuras 12 e 13 ilustram os resultados obtidos durante análises não-linear de uma viga-parede, realizadas por Barrales (2012) e Vecchio (1990).

Figura 12: Resultado experimental e análise não-linear de uma viga-parede



Fonte: Barrales (2012)

Figura 13: Análise não-linear de viga-parede via elementos finitos



Fonte: Vecchio (1990)

Na análise ilustrada na Figura 13, foi feito uso da teoria do campo de compressão modificada (*Modified Compression Field Theory* - MCFT), onde o concreto fissurado se comporta como um novo material com suas próprias características de tração e compressão. De acordo com Vecchio & Collins (1988), essa teoria pode ser aplicada em análises de vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento, momento e carregamento axial, podendo ser utilizado em elementos com características geométricas e de carregamentos especiais, como é o caso da viga-parede.

Conforme ilustram essas figuras, a análise não-linear de vigas-parede de concreto armado consegue capturar comportamentos particulares da estrutura como a fissuração do concreto e o escoamento da armadura, tendo, inclusive, boa aderência a resultados experimentais. Contudo, essa acaba sendo uma alternativa mais custosa em termos de tempo de processamento computacional.

3.3 Modelagem computacional via MEF

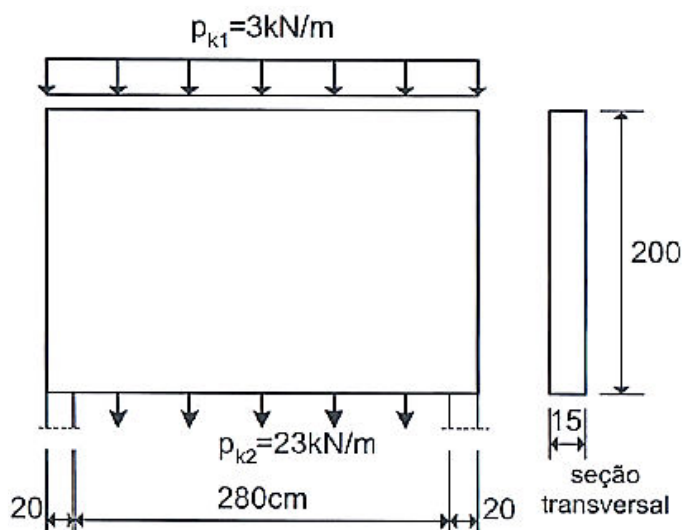
Conforme mencionado anteriormente, esse trabalho faz uso da versão estudantil do software ABAQUS/CAE. Consta no Anexo II, o procedimento de modelagem da viga-parede estudada no capítulo 4, utilizando essa ferramenta, onde são apresentadas as definições da geometria da estrutura, apoios, carregamento, característica da malha de elementos finitos, entre outros parâmetros da análise.

4 EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE

4.1 Memória de cálculo computacional

Com base na formulação exposta no Capítulo 2, referente ao dimensionamento de vigas-parede biapoiadas de concreto armado, foi implementada uma rotina de cálculo no software *Smath Studio*, presente no Anexo I. Consta nessa memória o exemplo de dimensionamento de vigas-parede biapoiadas proposto por Araújo (2010), Figura 14. Avaliando-se a rotina em anexo, pode-se concluir que a ferramenta desenvolvida demonstra ser uma opção vantajosa tanto para o dimensionamento das armaduras longitudinal e transversal da estrutura como também para a verificação do esmagamento do concreto, agregando eficiência no cálculo.

Figura 14: Geometria e carregamento da viga-parede



Fonte: Araújo (2010)

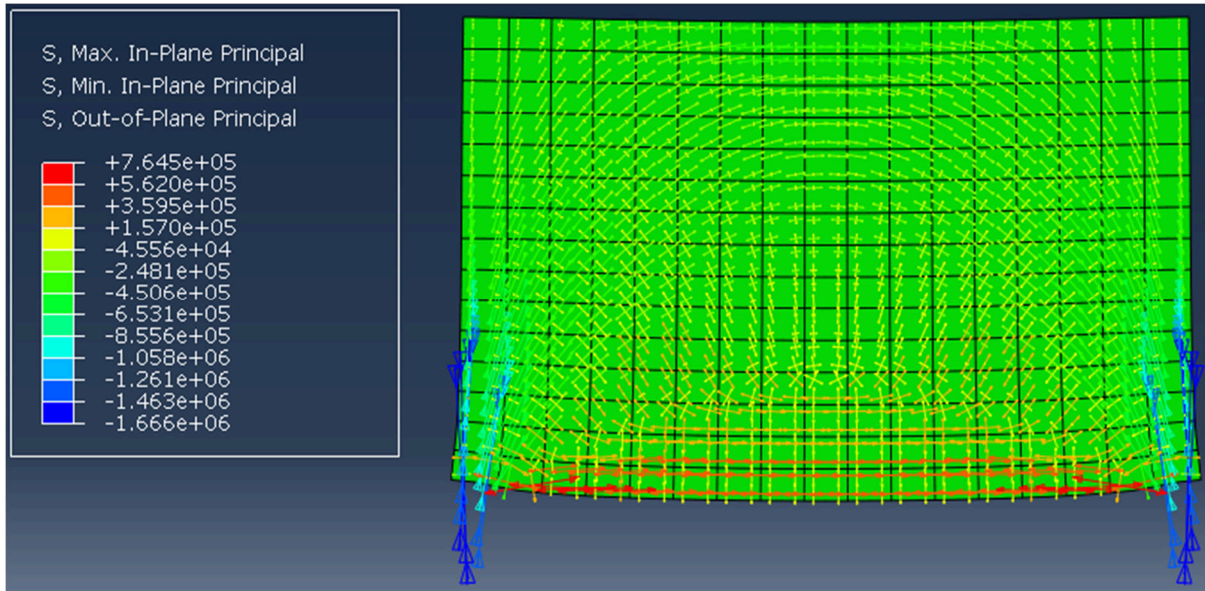
4.2 Exemplo de modelagem usando o ABAQUS/CAE

Consta no Anexo II, o procedimento de modelagem da viga-parede estudada da Figura 18, utilizando o ABAQUS/CAE, onde são apresentadas as definições da geometria da estrutura, apoios, carregamento, característica da malha de elementos finitos, entre outros parâmetros da análise. A modelagem realizada teve como base o trabalho de Araújo (2019).

Após a realização das etapas da modelagem, ilustradas no Anexo II, inicia-se a visualização dos resultados obtidos pelo software. Na Figura 15 está representada a

distribuição de tensões principais produzidas pelas cargas aplicadas à peça e ao lado está a legenda com a magnitude de cada vetor separada por cores.

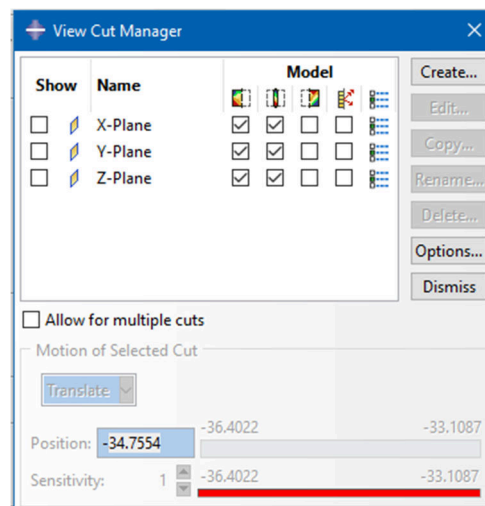
Figura 15: Distribuição de tensões na peça



Fonte: Autor

A tensão σ_{2d} que o carregamento está causando no apoio será um dos pontos de comparação entre os resultados da rotina de cálculo do Anexo I e do modelo calculado via MEF. Para isso, será criado um plano de corte na peça a fim de analisar com melhor precisão as tensões nesse ponto. Assim, seleciona-se no programa a opção *View Cut Manager* na caixa de ferramentas, sendo aberta uma nova janela, ilustrada na Figura 16.

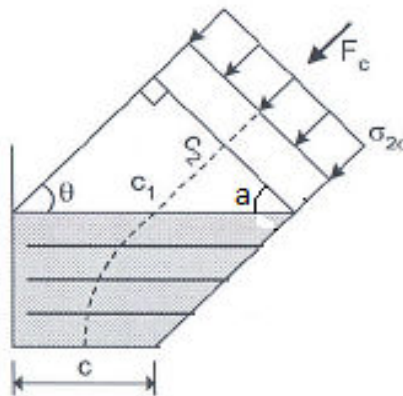
Figura 16: Criando o plano de corte



Fonte: Autor

Nessa janela, as coordenadas a serem inseridas foram obtidas com base na Figura 17 e na Equação 9, onde o ângulo da biela de compressão no apoio θ é aproximadamente 61° . Na ferramenta que cria o plano de corte na peça deve ser informado o ângulo α no lugar de θ , Figura 50, o qual pode ser obtido pela soma dos ângulos internos do triângulo, sendo, portanto, igual a 29° .

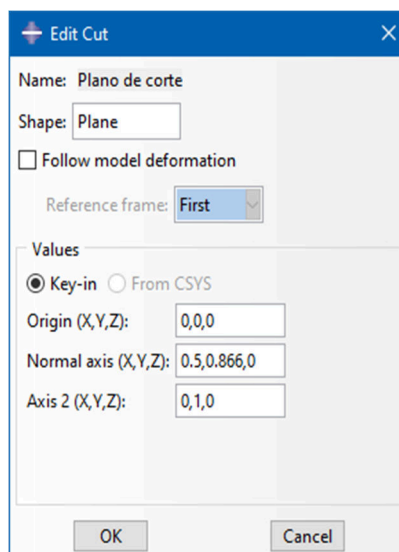
Figura 17: Determinação do ângulo do plano de corte



Fonte: Araújo (2010) (Adaptado)

Feito isso, seleciona-se em *Create* na janela *View Cut Manager* e a aba que será aberta de ser configurada conforme a Figura 18. Os valores que serão inseridos na opção *Normal Axis (X, Y, Z)* são provenientes dos cossenos diretores dos ângulos encontrados, ou seja, $\cos(61^\circ) = 0,4848$ e $\cos(29^\circ) = 0,8746$.

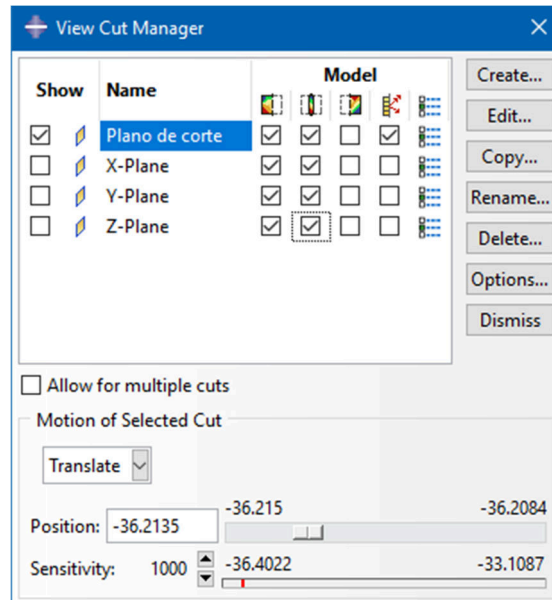
Figura 18: Configurando o plano de corte



Fonte: Autor

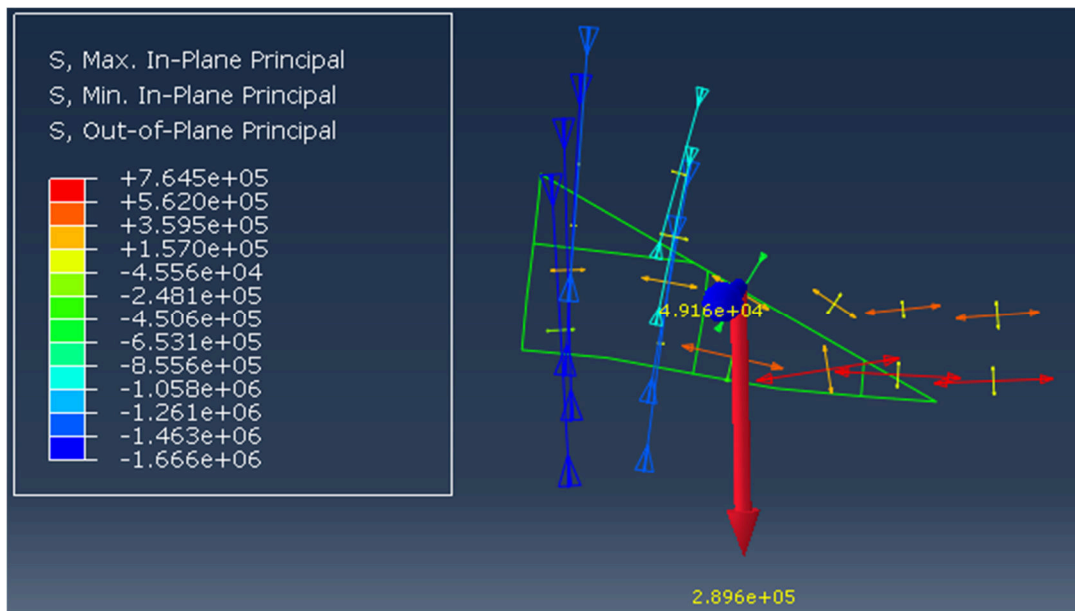
Após criar o plano de corte, movendo a barra *Position*, este deve ser ajustado de forma que fique o mais próximo possível de c_1 , Figura 20. Feito isso, a janela *View Cut Manager* deve ficar com as configurações da Figura 19.

Figura 19: Configuração final do View Cut Manager



Fonte: Autor

Figura 20: Detalhes das tensões do apoio

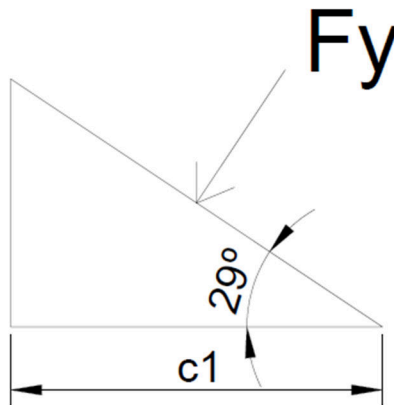


Fonte: Autor

Assim, para comparar os valores de σ_{2d} , toma-se o valor do vetor vermelho que representa a resultante das forças no plano de corte criado e calcula-se a sua componente normal ao plano F_y , Figura 21:

$$F_y = 289600N \cos(61^\circ) = 0.1404MN \quad (12)$$

Figura 21: Cálculo da componente F_y



Fonte: Autor

Portanto, tomando a dimensão c_1 , Figura 22, como $0,326\text{ m}$, para calcular a hipotenusa x do triângulo da Figura 21, obtemos:

$$x = c_1 / \cos(29^\circ) = 0.373m \quad (13)$$

Logo, para calcular a tensão causada no plano de corte ($\sigma_{2d.MEF}$), divide-se a força aplicada pela área (produto da base da viga pela hipotenusa):

$$\sigma_{2d.MEF} = F_y / bx = 2.51MPa \quad (14)$$

De posse dessas tensões avaliadas pela rotina do Anexo I e através do MEF, pode-se observar uma proximidade satisfatória entre os dois valores, tendo sido encontrado um erro associado próximo de 3,5%, entre os dois valores.

De acordo com o resultado obtido através da modelagem, percebe-se que a configuração das tensões de tração e compressão na viga-parede modelada guardam relação com a apresentada na Figura 3 deste trabalho.

4.3 Estudo paramétrico

Foi desenvolvido um estudo paramétrico com o intuito de avaliar o comportamento da viga-parede biapoiada, estudada por Araújo (2010), variando-se as cargas superior e inferior, e as dimensões da sua geometria, utilizando-se a memória de cálculo do Anexo I. As variações escolhidas e os resultados correspondentes estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados do estudo paramétrico em uma viga-parede

b (cm)	h (cm)	c (cm)	L interno (cm)	P superior (kN/m)	P inferior (kN/m)	As long (cm²)	As vert (cm²)	$\sigma_d/fcdr$	$\sigma_{2d}/fcdr$
15	200	20	280	3	23	0,9	1,5	0,29	0,32
15	300	20	280	3	23	0,75	1,5	0,32	0,36
15	200	15	280	3	23	0,87	1,5	0,38	0,40
20	200	20	280	3	23	0,97	2	0,23	0,26
15	200	20	200	3	23	0,53	1,5	0,21	0,23
15	200	20	280	3	0	0,28	1,5	0,09	0,10
15	200	20	280	0	23	0,82	1,5	0,27	0,29
15	200	20	280	0	0	0,2	1,5	0,06	0,07
20	300	15	300	3	23	0,9	2	0,38	0,39

Fonte: Autor

Pode-se concluir que, em relação ao problema original, o aumento da altura da viga-parede e a diminuição da largura do apoio, resultaram na redução da armadura longitudinal e crescimento das tensões nos apoios. O aumento da base da viga-parede elevou as armaduras longitudinal e vertical, e, reduziu as tensões nos apoios. Diminuindo-se o vão interno, tanto as armaduras como as tensões nos apoios decresceram. Como já era esperado, com os resultados apresentados na tabela, pode-se observar que a magnitude das cargas influencia diretamente na taxa de armadura longitudinal, que reduz quando uma das cargas aplicadas na peça é considerada zero. Desprezando-se os dois carregamentos (apenas peso próprio), nesse caso, as tensões dos apoios e armaduras são pequenas.

Esse tipo de análise, apesar de simples, contribui para que o engenheiro ganhe familiaridade com a formulação empregada no projeto, propiciando uma solução estrutural mais adequada.

5 CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho foi possível notar que a análise estrutural através da modelagem computacional é uma excelente ferramenta que proporciona resultados de precisão considerável. Através do Método dos Elementos Finitos (MEF), o software ABAQUS/CAE tornou possível a realização de uma análise sobre o comportamento em uma viga-parede.

Com isso foi possível realizar a comparação entre os valores das tensões de compressão nos apoios obtidas na memória de cálculo do Anexo I e na modelagem. A tensão de compressão no apoio (σ_{2d}), obtida analiticamente, foi de 2,6 MPa. Já a tensão obtida pela modelagem foi de 2,51 MPa. Chegando-se à conclusão de que a modelagem proporcionou um resultado satisfatório.

Foi possível também realizar a comparação da distribuição das tensões de tração e compressão geradas pelo carregamento distribuído entre a peça modelada no software e um esquema proposto por Wight & Macgregor (2012). Chegando-se à conclusão de que a distribuição de tensões resultante da modelagem se apresentou como previsto pelo esquema proposto.

Avaliando-se a rotina do Anexo I, pode-se concluir que a ferramenta demonstra ser uma opção interessante para o dimensionamento de vigas-parede. Além disso, durante o trabalho também foi feito um estudo paramétrico que permitiu observar o comportamento da viga-parede estudada em diversas situações de variação de carga superior inferior e diferentes na geometria. Com esse estudo paramétrico foi possível obter algumas conclusões, como: o aumento da altura da viga-parede e a diminuição da largura do apoio, resultaram na redução da armadura longitudinal e crescimento das tensões nos apoios; o aumento da base da viga-parede elevou as armaduras longitudinal e vertical, e, reduziu as tensões nos apoios.

Ao longo do processo de modelagem via MEF ficou evidente a importância de todas as etapas da simulação, pois estas têm a finalidade de tornar o modelo o mais fiel possível com a realidade. Foram adicionadas informações como propriedades mecânicas do material e estruturação da malha de elementos finitos para a obtenção de melhores resultados. A modelagem computacional é uma ótima ferramenta na melhoria do processo de dimensionamento de elementos estruturais, principalmente os elementos especiais, como as vigas-parede. Através dela, é possível obter resultados bastante satisfatórios, sendo um processo preciso e eficiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ARAÚJO, Joice Ferreira Nunes de. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas submetidas a carregamentos estáticos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Cabo de Santo Agostinho, 2019.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado, v. 4**. Rio de Janeiro: Dunas, 2010.

BARRALES, F. R. **Development of a Nonlinear Quadrilateral Layered Membrane Element with Drilling Degrees of Freedom and a Nonlinear Quadrilateral Thin Flat Layered Shell Element for the Modeling of Reinforced Concrete Walls**. 2012. Tese (Doutorado) — Faculty of the USC Graduate School, University of Southern California, Califórnia, 2012. Disponível em: https://144g4i11tdrn3j2cti9hn458-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/02/Dissertation_Barrales2012.pdf. Acesso em: 05 jan. 2022

DRIEMER, L.; ALVES, M.; MOURA, R. T. **Mecânica dos Sólidos Experimental**: tutorial ABAQUS. São Paulo, 2017

FRANCO, M. I. E. **Vigas-parede**: Comparação entre diferentes metodologias de cálculo. 2015. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/138304>. Acesso em: 15 jan. 2022.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de Armar as Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

LEONHARDT, F., MONNING, E. **Construções de concreto**: casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado, v. 2. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

SANTOS, Daniel Miranda. Dimensionamento de consolos de concreto com o auxílio de modelos de bielas e tirantes - Parte I: fundamentos. **Revista Techné**, São Paulo, mar. 2013. Disponível em: <http://technel17.pini.com.br/engenharia-civil/192/dimensionamento-de-consolos-de-concreto-com-o-auxilio-de-modelos-288028-1.apsx>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SCHLAICH, J. SCHÄFER, K. Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. **The Structural Engineer**, London, mar. 1991. Disponível em: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-69-\(published-in-1991\)/issue-6/design-and-detailing-of-structural-concrete-using/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-69-(published-in-1991)/issue-6/design-and-detailing-of-structural-concrete-using/). Acesso em: 14 jan. 2022.

SCHLAICH, J. WEISCHEDE, D. Detailing of Concrete Structures (in German). **Bulletin d'Information** 150. Paris, mar. 1982. Disponível em: <https://www.fib-international.org/publications/ceb-bulletins/detailing-of-concrete-structures-pdf-detail.html>. Acesso em: 10 jan. 2022.

SIMULIA 6.14. Getting started with Abaqus: interactive edition. Providence, RI, EUA: Dassault Sistemas. 2014. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/gsa/default.html>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SOUZA, R. A. de. **Concreto estrutural: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. Disponível em: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/12/tese_Rafael.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VECCHIO, Frank J., COLLINS, Michael P. Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using modified compression field theory. **ACI Structural Journal**, Michigan, mai. 1988. Disponível em: http://vectoranalysisgroup.com/journal_publications/jp4.pdf. Acesso em: 23 out. 2021.

VECCHIO, Frank J. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete membranes. **ACI Structural Journal**, Michigan, jan. 1989. Disponível em: http://vectoranalysisgroup.com/journal_publications/jp6.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

VECCHIO, Frank J. Reinforced concrete membrane element formulation. **Journal of Structural Engineering**, Reston, mar. 1990. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281990%29116%3A3%28730%29>. Acesso em: 20 jan. 2022

WIGHT, J K. MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. New Jersey: Pearson, 2012.

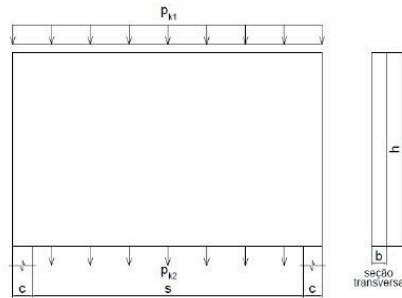
ANEXO I: MEMÓRIA DE CÁLCULO COMPUTACIONAL

□-1 - Apresentação

Rotina de cálculo com o intuito de analisar o comportamento de uma viga-parede submetida a um carregamento superior e um inferior. Através da rotina serão determinados dados relacionados a armadura, como taxa de armadura longitudinal e vertical, cálculo de ancoragem e as tensões nos apoios. Toda a formulação foi feita utilizando o software SMATH Studio, versão gratuita.

Referência: Araújo (2010).

Na Figura está a representação da viga parede que será analisada:



□-2 - Dados de entrada

2.1. Altura da viga: $h = 2 \text{ m}$

2.2. Espessura da viga: $b = 0,15 \text{ m}$

2.3. Largura dos apoios: $c = 0,20 \text{ m}$

2.4. Distância entre os apoios: $s = 2,80 \text{ m}$

2.5. Peso específico do concreto armado: $\gamma_{ca} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

2.6. Resistência do Concreto à Compressão: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

2.7. Coeficiente de minoração do concreto: $\gamma_c = 1,4$

2.8. Carregamento superior: $p_{k1} = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

2.9. Carregamento inferior: $p_{k2} = 23 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

2.10. Coeficiente de segurança: $\lambda = 1,4$

2.11. Tensão de escoamento do aço: $f_{yd} = 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

2.12. Cobrimento do aço: $cob = 2,5 \text{ cm}$

□-3 - Dados auxiliares

3.1. Peso próprio da estrutura: $p_{k3} = \gamma_{ca} \cdot b \cdot h = 7,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

3.2. Carga total de serviço: $p_k = p_{k1} + p_{k2} + p_{k3} = 33,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

3.3. Vão de cálculo: $l = s + c = 3 \text{ m}$

3.4. Limite de esbeltez: $\frac{l}{h} = 1,5$

3.5. Altura efetiva:
$$\begin{aligned} &\text{if } l < h \\ &\quad h_e = l \\ &\text{else} \\ &\quad h_e = h \\ &\quad h_e = 2 \text{ m} \end{aligned}$$

3.6. Resistência de cálculo do concreto à compressão: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 14,29 \text{ MPa}$

 ☐—4 - Rotina de Cálculo

4.1. Momento fletor de serviço na seção transversal:

$$M_k = \frac{p_k \cdot l^2}{8} = 37,69 \text{ kN m}$$

4.2. Reações de apoio:

$$R_k = \frac{p_k \cdot l}{2} = 50,25 \text{ kN}$$

4.3. Valor de cálculo do momento fletor:

$$M_d = \lambda \cdot M_k = 52,76 \text{ kN m}$$

4.4. Cálculo do braço de alavanca:

$$\begin{aligned} &\text{if } \left(1 < \frac{l}{h}\right) < 2 \\ &\quad Z = 0,15 \cdot h \cdot \left(3 + \frac{l}{h}\right) \\ &\text{else} \\ &\quad Z = 0,6 \cdot l \\ &Z = 1,35 \text{ m} \end{aligned}$$

4.5 Cálculo da área de aço da armadura longitudinal:

$$A_{sl} = \frac{M_d}{Z \cdot f_{yd}} = 0,9 \text{ cm}^2$$

4.6. Distribuição da armadura longitudinal:

$$\phi = 10 \text{ mm}$$

4.7. Cálculo da armadura de pele:

$$A_{sp} = 0,10 \cdot b = 1,5 \text{ cm}$$

4.8. Cálculo da área de aço da armadura vertical:

$$\begin{aligned} p_d &= \lambda \cdot p_{k2} = 32,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ A_{sv} &= \frac{p_d}{f_{yd}} = 0,7406 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \\ &\text{if } A_{sv} \leq A_{sp} \\ &\quad A_{svr} = A_{sp} \\ &\text{else} \\ &\quad A_{svr} = A_{sv} \\ &A_{svr} = 1,5 \text{ cm} \end{aligned}$$

4.9. Determinação da reação de apoio de cálculo:

$$R_d = \lambda \cdot R_k = 70,35 \text{ kN}$$

4.10. Inclinação da biela de compressão

$$\tan(\theta) = \frac{4 \cdot Z}{l} = 1,8 \quad \theta = 61 \text{ deg}$$

4.11. Distância do centróide da armadura do banzo tracionado até a face inferior da viga:

$$d' = cob + \phi = 3,5 \text{ m}$$

4.12. Altura do nó de apoio:

$$u = 2 \cdot d' = 7 \text{ m}$$

4.13. Tensão no apoio:

$$\sigma_d = \frac{R_d}{b \cdot c} = 2,345 \text{ MPa}$$

4.14 Tensão na biela inclinada:

$$\sigma_{2d} = \frac{R_d}{b \cdot (c + u \cdot \cot(\theta)) \cdot (\sin(\theta))^2} = 2,5674 \text{ MPa}$$

4.15 Resistência a compressão do concreto reduzida:

$$f_{cdr} = 0,60 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} = 7,8857 \text{ MPa}$$

4.16 Garantia da segurança contra o esmagamento da biela:

```
if u ≥ c · cot(θ)
  x = "sim"
else
  x = "não"
x = "não"
```

Então:

```
if x = "não"
  if σ2d ≤ fcdr
    a = "Seguro"
  else
    a = "Inseguro"
else
  if σd ≤ fcdr
    a = "Seguro"
  else
    a = "Inseguro"

a = "Seguro"
```

ANEXO II: EXEMPLO DE MODELAGEM USANDO O ABAQUS/CAE

O ABAQUS/CAE é um software da empresa 3DS utilizado na modelagem de elementos para a finalidade na qual está direcionado este trabalho. Foi utilizada a licença gratuita para estudante disponibilizada pela própria empresa em seu *website*. A seguir, será apresentado o procedimento de análise do exemplo analisado no Capítulo 4, proposto por Araújo (2010). A modelagem foi feita com base no trabalho de Araújo (2019), onde podem ser encontrados maiores detalhes desse tipo de processo.

A. Geometria

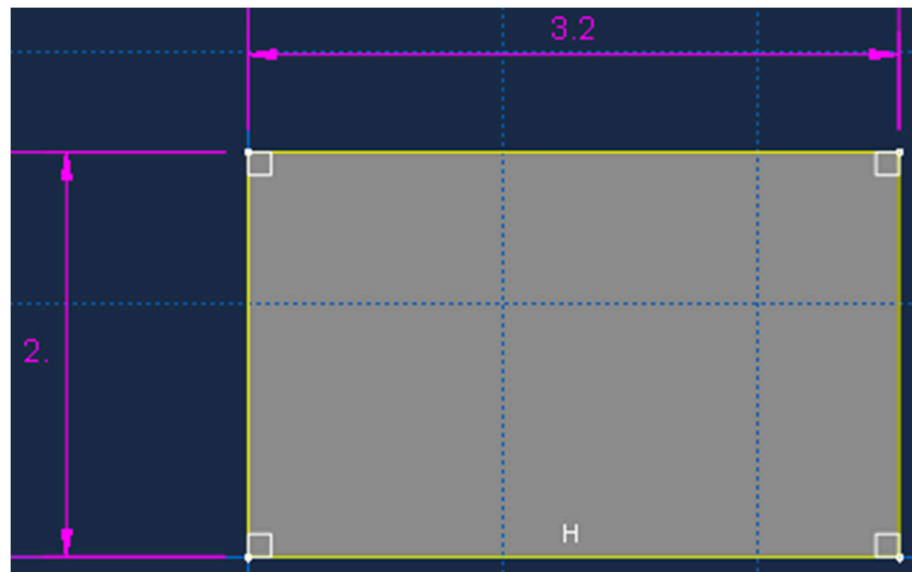
A primeira fase da modelagem é a determinação da geometria da peça. Seleciona-se a opção *Parts* na árvore do modelo, e, posteriormente, na janela *Create Part*, são inseridas algumas propriedades, como: o nome da peça, o espaço da modelagem, o comportamento do elemento ao sofrer um carregamento, onde foi escolhido para o estudo a opção *Deformable* (deformável), o formato da peça, sendo nesse caso escolhida a opção *shell* (casca) que, segundo Simula (2009), é utilizada quando o elemento modelado tem pelo menos uma das dimensões muito menor que as outras; e, por fim, a ordem de grandeza em que a peça será desenhada. Após isso, é feito o desenho do modelo utilizando a opção *Create lines: Rectangle (4 lines)*, como mostra a Figura 22.

Apesar do fato da viga-parede, nosso instrumento de estudo, ser tridimensional, foi adotado uma modelagem em 2D, a qual ajuda a contornar a limitação do software de mil nós a ser inseridos na malha de elementos finitos, devido a estarmos usando a versão estudantil. Segundo Simula (2009), usar uma malha de elementos apropriada durante a modelagem reduz consideravelmente o processamento e torna possível a utilização de uma malha mais refinada.

Antes de aplicar o carregamento ou os apoios no modelo, faz-se necessário seccionar a peça a fim de facilitar a aplicação das características no modelo. Na Figura 23 são ilustradas as seções que devem ser criadas, a fim de delimitar a região para aplicação dessas propriedades.

No módulo *Parts*, criam-se pontos ou planos de referência para serem a base dos cortes, utilizando a ferramenta *Tools*, na barra de menu e, na sequência, a opção *Datum*. Optou-se pela criação de pontos de referência, selecionando-se a opção *Offset from point*, que cria pontos novos a partir de pontos existentes. Estes pontos de referência auxiliarão no momento de aplicação dos apoios. Os mesmos devem ter um espaçamento de 20 cm a partir dos vértices inferiores da viga modelada (largura do apoio).

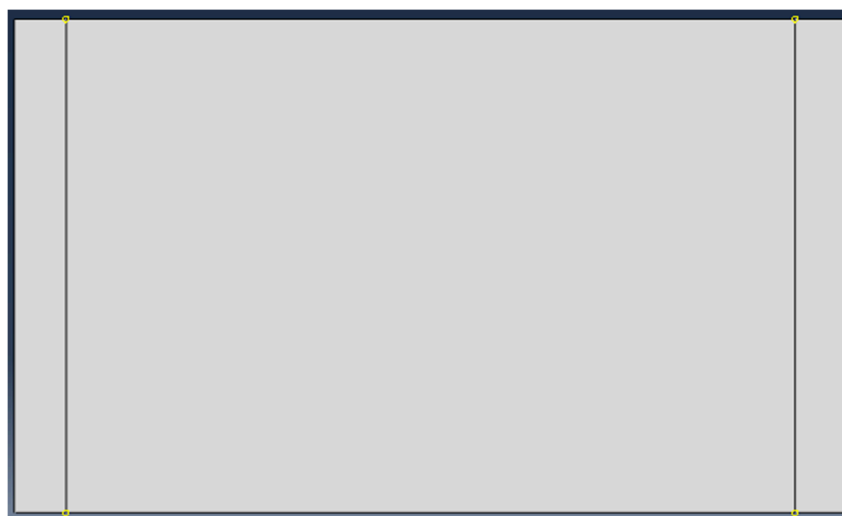
Figura 22: Dimensões em metros do elemento



Fonte: Autor

Após a criação dos pontos de referência, criam-se os cortes no modelo. Na caixa de ferramentas, clica-se em *Create Partition*, onde é selecionada a opção para cortes no modelo a partir dos pontos criados anteriormente (*use shortest path between 2 points*), e, posteriormente, selecionam-se os dois pontos de referência de onde serão feitos os cortes.

Figura 23: Seções do modelo



Fonte: Autor

B. Propriedades mecânicas

Neste passo serão atribuídas propriedades mecânicas e da seção transversal da viga-parede. No problema estudado, o concreto da viga-parede possui uma resistência característica f_{ck} igual a 20 MPa. Então, com base na Tabela 3, o concreto adotado é da classe C20, com isso, obtém-se o módulo de elasticidade do concreto que é igual a 21 GPa. Para o coeficiente de Poisson, seguiram-se as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014) e foi adotado o valor de 0,2.

Tabela 3: Módulo de elasticidade em função do f_{ck} do concreto (para granito como agregado graúdo)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47

Fonte: ABNT (2014) (Adaptado)

De posse desses parâmetros, clica-se em *Materials* na árvore do modelo, então na janela *Edit Material* é selecionado o comportamento mecânico elástico-linear, válido para pequenas deformações (Lei de Hooke). Feito isso, são atribuídos os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson descritos anteriormente.

Quanto às seções, para o modelo estudado foi adotada uma seção sólida e homogênea, pois se trata de uma peça de concreto. No módulo *section*, é escolhida a espessura da viga-parede igual a 0.15 m. A associação dessa propriedade na geometria desenhada anteriormente é feita em na opção *Assign section*, onde é necessário destacar que a espessura da geometria deve ser relacionada com a seção criada, selecionando a opção *From section*.

C. Referência no sistema global de coordenadas

A geometria desenhada apresenta um sistema de coordenadas independente. Com isso, utiliza-se o módulo *Assembly* (montagem), opção *Instances*, para inseri-la no sistema global de coordenadas. Esta etapa do procedimento é mais visível em modelos que possuem mais de um elemento, porém, mesmo este modelo possuindo apenas uma geometria, é indispensável a realização desta etapa, pois, de acordo com Driemeier (2017), é de grande importância o posicionamento da estrutura em relação a um referencial.

Figura 24: Propriedades mecânicas

Edit Material

Name: Concreto

Description:

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

☐ No compression

☐ No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	21.0E9	0.2

OK Cancel

Fonte: Autor

D. Etapas da análise do modelo

Nesta etapa serão estabelecidas as etapas de análise do modelo. De acordo com Simulia (2009), a sequência escolhida nesta etapa auxilia de forma positiva na captura das mudanças causadas no modelo, por exemplo, as deformações causadas pelos carregamentos. São usadas duas etapas: Inicial (aplicação das condições de contorno) e Carga (inserção dos carregamentos externos), a qual é associada com um carregamento estático.

E. Apoios

Nesta etapa será determinado o tipo de apoio do modelo, ou seja, as condições de contorno que restringem os graus de liberdade da estrutura. Para este exemplo, será considerado que a viga-parede está apoiada sob dois pilares, com comprimento L_p igual a 3 m. Com isso, é calculada a rigidez axial do pilar K , por metro quadrado:

$$K = \frac{E}{L_p} = \frac{21 \times 10^9 Pa}{3m} = 7000000 kN/m^3 \quad (15)$$

Para atribuir os apoios ao modelo, seleciona-se o ícone *Interactions*. Devido ao fato de terem sido escolhidos os apoios elásticos para este modelo, o software solicita a escolha da região onde será aplicado o apoio. Vale salientar que, para cada apoio deve ser criada uma interação com as mesmas configurações, porém distintas, a fim de garantir a independência dos graus de liberdade.

Após a seleção e confirmação do local onde será aplicado o apoio, aparecerá na área de instruções o espaço para inserir a rigidez calculada, no qual deve ser inserido o valor absoluto de K , sem unidade de medida, tendo em vista que o ABAQUS/CAE não apresenta um sistema de unidades padrão, sendo a cabo do modelador de compatibilizar as unidades.

A fim de evitar o deslocamento horizontal da viga, faz-se necessário a aplicação de um apoio no vértice inferior direito da viga. Para isso, na opção *BCs*, é escolhida a categorial *Mechanical (Displacement/Rotation)*, e, posteriormente, seleciona-se o ponto onde será aplicado o apoio, neste caso, o vértice inferior direito da peça, e aplica-se uma restrição do deslocamento *U1*.

F. Carregamento

Nesta viga-parede é aplicado um carregamento distribuído na parte superior q_{sup} de 3 kN/m e, na parte inferior q_{inf} , um carregamento distribuído de 23 kN/m. O peso próprio da viga-parede g_{peso} também é aplicado nesse modelo como um carregamento distribuído:

$$g_{peso} = \gamma_{conc} b h = 25 kN/m^3 \times 15 cm \times 2 m = 7.5 kN/m \quad (16)$$

onde: γ_{conc} – Peso específico do concreto armado;

b – Base da seção transversal da viga-parede;

h – Altura da seção transversal da viga-parede.

De forma a aplicar essas cargas no modelo como pressões uniformes, as cargas por metro serão divididas pela base da seção da viga-parede:

$$p_{peso} = g_{peso} / b = (7.5 kN/m) / (15 cm) = 50000 Pa \quad (17)$$

$$p_{sup} = q_{sup}/b = (3.0kN/m)/(15cm) = 20000Pa \quad (18)$$

$$p_{inf} = q_{inf}/b = (23.0kN/m)/(15cm) = 153333Pa \quad (19)$$

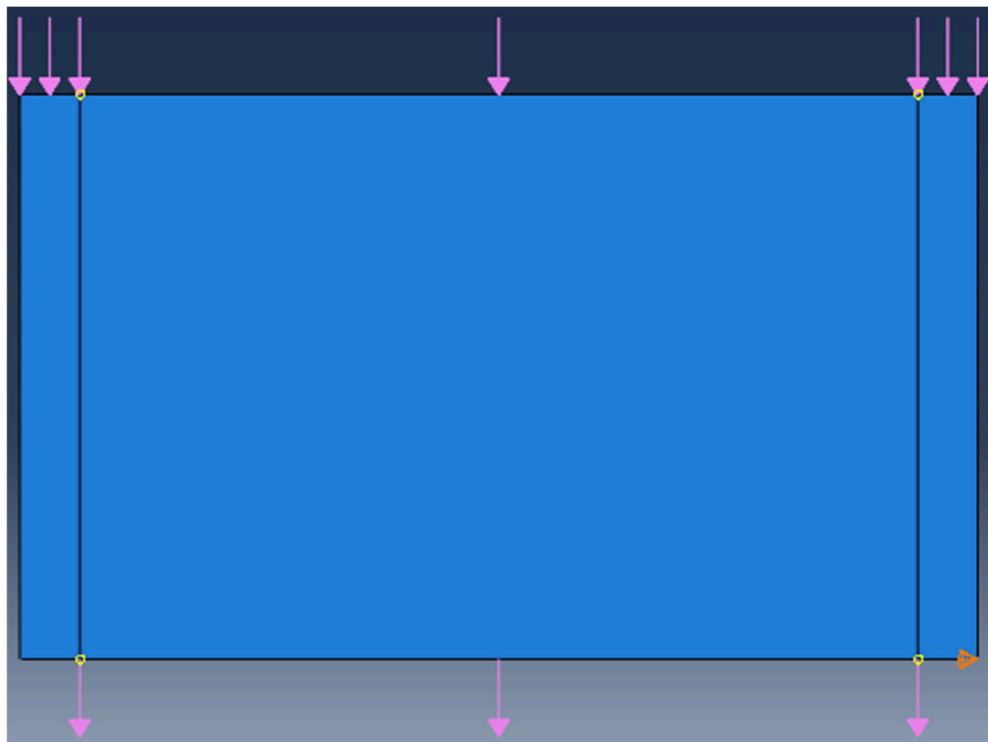
onde: p_{peso} – Pressão gerada pelo peso próprio da viga;

p_{sup} – Pressão aplicada na parte superior da viga;

p_{inf} – Pressão aplicada na parte inferior da viga.

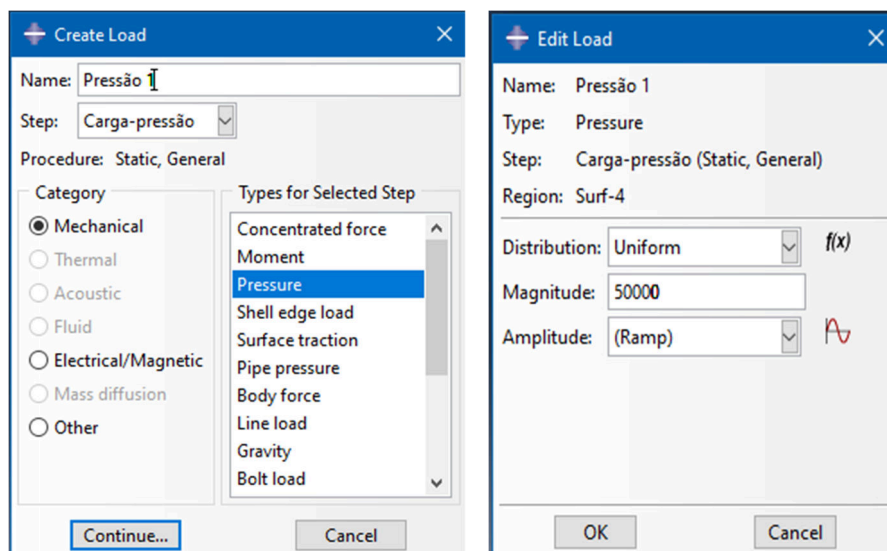
Para aplicação das pressões calculadas, utilizamos o módulo *Loads*, selecionando na opção *Step*, a categoria “Carga”, definida anteriormente, sendo essa a etapa onde a carga será aplicada. Feito isso, seleciona-se as regiões onde serão aplicados os carregamentos, Figura 25, sendo atribuídas as magnitudes das pressões calculadas acima. Esse procedimento é repetido para os três carregamentos, sendo ilustrado na Figura 26 para o caso do peso próprio.

Figura 25: Modelo após a aplicação das interações e da pressão



Fonte: Autor

Figura 26: Configuração da pressão gerada pelo peso próprio



Fonte: Autor

G. Criando a malha de elementos finitos

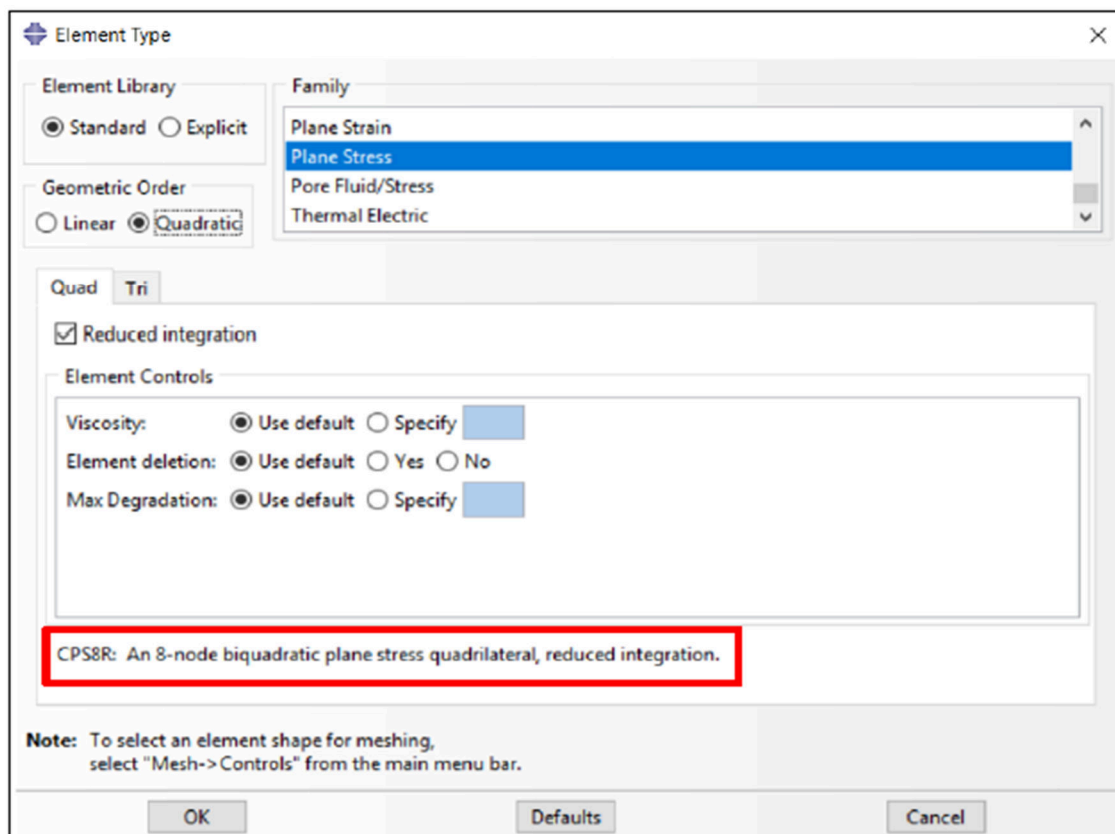
Antes da construção da malha de elementos finitos, faz-se necessário determinar anteriormente qual o tipo de elemento que será utilizado, quadrático ou linear, pois, assim como destacado por Simulia (2009), uma malha onde seria mais adequada a utilização do elemento quadrático, pode ser inadequado a escolha do elemento linear. Assim, para uma maior precisão dos resultados, para este modelo será escolhido o elemento quadrático para a criação da malha de elementos finitos.

Para criar a malha de elementos finitos, primeiro expandem-se os ícones *Parts* na árvore do modelo e, logo após, dentro do campo 'viga parede', selecionamos a opção *Mesh (Empty)*. Para determinação do tipo de elemento, no campo *Mesh*, na barra de menu, seleciona-se *Element Type*. Feito isso, na área de instruções aparecerá uma mensagem solicitando que seja selecionada a região que será associada ao tipo de elemento, então seleciona-se a viga completa. Em seguida, configura-se o elemento para estado plano de tensões, quadrático e com integração reduzida, de maneira análoga a Araújo (2019), Figura 27.

Seguindo com o procedimento, faz-se necessário definir qual dos três tipos de malha que será utilizado: *structured*, *sweep* ou *free*. Tal escolha influenciará na precisão requerida dos resultados e da topologia do modelo. Portanto, para este modelo, optou-se pela malha *structured* para todo o modelo, pois esta utiliza padrões de malha pré-estabelecidos, sendo aplicada para geometrias específicas, sendo essa técnica de geração automática de malha de

elemento uma das funcionalidades que garante praticidade na utilização desse tipo de ferramenta.

Figura 27: Elemento da malha

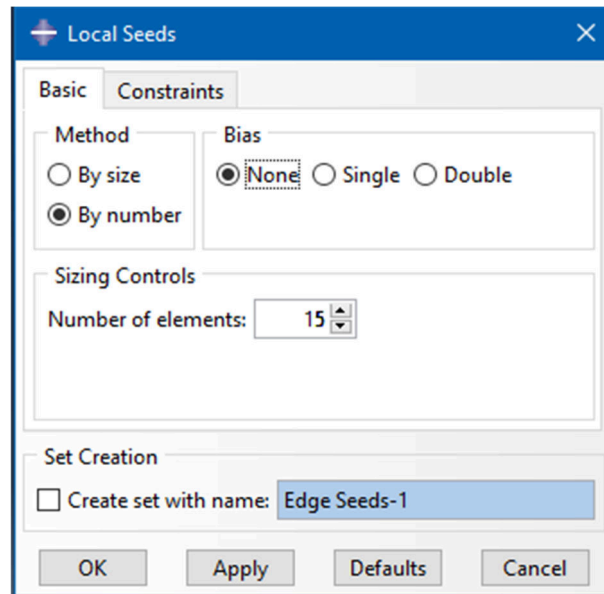


Fonte: Araújo (2019)

Na barra de menu a opção *Mesh*, logo após, *Controls*, seleciona-se toda a peça configura-se a malha como estruturada.

A malha de elementos finitos para este modelo foi estruturada de forma que os elementos ficassem o mais uniforme possível para que os resultados fossem satisfatórios, levando em consideração também a limitação de mil nós que a versão estudantil do software ABAQUS/CAE. Com isso, para a implantação da malha, no módulo *Mesh*, na opção *Seed Edges*, deve-se escolher a aresta para divisão. Seleciona-se em um dos segmentos verticais, por exemplo, abrindo uma nova aba que deve ser configurada com o número de elementos a serem atribuídos nesse bordo, Figura 28.

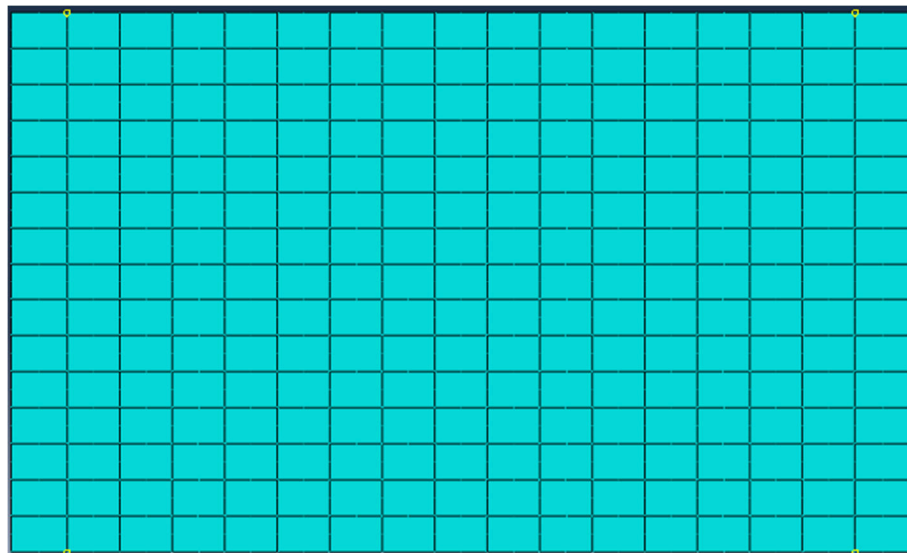
Figura 28: Quantidade de elementos



Fonte: Autor

Esta mesma quantidade de elementos deve ser repetida para todos os segmentos verticais e os dois segmentos horizontais da região central do modelo. Feito isso, é necessário atribuir a malha à peça, então, seleciona-se em *Mesh Part* na caixa de ferramentas. Após esse procedimento, a peça deve ficar com a malha igual à Figura 29.

Figura 29: Malha de elementos finitos



Fonte: Autor

H. Processamento

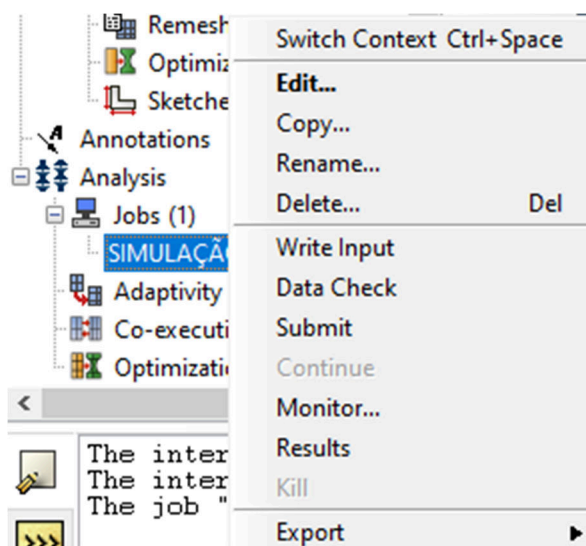
Após realizar todos os procedimentos citados até então, estará concluído o pré-processamento e o software terá todas as informações necessárias para simular o modelo construído. Através da aplicação do Método dos Elementos Finitos, o software é capaz de detectar falhas na modelagem que possam inviabilizar a simulação de diversos dados, tais como, deslocamentos e tensões principais.

Para o modelo criado foi utilizado o ABAQUS/STANDARD. Essa opção tem a finalidade de permitir o processamento dos dados através de solução implícita de um sistema de equações. Para dar início ao processamento, cria-se um trabalho de análise (*Job*) na árvore do modelo. Feito isso, clica-se no trabalho criado, denominado aqui de “Simulação”, com o botão direito, mostrando as opções possíveis, Figura 30. Cada uma dessas opções tem uma função específica, são elas:

- *Submit* - Submeter os dados inseridos na etapa de pré-processamento;
- *Monitor* - Monitora a convergência da solução e o tempo de duração do processo;
- *Results* - Visualiza as respostas (iniciando o pós-processamento);

As opções foram selecionadas na sequência listada acima, e, dessa forma inicia-se o pós-processamento, discutido no Capítulo 4.

Figura 30: Processamento



Fonte: Autor