



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO ARTHUR DE ARAÚJO MOURA

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ARMAÇÃO DE CONSOLO COM POSTERIOR  
FIXAÇÃO JUNTO AO PILAR**

MOSSORÓ

2023

FERNANDO ARTHUR DE ARAÚJO MOURA

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ARMAÇÃO DE CONSOLO COM POSTERIOR  
FIXAÇÃO JUNTO AO PILAR**

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

Orientador: Profa. Dra. Christiane Mylena Tavares de Menezes Gameleira

MOSSORÓ

2023

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

M929a Moura, Fernando Arthur de Araújo.  
ANÁLISE NUMÉRICA DA ARMAÇÃO DE CONSOLO COM  
POSTERIOR FIXAÇÃO JUNTO AO PILAR / Fernando  
Arthur de Araújo Moura. - 2023.  
51 f. : il.

Orientadora: Christiane Mylena Tavares de  
Menezes Gameleira.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,  
2023.

1. concreto pré-moldado. 2. consolo. 3.  
elementos finitos. I. Gameleira, Christiane  
Mylena Tavares de Menezes, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FERNANDO ARTHUR DE ARAÚJO MOURA

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ARMAÇÃO DE CONSOLO COM  
POSTERIOR FIXAÇÃO JUNTO AO PILAR**

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

Defendida em: 19 / 05 / 2023.

**BANCA EXAMINADORA**



Documento assinado digitalmente  
CHRISTIANE MYLENA TAVARES DE MENEZI  
Data: 19/05/2023 17:13:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Christiane Mylena Tavares de Menezes Gameleira  
Presidente



Documento assinado digitalmente  
RAIMUNDO GOMES DE AMORIM NETO  
Data: 20/05/2023 16:31:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Raimundo Gomes de Amorim Neto  
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente  
VALMIRO QUEFREN GAMELEIRA NUNES  
Data: 20/05/2023 14:40:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Valmiro Quefren Gameleira Nunes  
Membro Examinador

*Dedico este trabalho ao meu amado avô,  
Arrilton Fernandes (in memoriam), cujo  
esforço para me educar sempre foi máximo.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus, que me fez forte durante toda a minha jornada acadêmica e me ajudou a superar as adversidades da vida com fé e amor.

Aos meus pais, Cerivaldo e Ana, por me darem a vida e me fazerem entender a importância da educação na vida das pessoas em sociedade.

Aos meus avós, em especial os maternos, Arrilton e Maria, pelo amor, carinho e imagem de referência de valores que carregarei até o fim da minha vida.

Aos meus irmãos, Francisco e Caroline, por se fazerem meus companheiros mais antigos.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram, acreditaram em mim e me ajudaram com momentos de descontração.

A minha companheira, Eduarda, por ser meu ponto de equilíbrio frente aos desafios que me deparo ao decorrer da minha jornada.

A todos os professores que passaram por minha vida acadêmica até aqui, por todo o conhecimento repassado.

A professora Dra. Christiane, orientadora deste trabalho, que sempre acreditou no meu potencial e não me deixou abater frente as dificuldades encontradas no percurso.

Ao amigo, engenheiro civil e mestrando Vinicius Navarro que me ajudou em elucidações e discussões acerca do tema e *software* abordados.

Ao engenheiro civil João Felipe, pela disposição em fornecer dados de suma importância utilizados na construção do trabalho.

Ao engenheiro civil e amigo Jailson Moreira, pela oportunidade de vivenciar a engenharia civil como estagiário e como assistente.

A todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, na minha formação acadêmica e profissional.

## RESUMO

A indústria da construção civil cada vez mais se aproxima da pré-fabricação e um grande exemplo disso é a maior tendência a utilização de estruturas de concreto pré-moldado. É clara a busca de uma constante otimização nos processos intrínsecos a esse modelo de construção. Podendo-se citar a etapa de moldagem, onde as formas merecem atenção, uma vez que há grande repetição das peças, permitindo a reutilização destas. Um contraponto negativo que dificulta o reaproveitamento das formas é a concretagem de consolos junto aos pilares. Uma vez que existe variação dos pontos de inserção destes elementos de ligação ao longo do corpo dos pilares, acaba-se alterando a estrutura das formas através de recortes, furos e emendas. Entendendo a dificuldade citada se torna importante estudar mecanismos que permitam a moldagem dos consolos curtos em etapa posterior a moldagem dos pilares. É neste sentido que este estudo busca analisar a ligação pilar/consolo curto com posterior fixação da armadura por meio de análise computacional com *software* de simulação com elementos finitos. Adotou-se uma configuração de armação para o consolo comumente utilizada na região de estudo e verificou-se que a configuração proposta pode ser considerada tecnicamente viável, uma vez que respondeu bem aos incrementos de carga. Porém, entende-se que a interface consolo – pilar sofreu danos consideráveis, sendo necessário que se realize estudos com ensaios e outras simulações para melhor entendimento da segurança nessa interface.

**Palavras-chave:** concreto pré-moldado; consolo; elementos finitos.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Detalhes de armadura para consolos em diferentes tipos de peças.....                                     | 12 |
| Figura 2: Representação da consideração do modelo de bielas e tirantes. ....                                       | 17 |
| Figura 3: Representação da ideia do modelo atrito-cisalhamento. ....                                               | 18 |
| Figura 4: Aplicação do modelo atrito-cisalhamento ao dimensionamento de consolo muito curto. ....                  | 18 |
| Figura 5: Padrões de ruptura do consolo: (a) flexão; (b) fendilhamento da biela comprimida; (c) cisalhamento ..... | 19 |
| Figura 6: Famílias de elementos finitos do <i>software</i> ABAQUS. ....                                            | 22 |
| Figura 7: Modelo de ensaio da calibração. ....                                                                     | 23 |
| Figura 8: Detalhamento da armadura da estrutura de calibração. ....                                                | 24 |
| Figura 9: Interface do <i>software</i> ABAQUS - CDP Generator©. ....                                               | 25 |
| Figura 10: Modelos de cálculo para geração de dados ABAQUS - CDP Generator©. ....                                  | 26 |
| Figura 11: Módulo de elasticidade. ....                                                                            | 27 |
| Figura 12: Diagramas gerados pelo <i>software</i> ABAQUS – CDP Generator©. ....                                    | 28 |
| Figura 13: Esquematização do ensaio realizado sobre a estrutura. ....                                              | 30 |
| Figura 14: Representação dos roletes modelados no centro do topo dos consolos. ....                                | 30 |
| Figura 15: Representação do deslocamento aplicado no ponto de referência. ....                                     | 31 |
| Figura 16: Representação da malha criada para a estrutura. ....                                                    | 32 |
| Figura 17: Gráfico força x tempo gerado pelo ABAQUS. ....                                                          | 33 |
| Figura 18: Geometria adotada para o problema proposto. ....                                                        | 34 |
| Figura 19: Detalhamento de armadura para o problema proposto. ....                                                 | 36 |
| Figura 20: Módulo de elasticidade do concreto. ....                                                                | 37 |
| Figura 21: Diagramas gerados pelo <i>software</i> ABAQUS – CDP Generator©. ....                                    | 38 |
| Figura 22: Representação de apoio tipo engaste na base do pilar. ....                                              | 40 |
| Figura 23: Representação da aplicação do deslocamento no centro do consolo. ....                                   | 41 |
| Figura 24: Representação da malha criada para a estrutura. ....                                                    | 42 |
| Figura 25: Diagrama carga – tempo. ....                                                                            | 43 |
| Figura 26: Barras submetidas a análise de Von Mises. ....                                                          | 44 |
| Figura 27: Valores inerentes à análise de Von Mises.....                                                           | 45 |
| Figura 28: Diagrama tensão de Von Mises – tempo. ....                                                              | 46 |
| Figura 29: Representação do dano a tração no modelo. ....                                                          | 47 |



## LISTA DE QUADROS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1: Tensão de escoamento e ruptura das barras de aço. ....                         | 24 |
| Quadro 2: Parâmetros a serem inseridos no <i>software</i> ABAQUS – CDP Generator©. ....  | 27 |
| Quadro 3: Parâmetros para modelagem do material concreto no <i>software</i> ABAQUS. .... | 28 |
| Quadro 4: Elementos que compõem a malha da calibração. ....                              | 32 |
| Quadro 5: Informações levantadas acerca do problema proposto. ....                       | 34 |
| Quadro 6: Parâmetros a serem inseridos no <i>software</i> ABAQUS – CDP Generator©. ....  | 37 |
| Quadro 7: Elementos que compõem a malha do problema proposto. ....                       | 42 |

## SUMÁRIO

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                   | <b>10</b> |
| <b>1.1 Objetivos.....</b>                                                   | <b>10</b> |
| 1.1.1 Objetivo geral .....                                                  | 10        |
| 1.1.2 Objetivos específicos.....                                            | 10        |
| <b>1.2 Justificativa .....</b>                                              | <b>10</b> |
| <b>1.3 Metodologia.....</b>                                                 | <b>12</b> |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                         | <b>14</b> |
| <b>2.1 Considerações iniciais .....</b>                                     | <b>14</b> |
| <b>2.2 Estudo das ligações e seus elementos .....</b>                       | <b>14</b> |
| <b>2.3 Estudos dos consolos.....</b>                                        | <b>16</b> |
| 2.3.1 Modelos para dimensionamento de consolos curtos ou muito curtos ..... | 16        |
| 2.3.2 Formas de ruptura de um consolo de concreto .....                     | 18        |
| <b>2.4 Estudo da interface entre consolo e pilar .....</b>                  | <b>19</b> |
| <b>2.5 Ancoragem química.....</b>                                           | <b>20</b> |
| <b>2.6 Método dos elementos finitos.....</b>                                | <b>21</b> |
| <b>3 CALIBRAÇÃO DO MODELO.....</b>                                          | <b>23</b> |
| <b>3.1 Propriedades dos materiais .....</b>                                 | <b>23</b> |
| 3.1.1 Concreto .....                                                        | 23        |
| 3.1.2 Armação .....                                                         | 24        |
| <b>3.2 Modelo constitutivo .....</b>                                        | <b>24</b> |
| 3.2.1 Modelo constitutivo do concreto .....                                 | 25        |
| 3.2.2 Modelo constitutivo do aço .....                                      | 29        |
| <b>3.3 Interação.....</b>                                                   | <b>29</b> |
| <b>3.4 Condições de contorno e carregamento.....</b>                        | <b>29</b> |
| 3.4.1 Condições de contorno .....                                           | 29        |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.2 Carregamento.....                                    | 31        |
| <b>3.5 Definição da malha .....</b>                        | <b>31</b> |
| <b>3.6 Processamento.....</b>                              | <b>32</b> |
| <b>3.7 Resultado da calibração .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>4 MODELAGEM DO PROBLEMA PROPOSTO.....</b>               | <b>34</b> |
| <b>4.1 Propriedades dos materiais .....</b>                | <b>35</b> |
| 4.1.1 Concreto .....                                       | 35        |
| 4.1.2 Armação .....                                        | 35        |
| <b>4.2 Modelos constitutivos .....</b>                     | <b>36</b> |
| 4.2.1 Modelo constitutivo do concreto .....                | 36        |
| 4.2.2 Modelo constitutivo do aço .....                     | 38        |
| <b>4.3 Interação.....</b>                                  | <b>39</b> |
| <b>4.4 Condições de contorno e carregamento.....</b>       | <b>39</b> |
| 4.4.1 Condições de contorno .....                          | 39        |
| 4.4.2 Carregamento.....                                    | 40        |
| <b>4.5 Definição da malha .....</b>                        | <b>41</b> |
| <b>4.6 Processamento.....</b>                              | <b>42</b> |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                     | <b>43</b> |
| <b>5.1 Carga de ruptura.....</b>                           | <b>43</b> |
| <b>5.2 Distribuição de tensões na armação.....</b>         | <b>44</b> |
| <b>5.3 Distribuição do dano sofrido pelo concreto.....</b> | <b>46</b> |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                         | <b>48</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                    | <b>49</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vem se modernizando cada vez mais, de forma a se aproximar de outros setores industriais. Um exemplo dessa evolução está na pré-fabricação de elementos estruturais. A indústria de estruturas de concreto pré-moldado tenta trazer para a construção civil conceitos como o de linha de produção, minimização de perdas, replicabilidade dos produtos e otimização de processos de uma forma geral.

A etapa de moldagem é um dos pontos de atenção no quesito minimização de perdas. É comum a utilização de formas metálicas, que são mais duráveis, devido a grande reutilização destas. Para isso deve-se evitar a sua redução de vida útil devido a recortes para moldagem de elementos diferentes, como pode ocorrer na moldagem de consolos junto à pilares.

O presente trabalho buscou abordar uma hipótese de configuração de armação que permita moldar o consolo em etapa posterior ao pilar, evitando a problemática citada acima.

### 1.1 Objetivos

#### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica da utilização de um arranjo de armadura na moldagem de consolo curto a partir de modelagem numérica em *software* de elementos finitos.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Modelar uma estrutura composta de pilar e consolo já ensaiada por Rodrigues (2017) através do *software* de elementos finitos;
- Simular a estrutura de calibração;
- Calibrar o modelo a partir dos resultados de Rodrigues (2017) e da simulação;
- Modelar estrutura composta de pilar e consolo curto com armadura adotada e considerando moldagem em etapa distinta;
- Simular a estrutura modelada;
- Analisar os resultados encontrados na simulação;
- Analisar viabilidade técnica do uso da armação simulada.

### 1.2 Justificativa

Elementos pré-moldados, segundo a ABNT NBR 9062 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), são aqueles previamente moldados fora do local de utilização, podendo ainda se encaixar na categoria de pré-fabricado se este for executado em

instalações industriais permanentes e atender a alguns critérios de mão de obra e de qualidade. Ruiz (2019, p. 24) diz que “A aplicação de processos industrializados na construção começou há vários anos e é uma tendência importante no setor”. Com a afirmação anterior podemos atrelar essa tendência a crescente utilização das estruturas de concreto pré-moldado.

Diante da tendência à maior utilização de estruturas de concreto pré-moldado se faz necessário estudar constantemente as formas construtivas em todas as etapas da construção, desde as etapas de moldagem até a etapa de montagem, para buscar otimizações para o processo.

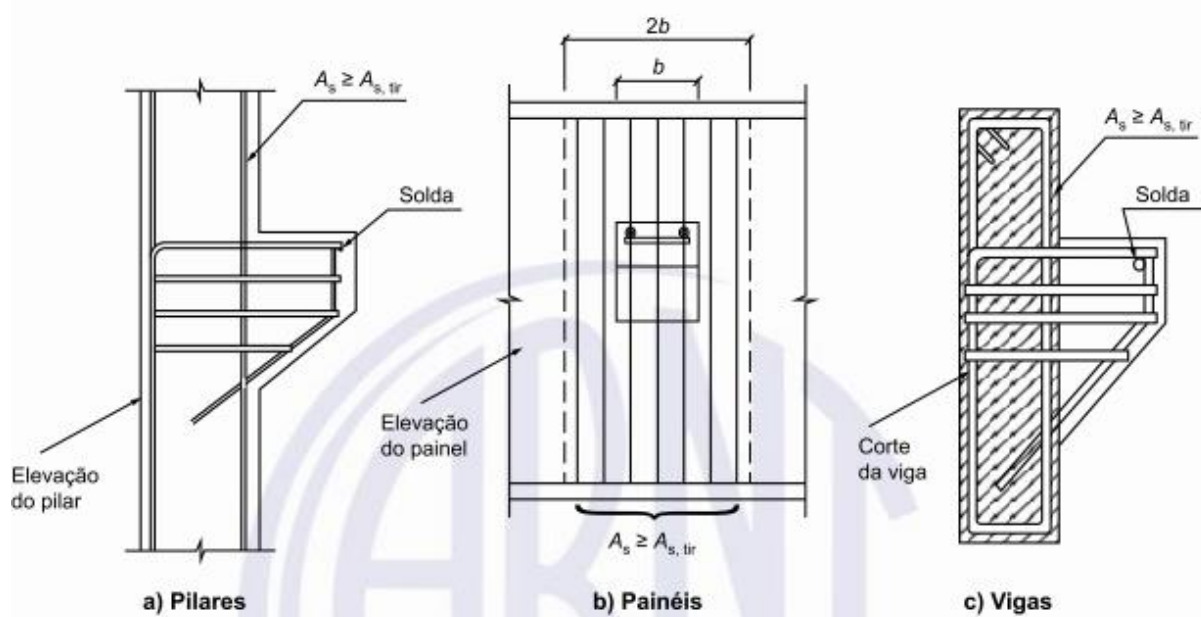
A execução de formas faz parte da etapa de moldagem e requer atenção especial, uma vez que elas devem ser projetadas para serem reutilizadas. Devido ao foco na repetição das geometrias, é necessário que as formas possuam estruturação capaz de receber o processo inúmeras vezes e que não seja alterada constantemente. Dessa forma, é preferível que não sejam feitos furos e recortes nas formas devido a alterações nos formatos dos elementos produzidos. (DASMASCENO *et al.*, 2018)

É comum a utilização de pórticos em estruturas pré-moldadas, como em galpões por exemplo. Na estruturação do pórtico é necessário que haja um elemento de ligação que transfira as cargas da viga para o pilar. Damasceno *et al.* (2018) diz que “Um dos tipos mais utilizados para ligação entre viga e pilar pré-moldado são os consolos, saliências nos pilares [...]”.

Devido aos consolos representarem saliências nos pilares, caso se deseje moldá-los na mesma etapa, se faz necessário adaptar a forma do pilar para recebe-lo. É comum que a posição dos consolos varie entre projetos, criando assim uma problemática acerca da constante alteração na estruturação das formas dos pilares. Por outro lado, a ABNT NBR 9062 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) traz em seu texto a metodologia de dimensionamento para os consolos que tem como resultado armaduras de tirantes com grande comprimento de ancoragem e armaduras de costura, o que dificulta a moldagem em etapa distinta ao pilar.

Devido as orientações de dimensionamento estabelecidas na norma e nas armaduras resultantes citadas acima e exemplificadas na Figura 1, a maneira ideal de se concretar os consolos curtos é em conjunto com o pilar. Isso acontece devido à dificuldade encontrada em ancorar posteriormente as barras de tirante e costura, inerentes ao elemento de ligação, ao pilar concretado.

**Figura 1: Detalhes de armadura para consolos em diferentes tipos de peças.**



**Fonte:** Adaptada ABNT NBR 9062, 2017.

Como foi mostrado anteriormente, existe problemática tanto para a moldagem de consolo em etapa distinta ao pilar como para moldagem conjunta. Seria interessante para a resolução desse impasse encontrar um modelo de armação que conseguisse ser ancorada quimicamente ao pilar previamente moldado, permitindo assim a fixação do consolo em etapa posterior.

O presente trabalho busca modelar um consolo com armadura diferente da mostrada na Figura 1 a partir de um *software* baseado no método dos elementos finitos, simulando um caso exequível a partir de ancoragem química. Entende-se que em caso de resultados satisfatórios, haverá grande contribuição acerca de uma discussão que se estende no ramo das estruturas pré-moldadas.

### 1.3 Metodologia

A princípio se adotou, a partir do trabalho de Rodrigues (2017), as dimensões do consolo muito curto e do pilar que foram modelados e simulados para a calibração do modelo, bem como suas respectivas armaduras. Seguiu-se com a modelagem e a simulação no *software* de elementos finitos ABAQUS e os resultados obtidos na simulação foram comparados com os resultados do ensaio de referência do autor citado, atestando assim a confiabilidade da modelagem.

Uma vez que o modelo esteve calibrado, pôde-se partir para a etapa de modelagem da estrutura objeto de estudo. As dimensões do consolo e da seção do pilar, assim como as armações utilizadas em ambos, foram adotadas a partir de padrão utilizado em uma empresa de

pré-moldados situada na cidade de Mossoró no estado do Rio Grande do Norte. Após modelada, a estrutura foi simulada e os valores encontrados foram analisados com o intuito de verificar a viabilidade técnica da utilização do modelo em questão.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações iniciais**

Na história da sociedade é possível perceber que “os processos de industrialização atingiram os mais diversos setores no final do século XVIII, entre eles o da construção civil.” (MARCO, 2015) Essa industrialização ocorreu em diferentes áreas, sendo a estrutural uma delas. Dentro da engenharia estrutural pode-se destacar a adoção das estruturas de concreto pré-moldado como um processo de destaque.

O concreto pré-moldado vem sendo cada vez mais utilizado, Marco (2015) explica essa procura devido ao sistema convencional demandar prazos maiores e estar sujeito a desperdício de materiais e mão de obra, atrasos, altos custos e etc. Em contrapartida, El Debs (2017) pontua alguns dos benefícios da adoção do concreto pré-moldado dentro da construção civil, como a diminuição do tempo da construção, melhor controle dos componentes pré-moldados e redução do desperdício de materiais de construção.

O projeto de concreto pré-moldado se diferencia do que é feito para estruturas moldadas *in loco*, uma vez que eles precisam ser moldados anteriormente, existem algumas etapas que precisam ser seguidas até que a estrutura esteja pronta para uso. Costa (2009) cita que as etapas de produção para esse tipo de estrutura se resumem basicamente à moldagem dos elementos estruturais, o transporte da fábrica até a obra, a montagem da estrutura e a realização das ligações entre as peças. Nos casos em que a estrutura for pré-moldada no próprio canteiro de obras, o transporte se limita entre o local da moldagem e o da montagem.

A última etapa do processo citado anteriormente seria a execução das ligações entre as peças pré-moldadas. Diferente das estruturas de concreto armado moldado no local, em que toda a estrutura é moldada de forma uniforme e monolítica, as estruturas de concreto pré-moldado devem ter suas ligações solidarizadas de outra forma, sendo então um dos pontos de atenção no processo em questão.

### **2.2 Estudo das ligações e seus elementos**

El Debs (2017) diz que as ligações são as partes mais importantes em um projeto de concreto pré-moldado. Essa afirmação surge devido ao autor considera-las como um dos pontos com maior aparecimento de problemas dentro deste sistema construtivo. Pensando a partir dessa ótica é correto afirmar que se deve conceber e dimensionar estes dispositivos com a devida atenção que eles merecem.

Dentre as ligações existentes em um projeto de estrutura de concreto pré-moldado, as ligações entre vigas e pilares podem ser consideradas as mais relevantes para El Debs (2017).



Elas podem ser rígidas, quando garantem a transferência de momentos fletores e maior resistência à edificação, ou articuladas, sem transmissão de momentos fletores e com estabilidade garantida basicamente pelos pilares. As ligações rígidas geralmente são executadas com a interação entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado no local, já as articuladas podem ser executadas com chumbadores ou chapas metálicas de fácil colocação. (SILVA, 2018)

Além das ligações rígidas e articuladas, existem também as ligações semirrígidas, sendo elas as que mais se assemelham aos comportamentos reais das estruturas que são executadas. Elas são chamadas assim porque transmitem parcialmente os esforços de momento fletor.

El Debs (2017) traz na sua literatura alguns diferentes modelos de ligação, diferenciando-se pelos recursos adotados para promover a solidarização das peças. Alguns exemplos que podem ser destacados são: Armaduras aparentes com concreto moldado no local; conectores metálicos, solda e parafusos; almofadas de apoio e material de alto desempenho. Os dois primeiros exemplos se aproximam da ligação rígida, enquanto que os outros dois agem criando superfícies de contato entre as peças que buscam uniformizar e transmitir as tensões, podendo ser considerados como semirrígidos ou articulados.

A ABNT NBR 9062 (2017) traz também a classificação das ligações a partir do tipo de esforço solicitante predominante. Sendo assim, as ligações podem ser classificadas como predominantemente solicitadas a compressão, a tração, a flexão e ao cisalhamento. Como foi dito anteriormente, as ligações mais relevantes são entre vigas e pilares e para este caso específico o mais comum é que se enquadrem na classificação de ligação predominantemente solicitada a compressão. Isso se dá devido ao apoio de peças pré-moldados sobre outras peças pré-moldadas ou sobre peças moldadas no local.

Ao se tratar de elementos de ligação que unem pilares e vigas, a ABNT NBR 9062 (2017) traz três tipos de elemento: consolos, ligação por meio de recortes nas extremidades nos elementos (dentes de apoio) e ligação por meio de apoio nas extremidades sem recortes de vigas. O primeiro deles está presente nos pilares e os outros dois estão presentes nas vigas. Sendo assim, é correto afirmar que eles agem em par, sendo necessário que o pilar possua o consolo de ligação e a viga possua um dos outros dois tipos de elementos, promovendo o apoio sobre o consolo com ou sem recorte da viga.

Para o presente trabalho o objetivo está na ligação a partir da ótica do consolo, sendo considerado apenas a aplicação da carga sobre ele, simulando a solicitação de uma viga apoiada. Além disso, será considerado que a ligação entre o consolo e a carga será por meio de almofada de apoio, sendo ela responsável pela distribuição da carga sobre a superfície do consolo.

## 2.3 Estudos dos consolos

Os consolos são elementos de ligação entre viga e pilar que podem ser definidos de acordo com Damasceno *et al.* (2018) como sendo saliências nos pilares que servem de apoio para que as vigas transmitam suas cargas. Já El Debs (2017) define consolo como “elementos estruturais que se projetam de pilares ou paredes para servir de apoio para outras partes da estrutura ou para cargas de utilização.”

Os consolos podem ser classificados a partir da razão entre as suas dimensões. Para os casos em que a razão entre a distância da força aplicada até a face do pilar ( $a$ ) e a altura útil do consolo ( $d$ ) for menor que 0,5, temos um consolo muito curto. Para casos em que a mesma razão resulte em valores entre 0,5 e 1,0, dizemos que o consolo é curto. Por fim, se a dada razão obtiver valores entre 1,0 e 2,0 temos um consolo longo. (EL DEBS, 2017)

Segundo Carvalho *et al.* (2016) não se deve dimensionar consolos curtos e muito curtos a partir da teoria da flexão. Isso acontece devido a impossibilidade de se desprezar as tensões cisalhantes presentes no consolo. Uma vez que o carregamento é aplicado no consolo de pequeno vão, as seções que antes eram planas, não permanecem planas, fenômeno esse que se difere do que ocorre com as vigas e, por conseguinte, com os consolos longos.

A partir da definição do tipo de consolo, a ABNT NBR 9062 (2017) indica a forma como o cálculo de dimensionamento deve seguir. Para os consolos longos dimensiona-se como se o mesmo fosse uma viga, prevalecendo esforços de flexão. Para os consolos curtos, dimensiona-se a partir do modelo das bielas e tirantes. Já os consolos muito curtos devem ser dimensionados a partir do modelo de atrito-cisalhamento. A forma de cálculo foi definida a partir do tipo de esforço predominante em cada caso. O consolo longo sofre com flexão devido a se assemelhar a uma viga em balanço. O consolo curto possui diagonais de tensão, semelhante ao que ocorre em treliças. Os consolos muito curtos possuem essa diagonal quase que vertical, sofrendo com ação de esforço cortante.

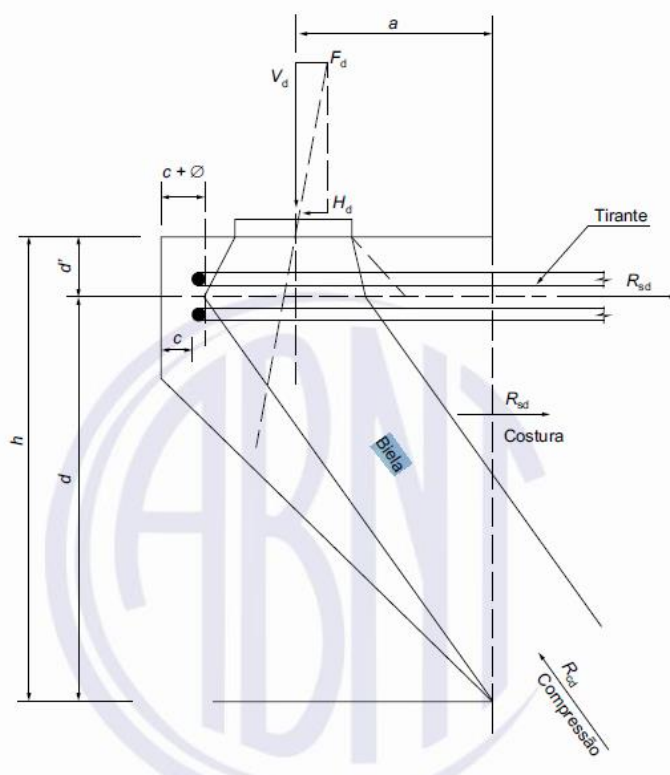
### 2.3.1 Modelos para dimensionamento de consolos curtos ou muito curtos

#### 2.3.1.1 Modelo das bielas e dos tirantes

Esse modelo de cálculo é o mais indicado quando se trabalha com consolos curtos. Segundo a ABNT NBR 9062 (2017) se deve dimensionar o consolo a partir do modelo usado para treliças de barras, estando uma tracionada (tirante) e uma comprimida (biela). A norma ainda indica que além dessas considerações, deve-se adotar obrigatoriamente armadura de costura.

Através da Figura 2 podemos perceber como funciona a armadura dimensionada pelo modelo de bielas e tirantes. A região inferior do consolo estará sujeita a ação de compressão, agindo como a biela comprimida do modelo e sendo resistida pelo concreto. Já a região superior do consolo estará sujeita a esforços de tração, sendo necessária a adição de armadura para o combate do esforço, uma vez que o concreto possui pouca resistência para combatê-lo. Ainda é possível perceber que a região de tensão se dá através de uma diagonal, onde o concreto abaixo dela não teria função estrutural, justificando assim a geometria adotada acima.

**Figura 2: Representação da consideração do modelo de bielas e tirantes.**

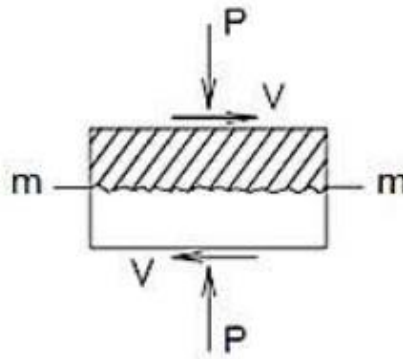


**Fonte: Adaptada ABNT NBR 9062, 2017.**

### 2.3.1.2 Modelo do atrito e cisalhamento

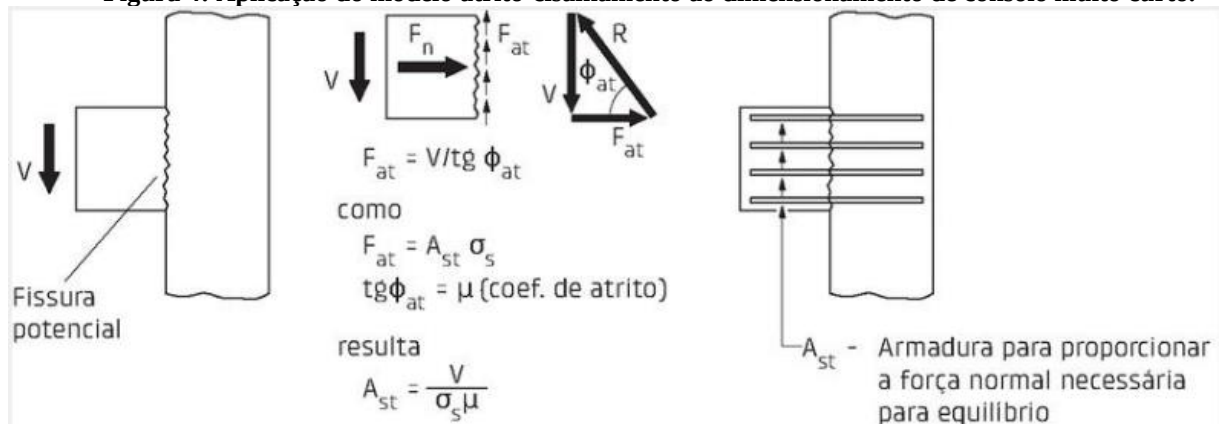
O modelo do atrito-cisalhamento considera que o principal esforço que agirá sobre o consolo é o cortante, causando assim o rasgamento na superfície entre consolo e pilar. O nome do modelo pode ser explicado por Pereira (2016) que explica no seu trabalho que o esforço cisalhante ( $V$ ) presente em um bloco de concreto é resistido pelo atrito causado pelo esforço normal ( $P$ ) perpendicular ao plano de deslizamento. Na Figura 3 podemos entender o esquema explicado acima e na Figura 4 podemos ver a aplicação do modelo atrito-cisalhamento para um consolo de concreto.

**Figura 3: Representação da ideia do modelo atrito-cisalhamento.**



Fonte: PEREIRA, 2016.

**Figura 4: Aplicação do modelo atrito-cisalhamento ao dimensionamento de consolo muito curto.**



Fonte: EL DEBS, 2017.

### 2.3.2 Formas de ruptura de um consolo de concreto

#### 2.3.2.1 Ruptura por flexão

Segundo Costa (2009) a ruptura por flexão é considerada o ideal do ponto de vista da segurança, uma vez que antes da ruína se apresenta grandes deformações e fissuras na estrutura, o que serve como um aviso do iminente colapso. Esse tipo de ruptura é caracterizado pela fissura de grande abertura localizada entre o consolo e o pilar, conforme podemos ver na Figura 5-a. Ainda segundo Costa, esse tipo de ruptura se dá devido ao escoamento das barras do tirante principal e esmagamento do concreto da biela.

#### 2.3.2.2 Ruptura por fendilhamento da biela comprimida

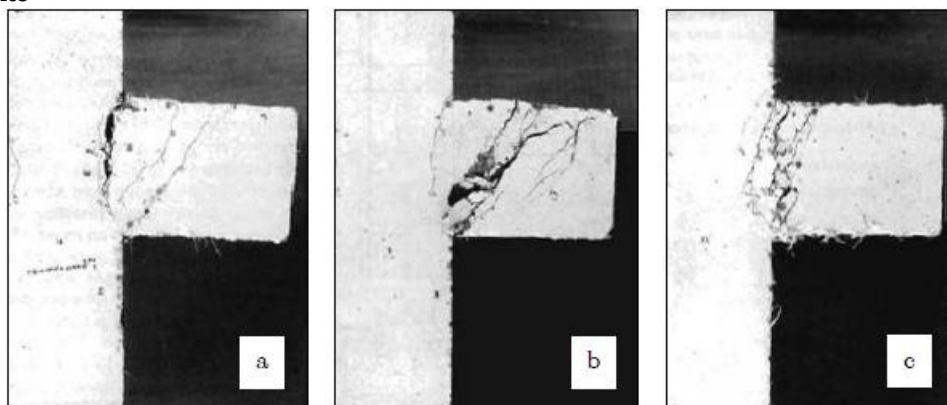
Podemos entender esse tipo de ruptura analisando primeiramente a sua denominação. Fendilhamento significa o aparecimento de fendas (fissuras). Ao se referir ao fendilhamento da biela comprimida, entende-se que o aparecimento de fendas se dá na região da biela que sofre compressão, conforme visto anteriormente. Ela pode ser identificada então através da fissuração

com angulação de aproximadamente  $45^\circ$  que liga a parte inferior da interface consolo-pilar ao ponto de aplicação da carga, conforme está ilustrado na Figura 5-b. (COSTA, 2009)

### 2.3.2.3 Ruptura por cisalhamento

A ruptura por cisalhamento “ocorre quando o ponto de aplicação do carregamento é muito próximo ao pilar, e o consolo sofre um escorregamento em relação ao pilar.” (COSTA, 2009) É possível perceber a partir da Figura 5-c a disposição em que a fissuração se apresenta ao longo do comprimento da interface consolo-pilar. Isso acontece devido ao aparecimento de múltiplas fissuras ao longo dessa interface. Esse tipo de ruptura pode ser associado aos consolos muito curtos, tendo efeito análogo ao considerado no cálculo pelo modelo do atrito-cisalhamento comentado anteriormente.

**Figura 5: Padrões de ruptura do consolo: (a) flexão; (b) fendilhamento da biela comprimida; (c) cisalhamento**



Fonte: HUGHES; FATTUHI, 1989 *apud* COSTA, 2009.

## 2.4 Estudo da interface entre consolo e pilar

Os consolos costumam representar um problema para a produção dentro da indústria de estruturas de concreto pré-moldado. Oliveira (2012) justifica essa problemática argumentando que “eles tendem a tornar intrincada a produção das peças (vigas, pilares ou paredes) que o possuem. Isso ocorre tanto devido às altas taxas de armadura normalmente existentes quanto à problemática da moldagem conjunta da peça com o consolo.”

Como existe a problemática acerca da moldagem do consolo em etapa conjunta a peça de suporte, surge como opção a moldagem em etapa distinta. Essa solução traz vantagens como a não necessidade de se cortar formas, a maior velocidade na produção e a possibilidade de padronização maior das peças principais, uma vez que existe uma grande variabilidade na localização dos consolos.

Quando o consolo é moldado em etapa distinta do pilar, torna-se importante analisar e estudar a interface que liga os dois concretos de idades diferentes, sendo o concreto do pilar moldado anteriormente e o concreto do consolo moldado dias após. É importante entender que a interface entre pilar e consolo sofre com as ações da fissuração. Costa (2009) traz em seu trabalho como forma de evitar combater essa fissuração a adoção de armadura de costura em alguns modelos e apenas fibras de aço em outros.

Oliveira (2012) traz em seu trabalho algumas formas diferentes de promover a solidarização entre as peças a partir da sua interface. Alguns exemplos ensaiados em seu trabalho são: a escarificação da superfície para aumentar a rugosidade da interface, promovendo maior aderência; apicoamento do concreto após a desmoldagem da forma para garantir a rugosidade; utilização de chave de cisalhamento com ou sem adição de resina epóxi. Dentre os métodos utilizados, a escarificação da superfície se torna interessante por poder ser utilizado em qualquer face do pilar após a sua concretagem, mesmo que essa face tenha sido concretada em contato com a forma.

Nos casos em que se realize o apicoamento ou a escarificação do concreto, é importante que se trate a junta de concretagem no momento em que se for moldar o consolo em etapa posterior. A literatura traz algumas formas de lidar com a junta de concretagem. O autor Sampaio (2010) ensaiou corpos de prova com juntas de concretagem realizadas apenas com a rugosidade conferida pelo apicoamento, com utilização de nata de cimento, com utilização de nata de cimento adicionada de sílica ativa e com utilização de adesivo epóxi, obtendo bons resultados.

## **2.5 Ancoragem química**

Se tratando de consolos moldados em etapa posterior a moldagem da peça pré-moldada de suporte, existem algumas diferentes formas de garantir a ancoragem das barras do consolo na estrutura em questão. A forma de ancoragem abordada neste trabalho será a química. Na literatura existem outras formas de se referir a esse tipo de ancoragem, como o termo chumbadores químicos ou fixadores químicos.

Nascimento (2017) define chumbador químico como “mistura de duas ou mais substâncias que, ao se misturarem, geram uma cadeia de reações químicas. O resultado dessa mistura cria uma substância homogênea com resistência maior que o substrato.” Esse conceito é importante para entender um pouco sobre a segurança da utilização desse método para unir materiais, uma vez que eles apresentam resistência maior que o próprio substrato. O mesmo

autor ainda cita como exemplo de aplicação a utilização em vergalhões de elementos pré-fabricados em interface de concreto moldado *in loco*.

Damasceno *et al.* (2016) chama de ancoragem química o conjunto de barra de aço e adesivo químico e explica que as barras ancoradas quimicamente e as barras concretadas de forma monoliticamente apresentam similaridades no que diz respeito a transferências de forças.

COOK *et al. apud* Damasceno *et al.* (2016) apresenta os fatores que podem influenciar na resistência de ancoragens químicas em barras submetidas a tração em concreto não fissurado, sendo eles: adesão do adesivo químico, onde ele cita que a força de adesão depende do produto utilizado; resistência do concreto, que cresce para concretos entre 20 e 40 MPa e decresce para concretos acima de 60 MPa; limpeza do furo, que influencia diretamente na resistência do produto; temperatura e retração, que quando elevados impactam negativamente no desempenho do adesivo.

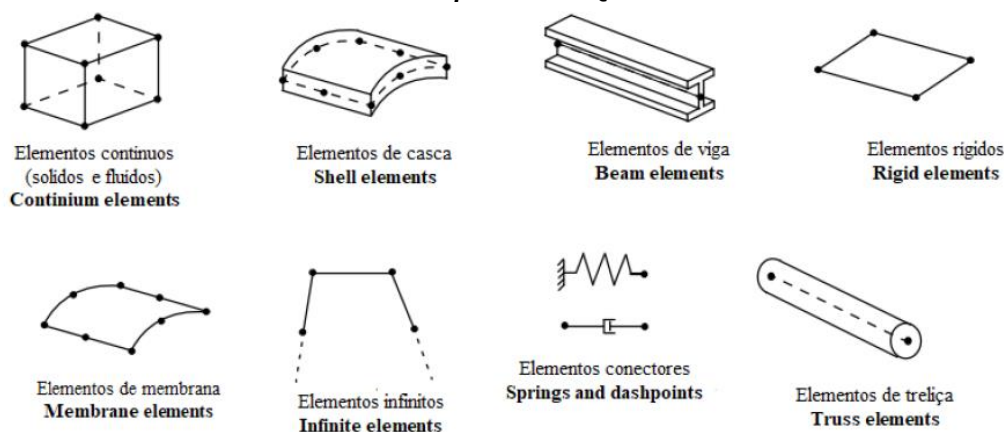
## 2.6 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste na subdivisão do domínio de integração de sólidos em um número finito de elementos, normalmente de forma retangular ou triangular, de características pré-definidas. Este método foi desenvolvido em 1909 por Walter Ritz com a intenção de “determinar resultados aproximados de problemas de sólidos deformáveis.” (CHIQUESI; PERGORETTI, 2020)

O autor Silva (2018) descreve o processo como a discretização da estrutura inicial em diversos elementos finitos. Esses elementos finitos são conectados por nós compartilhados formando uma malha e essa consegue representar uma aproximação numérica entre a geometria real da estrutura e o modelo a ser simulado.

A quantidade de elementos finitos e o seu tipo são de suma importância para a obtenção de bons resultados na simulação. Isso acontece porque a definição do tipo de elemento agrega características importantes para ele, como a sua geometria, a quantidade de graus de liberdade daquele elemento, o número de nós e a formulação e integração do elemento. O *software* ABAQUS, que é baseado no MEF e será utilizado por este trabalho, tem em sua galeria algumas famílias cadastradas, sendo as representadas na Figura 6 as principais. (SILVA, 2018)

**Figura 6: Famílias de elementos finitos do *software* ABAQUS.**



**Fonte: SILVA, 2018.**

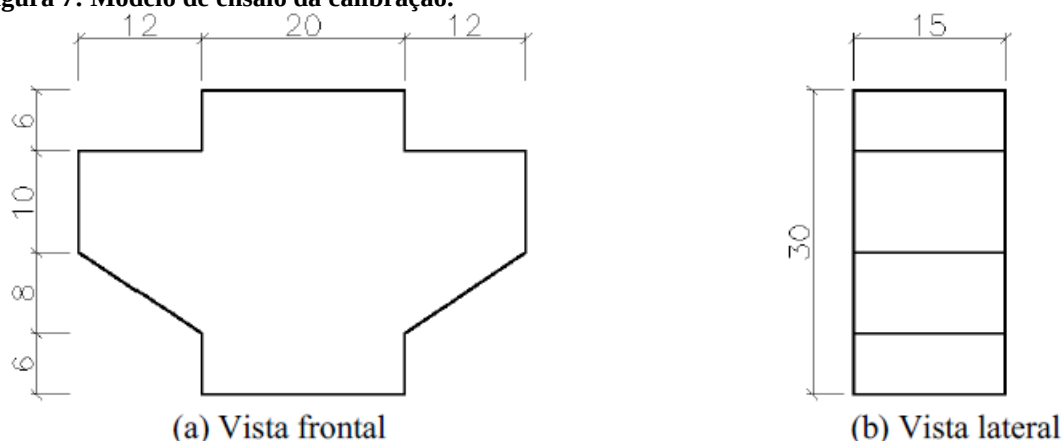
A definição dos graus de liberdade são as translações permitidas em cada nó, sendo importante para as análises de tensão/deformação, sendo possível definir translação em relação aos 3 eixos do modelo. Já a quantidade de nós se torna importante porque todos os cálculos do programa são realizados nos nós, então quanto mais nós, mais análises e mais desempenho a ser exigido pela máquina. O processo de escolha de quantidade de nós pode ser chamando de refinamento da malha, cabendo ao usuário pesar até onde o aumento da quantidade de nós é válido para o resultado da simulação. Por fim, a formulação e integração se refere a teoria matemática utilizada na simulação. Para o caso tratado no trabalho se utiliza a formulação Lagrangiana. (SILVA, 2018)



### 3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para realizar a calibração do modelo numérico, escolheu-se na literatura um trabalho que contasse com uma estrutura semelhante ao objeto de estudo desse trabalho, sendo ela submetida a ensaios. O intuito da calibração é mostrar que a estrutura modelada no *software* apresentará resultados suficientemente próximos aos obtidos em um ensaio real. O trabalho escolhido foi o de Rodrigues (2017), onde o autor ensaiou consolos duplos simétricos conforme pode-se observar na Figura 7.

**Figura 7: Modelo de ensaio da calibração.**



**Fonte: RODRIGUES, (2017).**

A primeira análise a se fazer da estrutura proposta do autor é a relação entre a altura útil (d) e a distância do pilar até o centro de aplicação da carga (a). O primeiro valor é igual a 15 cm e o segundo valor é igual a 6 cm, a razão  $a/d$  é de 0,4, enquadrando o consolo na categoria muito curto. Outro ponto importante a se frisar é que o autor ensaiou quatro variações da estrutura, tendo como diferenças a adição de fibras de aço e a presença de armadura de costura. O modelo adotado para a calibração foi o que não contém armadura de costura e que não foi adicionado de fibras de aço.

#### 3.1 Propriedades dos materiais

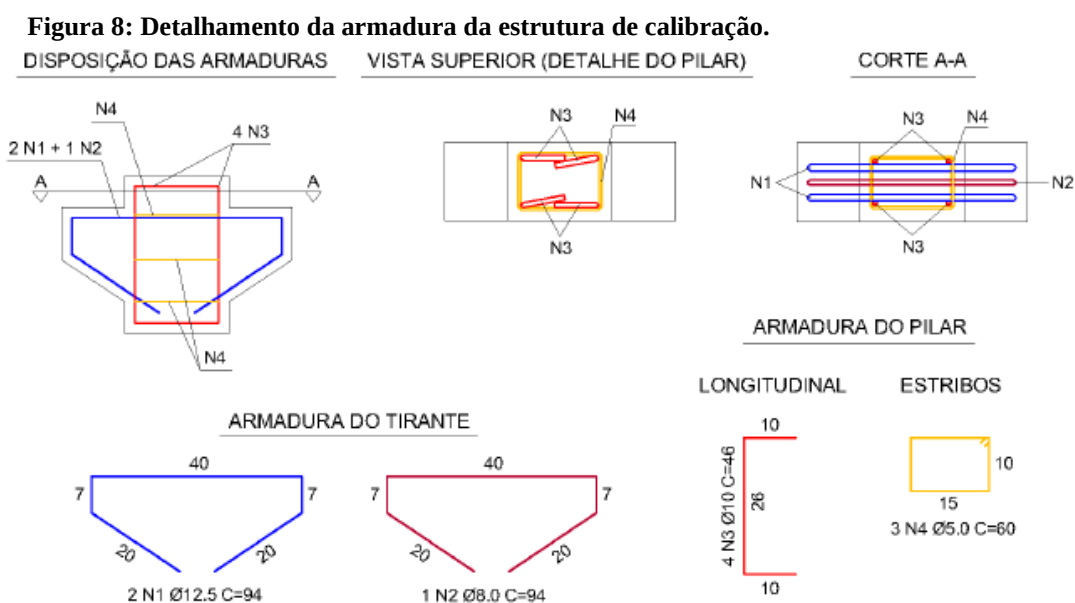
##### 3.1.1 Concreto

O concreto utilizado para a moldagem da estrutura foi dosado para um  $f_{ck}$  de 35 MPa, porém, devido à falta de tempo do autor o modelo foi ensaiado aos 22 dias. 2 corpos de prova do concreto utilizado foram submetidos a ensaio de compressão com prensa de acordo com recomendações da ABNT NBR 5739 (2007) aos 22 dias, obtendo resultado médio de 28,01 MPa. O autor não menciona ensaios de resistência a tração, sendo necessário então a adoção de valor teórico calculado a partir da equação 1 apresentada na ABNT NBR 6118 (2014).

$$f_{ct,m} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

### 3.1.2 Armação

A estrutura dimensionada pelo autor conta com 4 barras de aço CA-50 com bitola de 10 mm para a armadura longitudinal do pilar e 3 estribos com aço de CA-60 com bitola de 5 mm para armadura transversal do mesmo. Já como armadura do consolo foram utilizadas 3 barras de aço CA-50, sendo 2 delas com bitola de 12,5 mm nas extremidades e a outra com bitola de 8,0 mm entre as citadas anteriormente. É possível verificar a disposição das barras no detalhamento da armadura presenta na Figura 8.



Fonte: RODRIGUES, (2017).

Com exceção das barras utilizadas nos estribos, todas as outras foram ensaiadas pelo autor com o intuito de encontrar as tensões de escoamento e ruptura para cada uma delas. É possível verificar os resultados obtidos no Quadro 1. Como o aço CA-60 com bitola de 5 mm utilizado para composição dos estribos não foi ensaiado, adotou-se para efeitos de modelagem as tensões de escoamento e ruptura de 600 MPa, conforme indicado pelos fabricantes. Já para as barras ensaiadas, foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios.

**Quadro 1: Tensão de escoamento e ruptura das barras de aço.**

| Aço   | Diâmetro (mm) | Tensão de Escoamento (MPa) | Tensão de Ruptura (MPa) |
|-------|---------------|----------------------------|-------------------------|
| CA-50 | 8,0           | 586,8                      | 676,4                   |
|       | 10,0          | 522,0                      | 630,5                   |
|       | 12,5          | 511,5                      | 619,0                   |

Fonte: Adaptado de RODRIGUES, (2017).

### 3.2 Modelo constitutivo

Para modelar os materiais no *software* ABAQUS é necessário inserir as suas propriedades. O *software* apresenta uma biblioteca de possíveis materiais bastante vasta, contando com materiais como borrachas, metais, plásticos, espumas, concreto armado, entre

outros. Para a modelagem da calibração é necessário que se insira as propriedades do concreto utilizado e dos aços de diferentes bitolas.

Apenas os valores de resistência a compressão e a tração são insuficientes para que o *software* entenda e simule corretamente o comportamento dos materiais utilizados, sendo necessário se estabelecer curvas de ação a partir de modelos constitutivos.

### 3.2.1 Modelo constitutivo do concreto

O modelo utilizado dentro do *software* ABAQUS foi o *Concrete damaged plasticity* (CDP). Segundo Silva (2018) este modelo é “aplicável em situações onde o concreto está sujeito a carregamentos monotônicos, cíclicos e/ou dinâmicos com baixos níveis de confinamento”. O autor completa explicando que o termo é traduzido como “concreto com dano plástico” e que é baseado na teoria da plasticidade e na mecânica do dano contínuo.

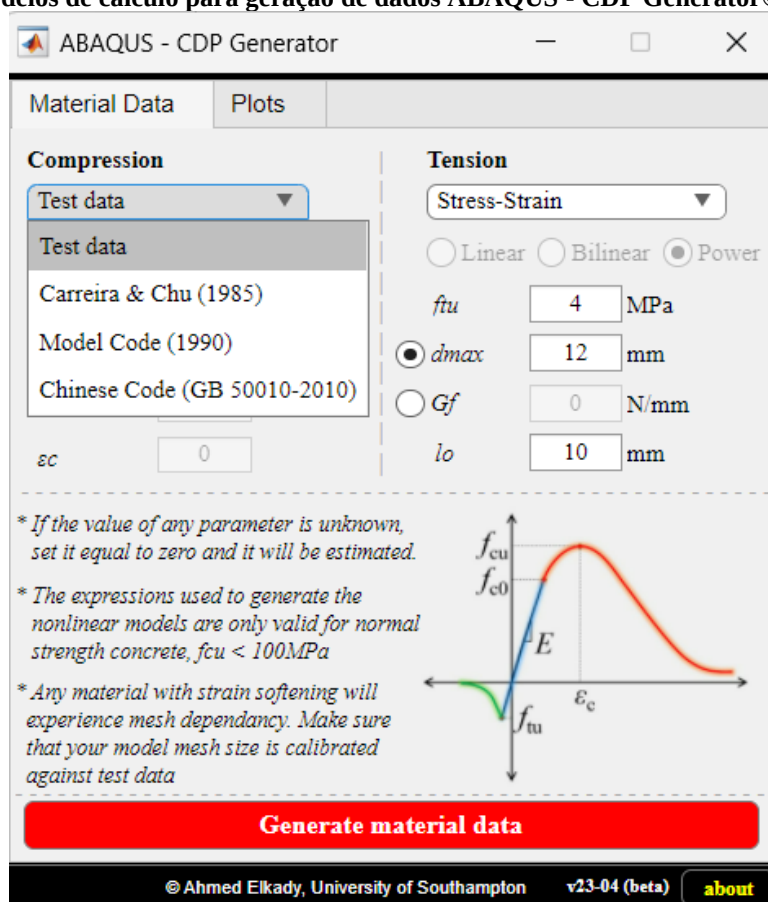
Para a obtenção dos dados a serem inseridos no ABAQUS utilizou-se o *software* **ABAQUS – CDP Generator**© criado pelo Dr. Ahmed Elkady. A sua interface pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9: Interface do *software* ABAQUS - CDP Generator©.

Fonte: ELKADY, 2023.

O *software* apresenta três diferentes opções de modelos a serem utilizados para geração dos dados necessários para inserção no ABAQUS, sendo todos eles baseados na literatura. O primeiro deles é o modelo baseado Carreira e Chu (1985), o segundo se baseia na CEB 90 e é denominado de *Model Code*, o último deles se baseia no *Chinese Code*. Podemos visualizar a aba de opções na Figura 10.

**Figura 10: Modelos de cálculo para geração de dados ABAQUS - CDP Generator©.**



**Fonte: ELKADY, 2023.**

Para o problema em questão se utilizou o modelo do CEB 90. Essa escolha se justifica se analisarmos as conclusões do autor José Milton de Araújo (2008), onde ele afirma que muitas das equações da ABNT NBR 6118 (2014) foram retiradas da CEB 90, porém, para o caso do módulo de deformação do concreto e sua resistência compressão se adotou formulações do ACI. O autor conclui dizendo que para os ensaios praticados o modelo da CEB 90 é mais representativo que o da própria NBR 6118, inclusive sugerindo que seja inserido na norma.

Após escolher o tipo do modelo de cálculo a ser adotado, se faz necessário introduzir alguns parâmetros referentes ao problema a ser simulado. Esses parâmetros e seus respectivos valores podem ser observados no Quadro 2. Todos os valores foram adotados a partir do modelo ensaiado por Rodrigues (2017), exceto o valor do comprimento médio de aresta do elemento finito, no qual se adotou inicialmente o valor de 25 mm.

**Quadro 2: Parâmetros a serem inseridos no software ABAQUS – CDP Generator®.**

| Parâmetros utilizados                               |       |
|-----------------------------------------------------|-------|
| Resistência a compressão do concreto (MPa)          | 28,01 |
| Resistência a tração do concreto (MPa)              | 2,77  |
| Diâmetro máximo do agregado (mm)                    | 19    |
| Comprimento médio da aresta do elemento finito (mm) | 25    |

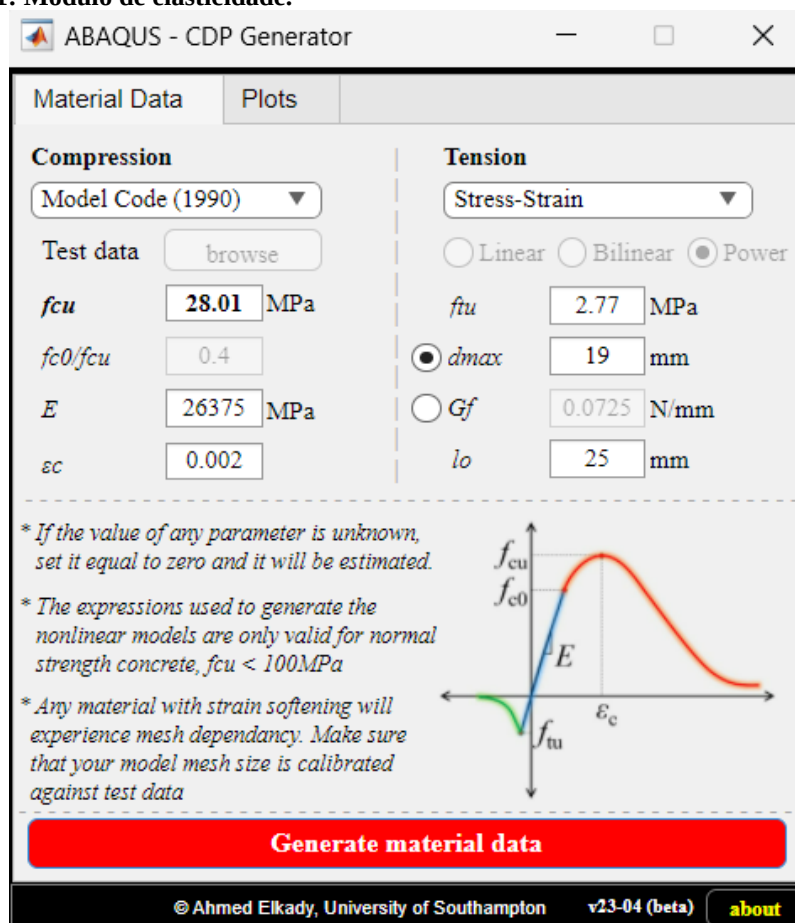
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1.1 Parâmetros elásticos

O primeiro passo para se modelar o concreto é estabelecer os valores necessários para sua análise elástica. O *software* solicita os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* do material. O segundo valor citado foi adotado como 0,2, valor amplamente utilizado para o concreto.

A partir dos dados inseridos anteriormente, o *software* retorna o valor para o módulo de elasticidade (E) que pode ser visualizado na Figura 11.

**Figura 11: Módulo de elasticidade.**



Fonte: ELKADY, 2023.

### 3.2.1.2 Parâmetros plásticos

Os parâmetros plásticos foram inseridos dentro do modelo CDP citado anteriormente. Os valores utilizados para ângulo de dilatação, excentricidade, parâmetro  $K_c$ , viscosidade e razão entre tensões de ensaio uniaxial e bi-axial podem ser visualizados no Quadro 3 e foram os mesmos citados por Silva (2018).

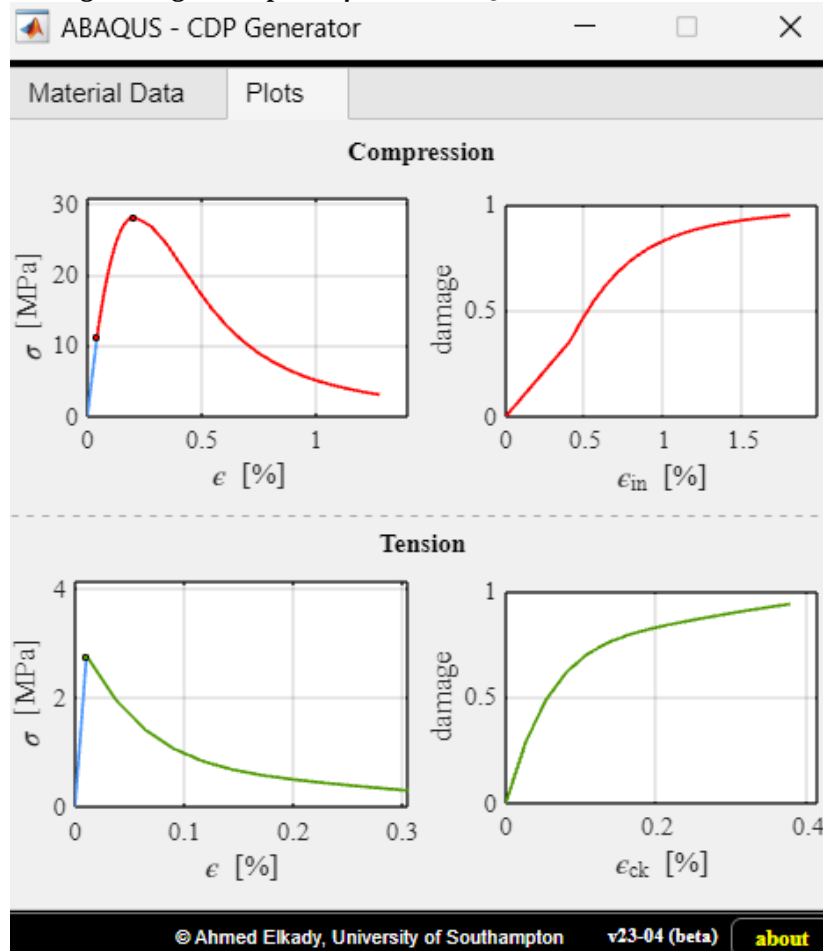
**Quadro 3: Parâmetros para modelagem do material concreto no *software* ABAQUS.**

| Parâmetros CDP      |                |                                                   |                 |             |
|---------------------|----------------|---------------------------------------------------|-----------------|-------------|
| Ângulo de dilatação | Excentricidade | Razão entre tensões de ensaio uniaxial e bi-axial | Parâmetro $K_c$ | Viscosidade |
| 38°                 | 0,10           | 1,12                                              | 0,666           | 0,00        |

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Os valores referentes a compressão e a tração foram obtidos como resultantes do processamento do *software* **ABAQUS – CDP Generator**®. Foram exportados arquivos de texto contendo os valores dos diagramas tensão – deformação para compressão e tração e os digramas dano – deformação para compressão e tração. A partir da Figura 12 é possível entender o comportamento dos diagramas citados.

**Figura 12: Diagramas gerados pelo *software* ABAQUS – CDP Generator®.**



Fonte: ELKADY, 2023.

### 3.2.2 Modelo constitutivo do aço

Se comparado ao concreto, o modelo constitutivo do aço é mais simples devido ao seu comportamento mais bem definido quando sujeito as ações de compressão e tração. Silva (2018) explica que para baixos níveis de carregamento, apenas o módulo de elasticidade é suficiente para modelagem do aço. Já para tensões mais elevadas o aço pode entrar no regime elasto-plástico.

No regime elástico se utilizou um módulo de elasticidade de 200 GPa e um coeficiente de *Poisson* de 0,3. Para o regime plástico se modelou barras em aço CA-50 e em CA-60. Para as barras de CA-50 foram utilizados os dados experimentais de Rodrigues (2017), presentes no Quadro 1. Já para as barras de aço CA-60 com bitola de 5 mm, se utilizou a tensão de escoamento igual a 600 MPa, conforme indica o fabricante.

### 3.3 Interação

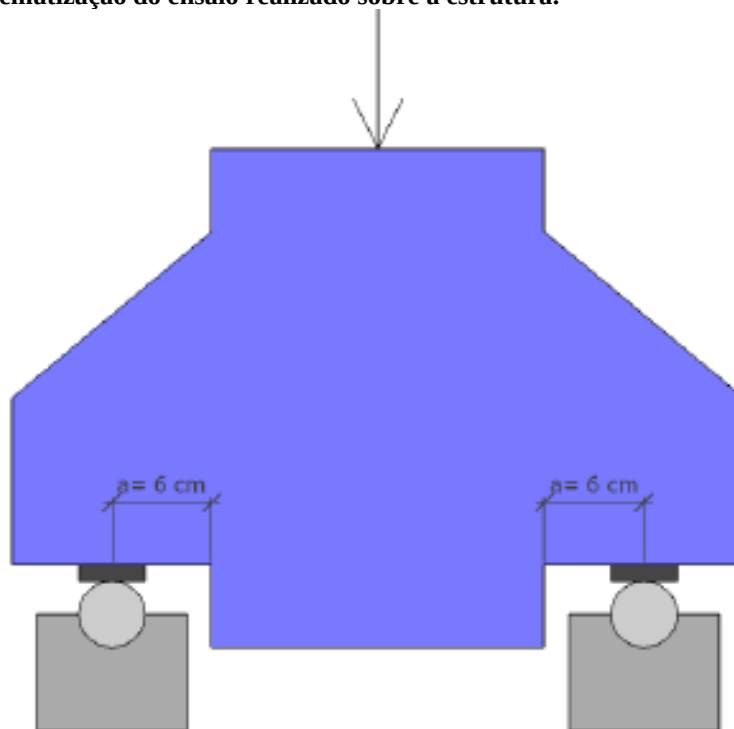
Para a modelagem em questão, existe apenas uma interação a ser definida, sendo ela a interação entre concreto e aço. Para essa definição se seguiu o indicado pelo autor Silva (2018), utilizando o modelo de interação *Embedded* (embutido). Segundo o autor, essa opção é utilizada para embutir um elemento em uma região hospedeira, eliminando os graus de liberdade do nó do elemento incorporado dentro da região, o considerando como um “nó incorporado”.

### 3.4 Condições de contorno e carregamento

#### 3.4.1 Condições de contorno

Ao observar a Figura 13, é possível entender, a partir da disposição dos elementos no ensaio realizado por Rodrigues (2017), a forma como se dispõem o carregamento e os apoios do consolo. Nota-se que os apoios são implantados em ambos os consolos, restringindo a movimentação vertical da peça concretada, enquanto que a força é aplicada na superfície inferior do pilar, que para este caso está voltada para cima, em contato com o ponto de aplicação de carga da prensa utilizada.

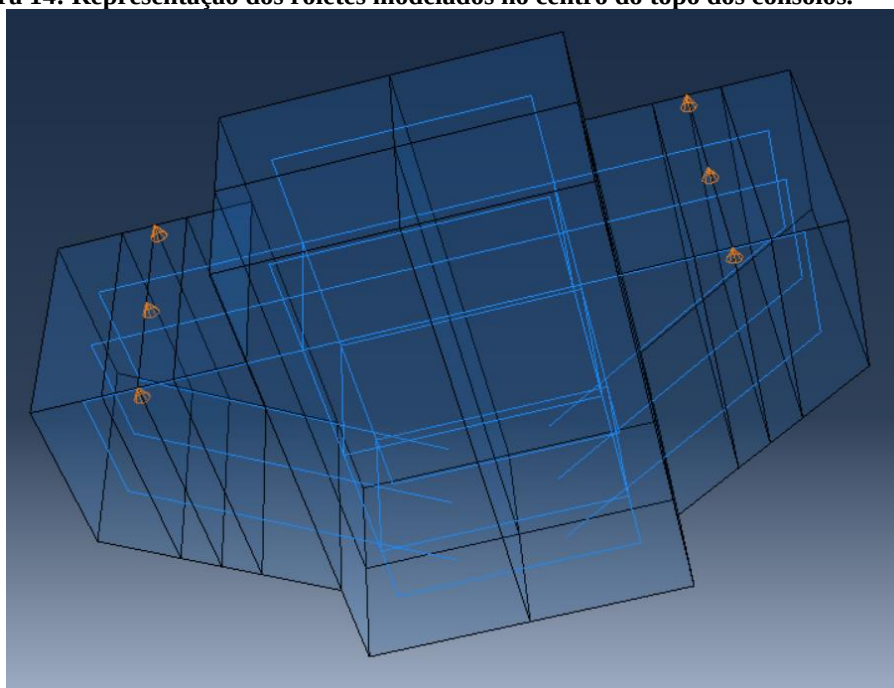
**Figura 13: Esquemática do ensaio realizado sobre a estrutura.**



**Fonte: RODRIGUES (2017)**

Para replicar as condições ensaiadas, restringiu-se a movimentação do consolo no eixo vertical. A partir da Figura 13 pode-se perceber que se optou por aplicar restrições do tipo rolete há uma distância de 6 cm do pilar, se mantendo o esquema do ensaio representado na Figura 14 e restringindo os graus de liberdade no eixo perpendicular aos topos dos consolos.

**Figura 14: Representação dos roletes modelados no centro do topo dos consolos.**



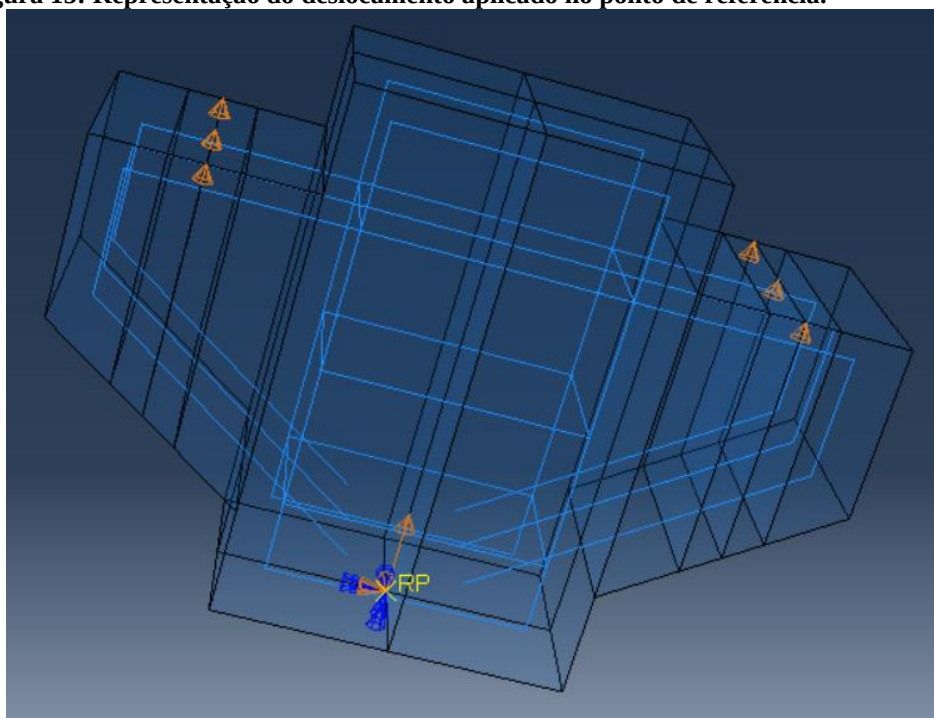
**Fonte: Autoria própria.**



### 3.4.2 Carregamento

O carregamento foi aplicado em consonância com o ensaio do material base. Criou-se um ponto de referência para a aplicação gradual de um deslocamento, variando de 0 até 3 mm. O ponto de referência teve seus graus de liberdades compatibilizados com a superfície de base do pilar, de forma que esse deslocamento fosse distribuído por ela. Pode-se visualizar o esquema a partir da Figura 15. A partir do deslocamento aplicado o *software* devolve os valores de carga no ponto de referência para cada incremento de deslocamento, sendo estes os valores a serem considerados na calibração.

**Figura 15: Representação do deslocamento aplicado no ponto de referência.**



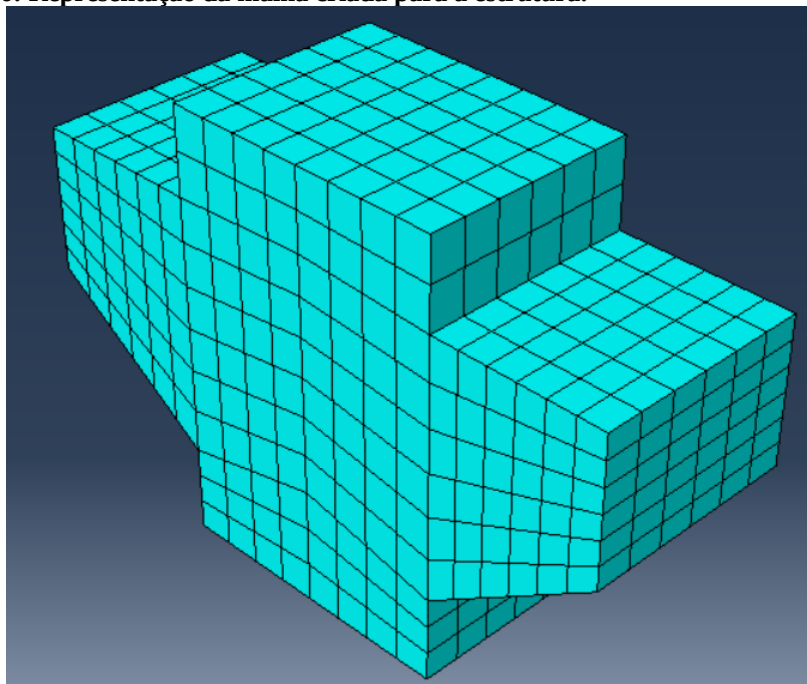
**Fonte: Autoria própria**

### 3.5 Definição da malha

Ao *software* foi solicitada a geração das malhas a partir da escolha do tipo de elemento e do comprimento médio de arestas solicitado. Para o corpo de concreto se solicitou a utilização de elementos de formas hexagonais com comprimento médio de arestas de 25 mm. Já para as barras de aço, se solicitou a utilização de elementos lineares com comprimento médio de 20 mm.

A partir das solicitações citadas anteriormente a malha foi gerada automaticamente e pode ser observada na Figura 16. Os elementos utilizados pelo *software*, bem como as suas quantidades geradas, podem ser observados no Quadro 4.

**Figura 16: Representação da malha criada para a estrutura.**



Fonte: Autoria própria

**Quadro 4: Elementos que compõem a malha da calibração.**

| Tipo de elemento | Quantidade de nós para um elemento | Quantidade de elementos |
|------------------|------------------------------------|-------------------------|
| C3D8R            | 8                                  | 960                     |
| T3D2             | 2                                  | 314                     |

Fonte: Autoria própria

### 3.6 Processamento

O processamento do modelo numérico foi realizado se deu a partir do procedimento estático pré-definido pelo *software*. Considerou-se que os incrementos de carga ocorreriam em um lapso temporal de 5 segundos e que o modelo seria analisado de forma não linear. A decisão por considerar o comportamento não linear foi baseada na experiência de Soares (1998). A autora modelou com elementos finitos e fez uma análise linear que resultou em um comportamento não representativo, principalmente nas zonas com elementos de ligação.

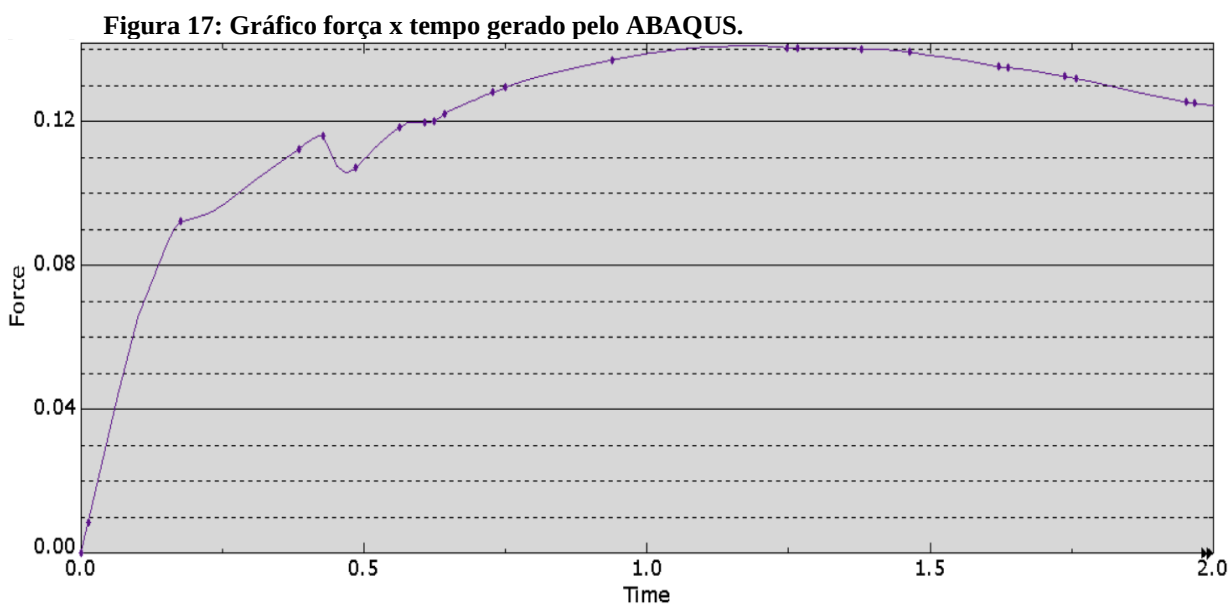
O processamento resultou em 483 incrementos até que chegasse ao deslocamento definido na etapa de carregamento. O tempo gasto foi de 4 minutos e 53 segundos.

### 3.7 Resultado da calibração

O ensaio de Rodrigues (2017) observou os resultados referentes a carga de fissuração e de ruptura para o modelo. Observa-se que os resultados foram de 95 kN para a fissuração e também para a ruptura. O autor indica que apenas um dos consolos sofreu a fissuração e que

logo em seguida entrou em ruptura, de forma que o outro consolo não chegou a entrar na fase de fissuração.

Para encontrar a carga de fissuração do modelo numérico se observou na Figura 17, a partir do ponto de referência em que se aplicou os deslocamentos, o gráfico que relaciona o incremento de carga ao longo do tempo. Se considerarmos que a fissuração se iniciará no início da plastificação do concreto, teremos então a carga para início de fissuração igual a 92,16 kN.



**Fonte: Autoria própria**

Se compararmos o valor encontrado de 92,16 kN e o valor de 95 kN ensaiado pelo Rodrigues (2017), teremos um grau de assertividade de 97,01 %. Entende-se como um valor consideravelmente próximo e válido para a validação da modelagem.

Ao analisarmos os valores referentes a carga de ruptura do ensaio de Rodrigues (2017), percebemos que o valor não é confiável, uma vez que a estrutura rompeu em um dos consolos, enquanto que o outro não chegou sequer a sofrer fissuração. Esse fenômeno pode ter ocorrido por algum problema de moldagem do elemento. O esperado era que ocorresse fissuração em ambos os consolos e que a tensão de ruptura fosse maior que a tensão de fissuração, uma vez que mesmo com a queda de resistência devido a fissuração do concreto, a armadura agiria em favor da resistência do modelo.

#### 4 MODELAGEM DO PROBLEMA PROPOSTO

O problema proposto tem como intenção a modelagem numérica de um padrão de consolo adotado na região de Mossoró-RN. Para isso, levantou-se dados como geometria do consolo, geometria do pilar, armação, cobrimento, ancoragem do tirante e espaçamento entre barras e estribos utilizados na região. Esses dados podem ser consultados no Quadro 5.

**Quadro 5: Informações levantadas acerca do problema proposto.**

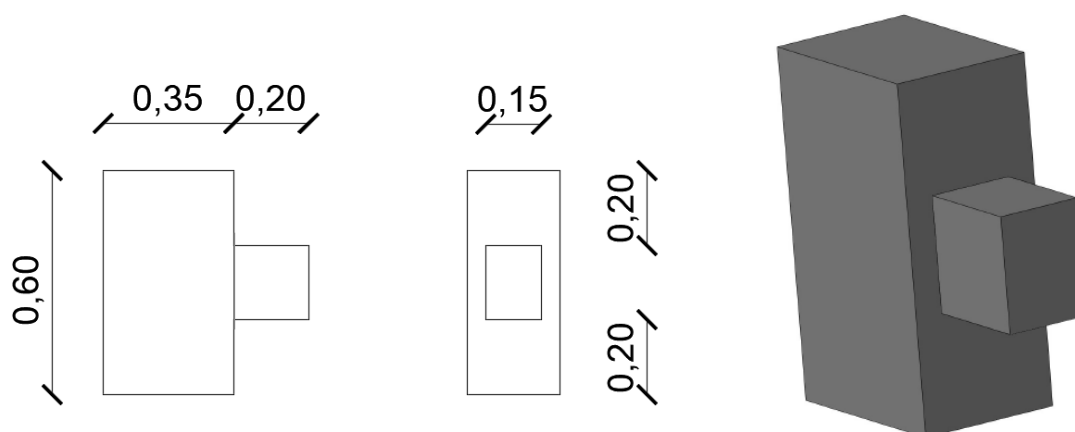
| Parâmetro                   | Valor      |
|-----------------------------|------------|
| Seção do pilar              | (25x35) cm |
| Seção do consolo            | (15x20) cm |
| Profundidade do consolo     | 20 cm      |
| Cobrimento                  | 2,5 cm     |
| Bitola armação do consolo   | 16 mm      |
| Bitola armação do pilar     | 16 mm      |
| Bitola estribo              | 5 mm       |
| Espaçamento entre estribos  | 10 cm      |
| Ancoragem do tirante        | Variável   |
| $f_{ck}$                    | 45 MPa     |
| Diâmetro máximo do agregado | 19 mm      |

**Fonte: Autoria própria**

A partir dessas informações é possível classificar o consolo como curto ( $a/d$  maior que 0,5 e menor que 1,0). A relação  $a/d$ , ao considerarmos a distância de aplicação da carga ( $a$ ) como o eixo do consolo e ao adotarmos a altura útil como sendo a altura do consolo subtraída do cobrimento e de metade da bitola da armação, é igual a 0,599, estando dentro da faixa citada anteriormente.

Para fins de simulação se considerou um trecho de pilar com altura de 60 cm com o consolo situado na sua face de menor dimensão. Tal escolha ocorreu sob a justificativa de que seria possível utilizar um comprimento de ancoragem maior para o tirante do consolo. A geometria adotada pode ser visualizada na Figura 18.

**Figura 18: Geometria adotada para o problema proposto.**



**Fonte: Autoria própria**

A estrutura em questão tem um padrão construtivo que consiste na moldagem do consolo em etapa posterior ao pilar. É comum na região que se concrete primeiramente o pilar, aproveitando formas existentes, sem a necessidade de adaptá-las para o recebimento de consolos, para que em etapa posterior à desforma, molde-se o consolo a partir da ancoragem dos tirantes na estrutura pré-existente.

A ancoragem do consolo no pilar é realizada a partir de produtos químicos. No momento da concretagem deixa-se tubos de PVC de 20 mm de diâmetro nos locais onde serão fixados os tirantes. Após a desforma do pilar abrem-se os furos, nos locais onde estão os tubos de PVC, com diâmetro ligeiramente maior que o diâmetro das barras dos tirantes, retirando também os tubos em questão. Logo em seguida faz-se a limpeza da superfície em que se ancorará as barras com auxílio de água e equipamento soprador e, por fim, utiliza-se um produto bicomponente dentro do furo e ao redor da barra para a sua fixação.

A simulação numérica tenta retratar o problema e buscar resultados quanto a resistência do sistema, buscando a tensão de ruptura, o comportamento da fissuração do concreto e a elucidação quanto ao comportamento da superfície de contato entre o pilar e o consolo.

## **4.1 Propriedades dos materiais**

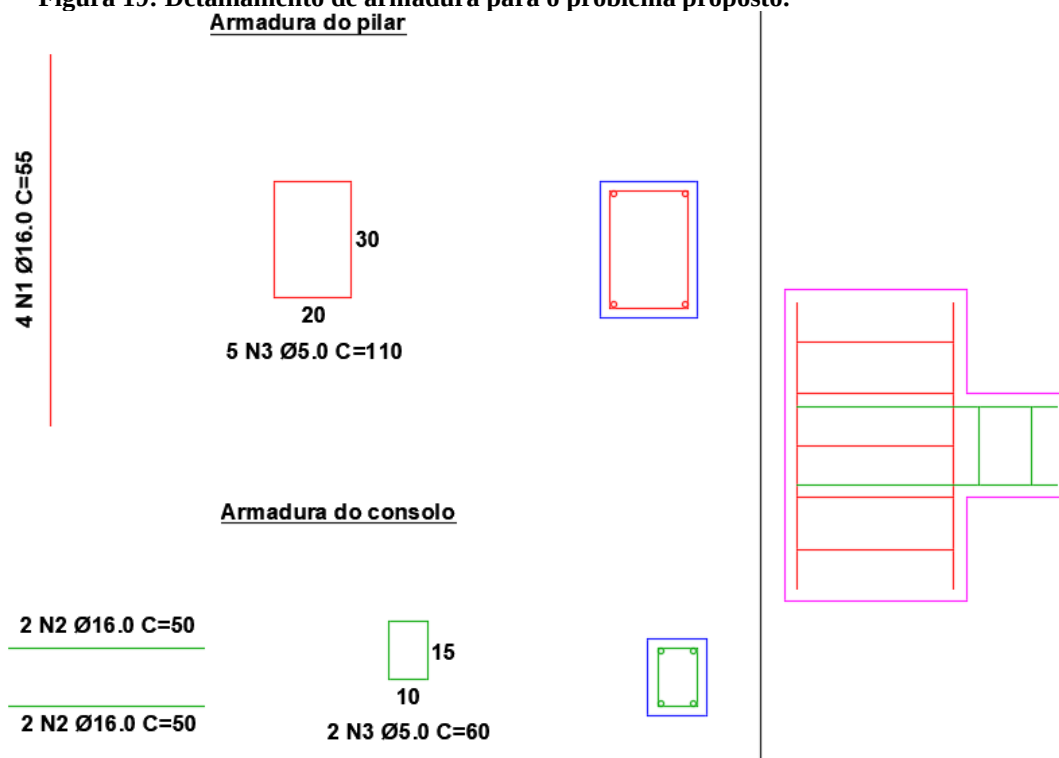
### **4.1.1 Concreto**

O concreto utilizado para a simulação baseia-se também no que é utilizado para a construção de pilares e consolos pré-moldados na região. O concreto possui um  $f_{ck}$  de 45 MPa e tem sua resistência a tração calculada a partir da Equação 1, resultando em um  $f_{ctk}$  de aproximadamente 3,8 MPa.

### **4.1.2 Armação**

A armação da estrutura do pilar levantada na região conta com 4 barras de aço CA-50 com bitola de 16 mm configurando a armadura longitudinal, bem como 5 estribos de aço CA-60 com bitola de 5 mm espaçados a cada 10 cm configurando a sua armadura transversal. Já como armadura do consolo foram utilizadas 4 barras de aço CA-50 com bitola de 16 mm. O comprimento das armações longitudinais do consolo foi concebido a partir das orientações coletadas acerca do modelo construtivo da região, devendo se estender o quanto fosse possível. Para isso considerou-se que a armação se prolongaria até antes do cobrimento da superfície oposta do pilar, respeitando o cobrimento de 2,5 cm. Pode-se observar a disposição das armaduras e os seus comprimentos na Figura 19.

**Figura 19: Detalhamento de armadura para o problema proposto.**



**Fonte: Autoria própria**

Como não foi realizado ensaio com as barras simuladas, adotou-se as tensões de escoamento como as indicadas pelos fabricantes. Para as barras de aço CA-50 adotou-se uma tensão de escoamento de 500 MPa e para as barras de aço CA-60 adotou-se as tensões de escoamento iguais a 600 MPa.

## 4.2 Modelos constitutivos

### 4.2.1 Modelo constitutivo do concreto

Assim como no modelo constitutivo da calibração, utilizou-se o modelo CDP do ABAQUS, o qual leva em consideração o dano plástico do concreto, baseando-se na teoria da plasticidade e na mecânica do dano contínuo.

#### 4.2.1.1 Parâmetros elásticos

Os parâmetros elásticos pedidos pelo *software* são o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* do material em questão. O coeficiente de *Poisson* foi adotado como 0,2, valor amplamente utilizado na literatura. Já obtenção do módulo de elasticidade se deu de forma análoga a calibração do método, utilizando o *Model code* do CEB 90 presente no *software* **ABAQUS – CDP Generator**© criado pelo Dr. Ahmed Elkady.

Os parâmetros necessários para a aplicação do método são os mesmos utilizados na calibração. Os parâmetros com seus respectivos valores podem ser visualizados no Quadro 6. Os valores foram obtidos através de pesquisa na região, conforme dito anteriormente no início deste capítulo. O comprimento médio da aresta nesse caso foi adotado como 15 mm, para que haja maior precisão na simulação, uma vez que ela é o foco da pesquisa.

**Quadro 6: Parâmetros a serem inseridos no software ABAQUS – CDP Generator®.**

| Parâmetros utilizados                               |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| Resistência a compressão do concreto (MPa)          | 45  |
| Resistência a tração do concreto (MPa)              | 3,8 |
| Diâmetro máximo do agregado (mm)                    | 19  |
| Comprimento médio da aresta do elemento finito (mm) | 15  |

**Fonte: Autoria própria.**

Após a inserção dos dados acima, obteve-se o valor de 32,582 GPa para o módulo de elasticidade e o valor padrão de coeficiente de *Poisson* igual a 0,2. O valor foi retirado do *software* conforme pode ser visualizado na Figura 20.

**Figura 20: Módulo de elasticidade do concreto.**

ABAQUS - CDP Generator

**Material Data** | **Plots**

**Compression**

Model Code (1990) ▼

Test data

$f_{cu}$   MPa

$f_{c0}/f_{cu}$

$E$   MPa

$\epsilon_c$

**Tension**

Stress-Strain ▼

☐ Linear ☐ Bilinear ☒ Power

$f_{tu}$   MPa

☒  $d_{max}$   mm

☐  $G_f$   N/mm

$l_o$   mm

\* If the value of any parameter is unknown, set it equal to zero and it will be estimated.

\* The expressions used to generate the nonlinear models are only valid for normal strength concrete,  $f_{cu} < 100\text{MPa}$

\* Any material with strain softening will experience mesh dependency. Make sure that your model mesh size is calibrated against test data

**Generate material data**

© Ahmed Elkady, University of Southampton v23-04 (beta) [about](#)

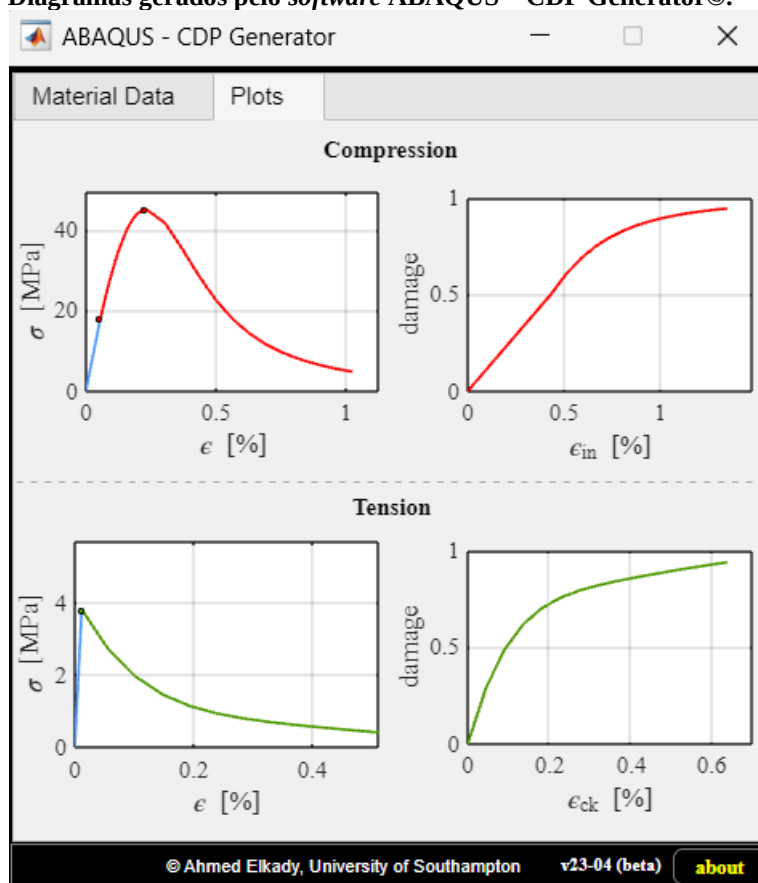
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2.1.2 Parâmetros plásticos

Os parâmetros plásticos solicitados pelo *software* são o ângulo de dilatação, a excentricidade, o parâmetro  $K_c$ , a viscosidade e a razão entre as tensões de ensaio uniaxial e bi-axial. Esses valores foram adotados de acordo com o item 3.2.1.2 deste trabalho.

Além disso, é necessário se inserir os valores da relação tensão x deformação para a compressão e para a tração. Para a obtenção desses valores foi adotado o mesmo método usado na calibração, sendo os gráficos resultantes do processamento do *software* **ABAQUS – CDP Generator**®. Foram exportados arquivos de texto contendo os valores do gráfico tensão – deformação para compressão e tração, bem como os valores para o dano de concreto à compressão e à tração. Os diagramas resultantes podem ser visualizados na Figura 21.

**Figura 21: Diagramas gerados pelo software ABAQUS – CDP Generator®.**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2 Modelo constitutivo do aço

Assim como para o concreto, o aço assumirá um comportamento elasto-plástico. Sendo assim, é necessário inserir valores de módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* para o regime elástico e para o regime plástico é necessário se inserir tensão de escoamento e tensão de ruptura.



Para todas as barras foi adotado um módulo de elasticidade igual a 200 GPa e um coeficiente de *Poisson* igual a 0,3. Já no regime plástico, de maneira conservadora se adotou a tensão de ruptura como sendo igual a tensão de escoamento.

### 4.3 Interação

Para o problema proposto existem três áreas de interação a serem atribuídas. A primeira delas é a interação entre a superfície do consolo e a superfície do pilar. Para este caso temos duas peças de concreto moldadas em etapa distinta. Sendo assim, a interação será feita de forma análoga a Silva (2018), quando modelou uma capa de concreto novo sobre uma estrutura pré-moldada e atribuiu a interação *Tie*. Considerando que será feita ponte de aderência entre os contatos, a interação *Tie* “é utilizada para fazer com que todos os graus de liberdade ativos dos nós das superfícies de contato sejam iguais.” (SILVA, 2018)

A segunda interação é feita entre a armação do consolo e o concreto do mesmo. É importante frisar que para essa interação é necessário particionar as quatro barras que serão chumbadas no pilar, já que elas terão interação tanto no pilar quanto no consolo. A partição é feita na superfície de contato entre consolo e pilar. Para os estribos e a primeira parte dos tirantes é atribuída a interação *Embedded*, de forma que as barras estejam embutidas no concreto e tenham seus nós considerados como incorporados.

Por fim, a última interação se dá entre a armação do pilar e o restante das barras do consolo e o concreto do pilar. Aqui se faz necessário uma simplificação no modelo. Nascimento (2017) em seu trabalho nos traz uma análise comparativa de desempenho de ancoragens de vergalhões de aço em superfícies de concreto, onde ele atesta que as ancoragens químicas ensaiadas respondem bem aos ensaios, não havendo ruptura por arrancamento da placa de concreto. A partir dessa análise e da dificuldade de se encontrar parâmetros suficientes para a criação de uma nova forma de interação dentro do *software*, se faz uma simplificação e se considera, tanto as barras de aço do pilar quanto as barras que serão ancoradas quimicamente, dentro do padrão de interação *Embedded*. Sendo assim, todas estarão embutidas e terão seus nós incorporados ao concreto do pilar.

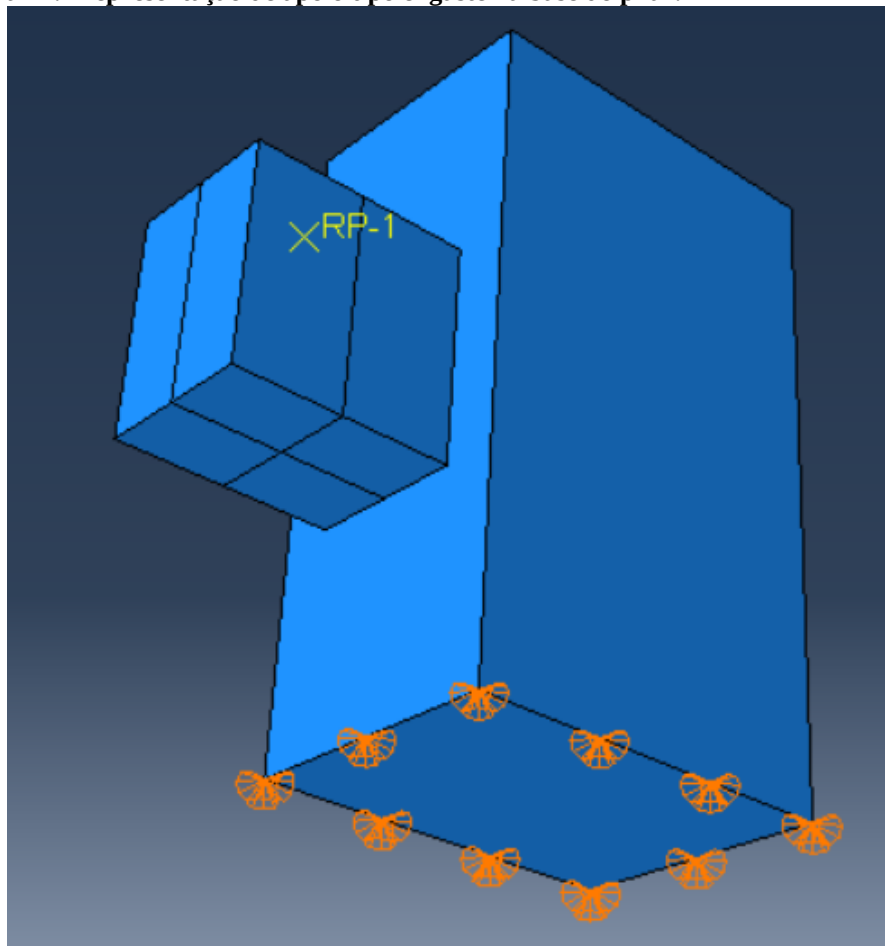
### 4.4 Condições de contorno e carregamento

#### 4.4.1 Condições de contorno

A condição de contorno utilizada para o problema proposto foi aplicada na superfície de base do pilar, de forma a representar o que acontece na prática. Levando em consideração que o modelo simulado é um recorte de um pilar na região de interação com o consolo, optou-

se por restringir a base nos 3 eixos, simulando assim um engaste entre a parte simulada e o restante do comprimento do pilar. A condição de contorno pode ser visualizada a partir da Figura 22.

**Figura 22: Representação de apoio tipo engaste na base do pilar.**



**Fonte: Autoria própria.**

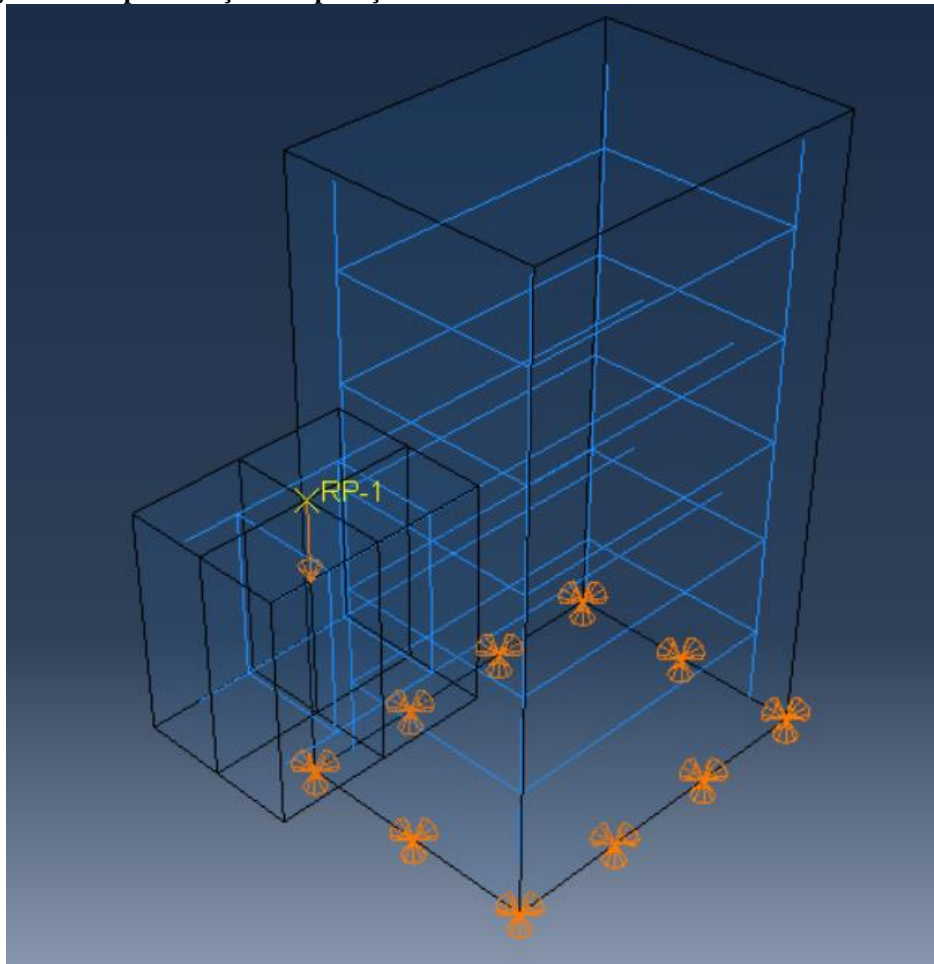
#### 4.4.2 Carregamento

O carregamento foi aplicado de maneira similar ao que foi feito na calibração do modelo, porém, se difere pelo fato de que a simulação retratará a estrutura em uso, sendo assim, o carregamento será aplicado na superfície superior do consolo. Considerando que o apoio da viga sobre o consolo na região é realizado com o auxílio de almofada de apoio de material Neoprene, e que esse material tem por característica se deformar e transmitir as cargas igualmente pela superfície do consolo, a carga aplicada no modelo deve se distribuir por toda a superfície superior do consolo.

Similar a estratégia adotada para a calibração do modelo, criou-se um ponto de referência para aplicação gradual do deslocamento, variando de 0 até 3mm. O ponto de referência também teve seus graus de liberdade compatibilizados com a superfície em questão,

garantindo que o deslocamento seria uniforme por toda a região considerada. A forma como foi aplicada a carga pode ser visualizada na Figura 23. A partir desse carregamento, os dados de carga incrementada foram coletados para posterior análise.

**Figura 23: Representação da aplicação do deslocamento no centro do consolo.**



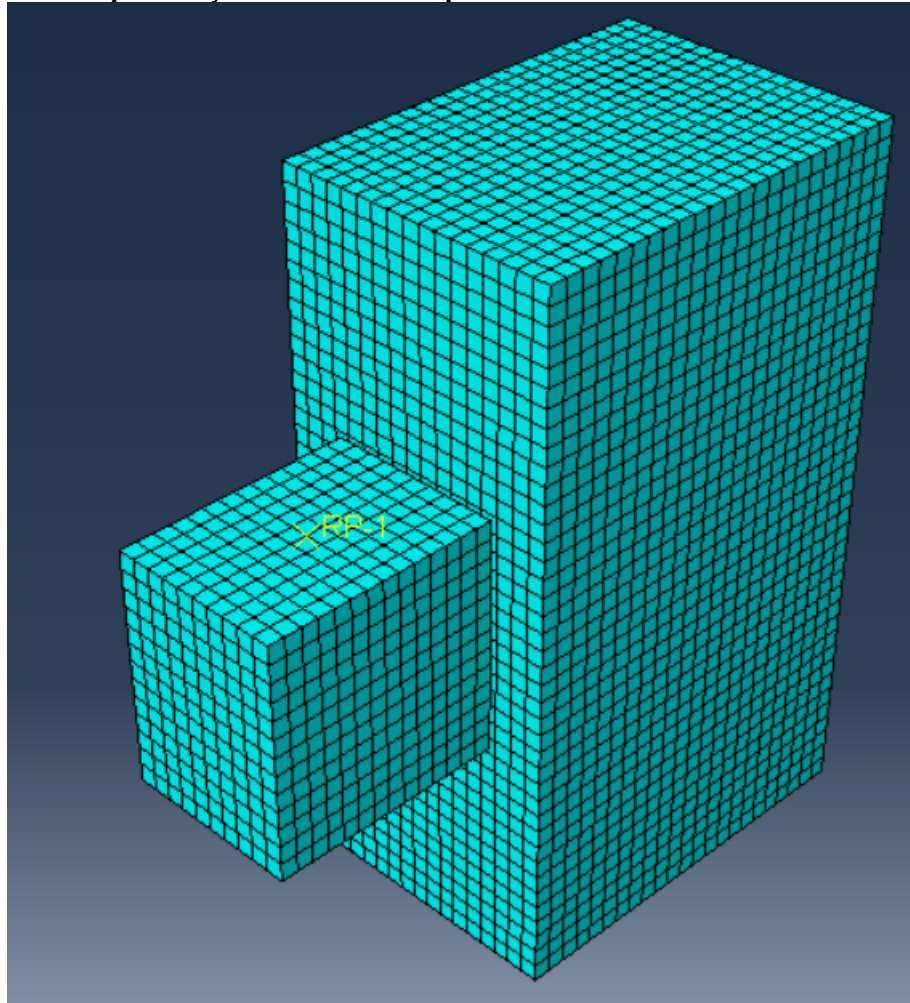
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.5 Definição da malha

Como o modelo em questão é o enfoque maior do trabalho, com o intuito de oferecer maior precisão no comportamento simulado, optou-se por utilizar elementos de menor dimensão. Enquanto que no modelo da calibração se adotou uma divisão da malha com elementos de 25 mm para o concreto e 20 mm para o aço, neste modelo se optou por 15 mm para todos os elementos de concreto e de aço.

Os tipos de elementos utilizados foram os mesmos citados anteriormente para a calibração. Elementos hexagonais com 8 nós para as partes de concreto e elementos lineares com 2 nós para as barras de aço. A disposição da malha do modelo pode ser observada na Figura 24 e a quantidade e tipo de elementos podem ser visualizados no Quadro 7.

**Figura 24: Representação da malha criada para a estrutura.**



**Fonte: Autoria própria**

**Quadro 7: Elementos que compõem a malha do problema proposto.**

| <b>Tipo de elemento</b> | <b>Quantidade de nós para um elemento</b> | <b>Quantidade de elementos</b> |
|-------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| C3D8R                   | 8                                         | 17460                          |
| T3D2                    | 2                                         | 622                            |

**Fonte: Autoria própria**

#### **4.6 Processamento**

Seguiu-se os mesmos padrões de processamento adotados para a calibração, fazendo uma análise estática e considerando a não linearidade na simulação. O intervalo de tempo adotado também foi de 5 segundos e o processamento resultou em 406 incrementos. Devido a malha mais refinada e com um maior número de nós e elementos, o processamento se tornou mais demorado, levando 48 minutos e 44 segundos.

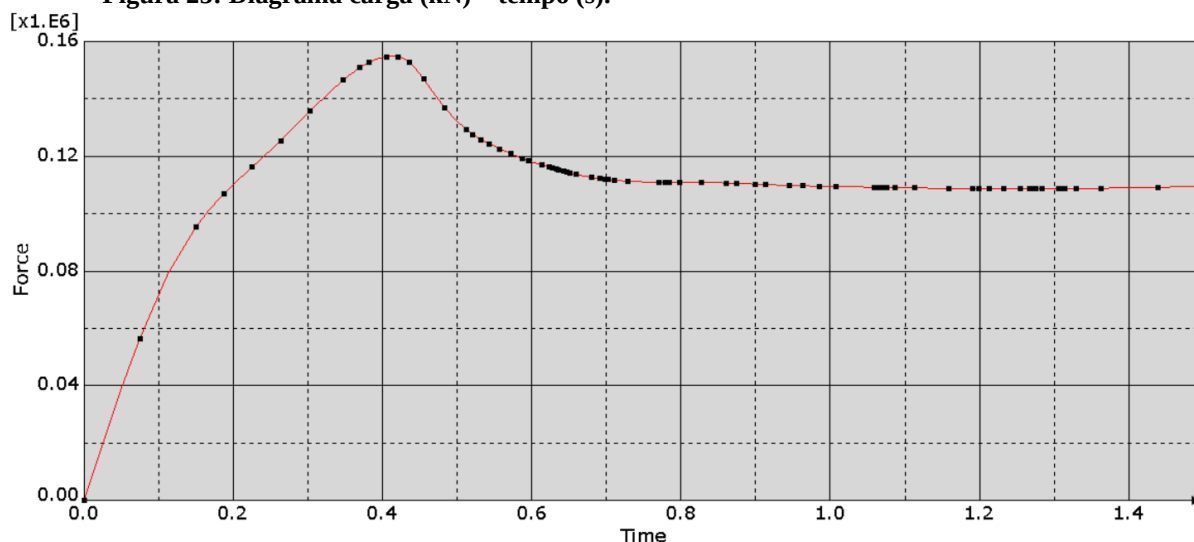
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizada a simulação do problema proposto chega à etapa de análise dos resultados obtidos. O primeiro passo foi decidir quais parâmetros disponibilizados pelo *software* ABAQUS teriam relevância e deveriam ser analisados. Pensando nisso definiu-se como resultados importantes a serem discutidos a carga máxima suportada pelo modelo, a distribuição de tensões na armadura, a forma como o modelo se deforma e o caminho das fissuras que o acompanham, bem como as discussões pertinentes aos resultados observados.

### 5.1 Carga de ruptura

Para a obtenção da carga de ruptura solicitou-se ao *software* o diagrama carga – tempo (Figura 25) no ponto de aplicação da carga, ou seja, no ponto de referência criado para a aplicação dos deslocamentos na etapa de carregamento.

**Figura 25: Diagrama carga (kN) – tempo (s).**



**Fonte: Autoria própria**

Podemos perceber no diagrama que o valor máximo se encontra um pouco acima dos 150 kN e que o tempo em que ele ocorreu está contido entre 0,4 s e 0,5 s. Os valores precisos foram retirados a partir do gráfico, representando uma tensão de ruptura de 154,798 kN no instante 0,42 s. Esta carga é adotada como a carga de ruptura porque nota-se que a aplicação de carga é crescente até este ponto. A partir dele a carga começa a decrescer, representando que a estrutura não mais suporta incrementos de carga, ou seja, ela chegou ao seu colapso.

Ao analisar apenas esse resultado temos uma carga satisfatória. Apesar de serem estruturas diferentes que, provavelmente, foram dimensionadas com objetivos diferentes, se compararmos esse resultado com o obtido pela calibração, temos que a estrutura proposta, mesmo com consolo moldado em etapa distinta do pilar, resiste a uma carga maior.

Por mais que o resultado tenha sido satisfatório, apenas esse valor não é suficiente para analisar o problema em questão. Resta ainda saber o comportamento da fissuração e do escoamento do aço para ter-se um posicionamento acerca da simulação como um todo.

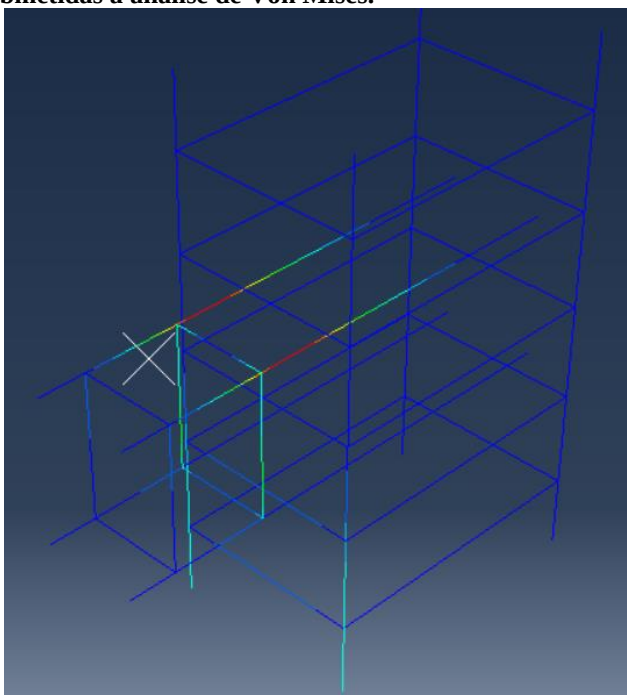
## 5.2 Distribuição de tensões na armação

Um dos pontos mais importantes ao analisar estruturas de concreto armado é a sua armação. Essa afirmação se justifica devido ao concreto ser pouco resistente a tração, cabendo ao aço presente na armação o combate desse tipo de esforço. A primeira consideração a se fazer em relação ao tipo de análise a ser solicitada ao *software* é que, assim como para o concreto, ela deverá ser pautada na teoria do dano contínuo, levando em consideração o regime plástico e o dano causado pelos incrementos de tensões até a chegada da tensão limite.

Para a análise das tensões combatidas pelo aço, o *software* ABAQUS apresenta alguns métodos. O método adotado por este trabalho é o de Von Mises. Segundo Beer *et al.* (2011) o critério da máxima energia de distorção (critério de Von Mises) é um dos dois métodos frequentemente utilizados para dentro da engenharia para se referir a materiais dúcteis, como é o caso do aço em questão.

Ao solicitar a distribuição de tensão na armação do modelo ao *software* ABAQUS, percebe-se na Figura 26 que as barras superiores (tirantes) do consolo apresentam uma coloração mais avermelhada no trecho de união entre o consolo e o pilar. Isso acontece devido às maiores trações acontecerem na área em questão.

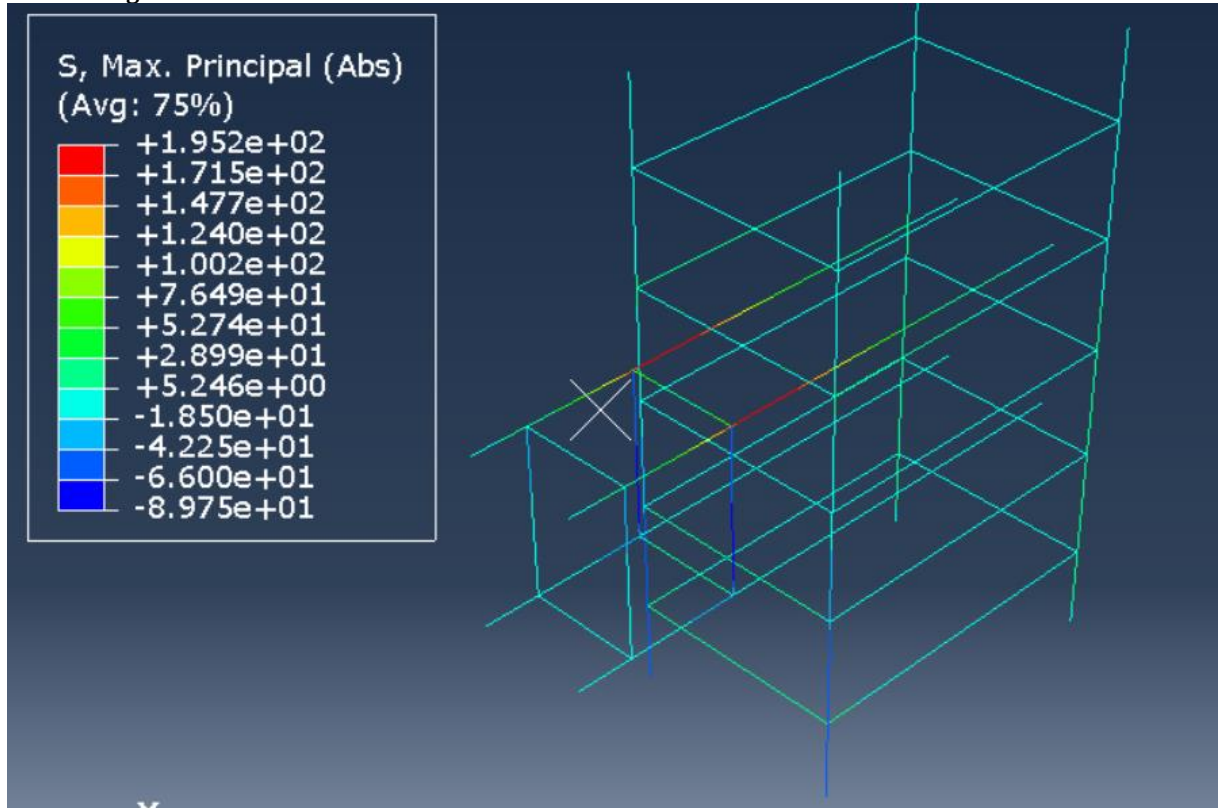
**Figura 26: Barras submetidas a análise de Von Mises.**



**Fonte: Autoria própria**

Nota-se também que as barras inferiores continuam em azul, representando a área que não sofre tração, mas sim compressão. Se analisarmos a Figura 27, percebe-se na legenda que as barras citadas anteriormente apresentam valores negativos, significando o esforço de compressão.

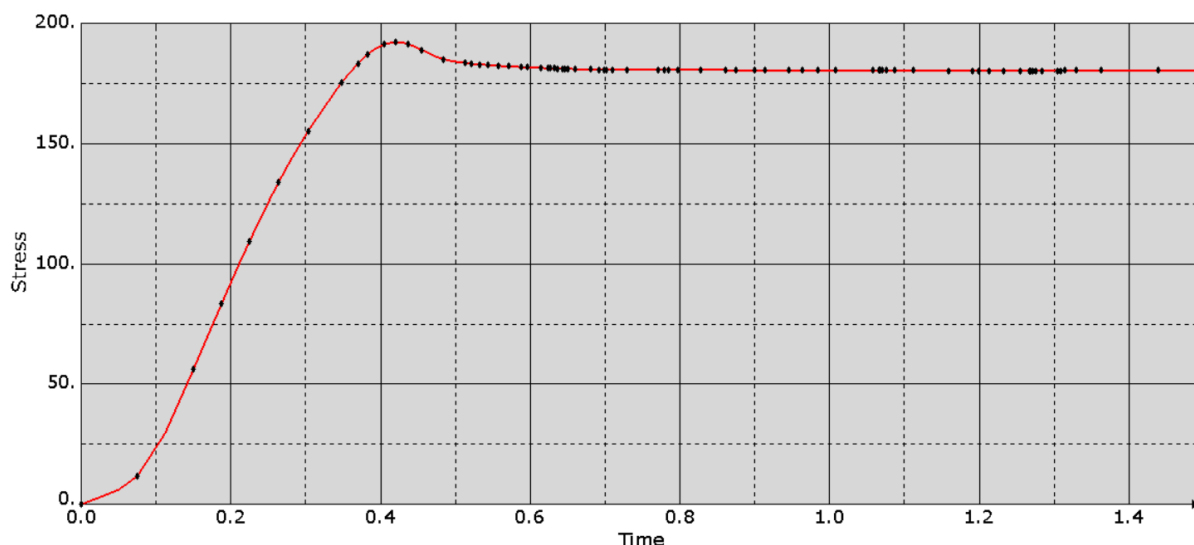
**Figura 27: Valores inerentes à análise de Von Mises.**



**Fonte: Autoria própria**

O diagrama da Figura 28 representa a tensão de Von Mises ao longo do período de aplicação da carga. Nele conseguimos observar o ponto de pico onde ocorre a maior tensão na armação. Não coincidentemente o ponto está locado no mesmo instante onde se observou a ruptura do modelo no item 5.1 deste trabalho. O valor máximo de tensão a qual a armação foi submetida é de 195,2 MPa.

**Figura 28: Diagrama tensão de Von Mises (MPa) – tempo (s).**



**Fonte: Autoria própria**

Nota-se a partir das verificações anteriores que a armação inferior do consolo não age para combater os esforços de tração, pois eles estão situados na região comprimida do consolo, sendo o concreto suficiente para combater as tensões que sobre nela situadas. Entende-se que são barras construtivas, sem função estrutural, podendo ter suas bitolas reduzidas, assumindo apenas a função de porta estribo. Na região adota-se a mesma bitola dos tirantes sob o pretexto de uniformizar o máximo possível a armação para que se ganhe produtividade nas fábricas de pré-moldados, porém, é válido analisar a mesma estrutura com bitolas inferiores nessas barras.

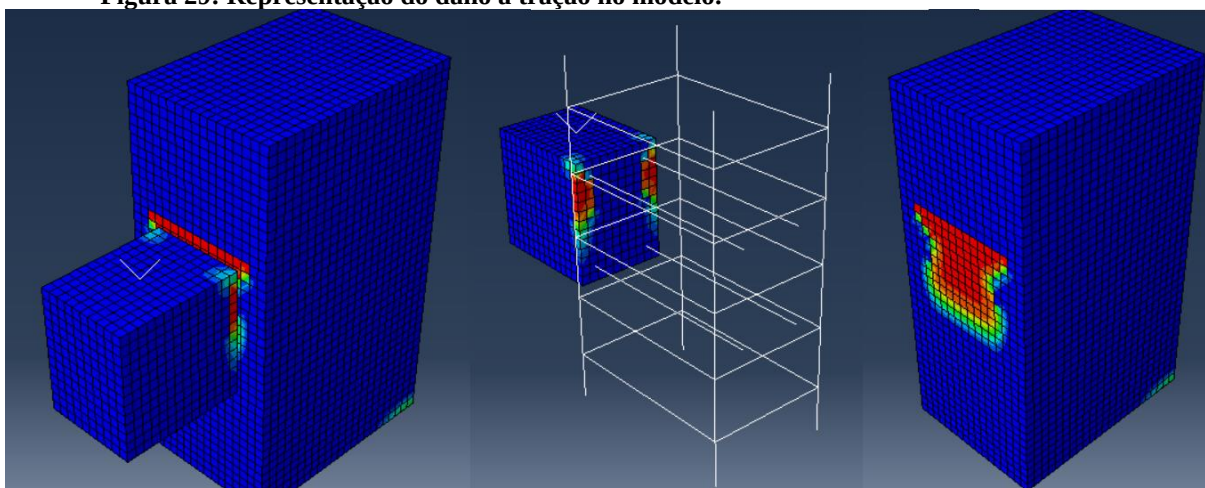
### 5.3 Distribuição do dano sofrido pelo concreto

O ABAQUS possui dois parâmetros de saída que representam os danos que o concreto sofreu à tração e à compressão, mostrando a distribuição dele ao longo dos elementos finitos. Para o modelo simulado, entende-se que o dano à tração é um parâmetro importante a ser avaliado, uma vez que esse esforço será responsável pela ruptura do modelo e ele que melhor representa o padrão de fissuração que atingirá o concreto.

Na Figura 29 podemos visualizar as distribuições do dano à tração na parte do consolo e na parte do pilar. É possível identificar que o dano se concentrou na interface de ligação entre os dois elementos.



**Figura 29: Representação do dano a tração no modelo.**



**Fonte: Autoria própria**

Ao analisarmos o fenômeno, podemos inferir que o consolo modelado sofreria um processo de ruptura por flexão, onde a fissuração se dá na interface de ligação, no sentido do plano de aplicação da carga, semelhante ao que ocorre no modelo. Ou por cisalhamento na interface entre consolo – pilar, já que esta é a área realmente mais afetada pelo dano. O que definiria o tipo de ruptura seria a direção da ruptura, uma vez que por cisalhamento ela é dada no sentido perpendicular a aplicação da força.

Apesar de se tratar de um consolo curto e percebermos que as ações as quais a armação está submetida se assemelham às do modelo de bielas e tirantes, percebe-se que a provável superfície de ruptura se dá entre o consolo e o pilar. Esse fenômeno pode ser explicado devido a moldagem em etapa distinta, criando uma superfície mais frágil no contato entre os elementos de concreto.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral a análise de viabilidade técnica de moldagem de consolo, em etapa posterior ao pilar, com um arranjo específico de armadura a partir de *software* de elementos finitos.

A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que existe viabilidade técnica para tal uso, uma vez que o incremento de carga para que o modelo chegasse à ruptura teve intensidade considerável. Porém, recomenda-se que o modelo aqui simulado seja replicado e seja submetido a ensaios de compressão, para que assim possa-se analisar os resultados dos ensaios e admitir a carga de ruptura, bem como a forma como ele fissurará e romperá.

Constatou-se que as barras inferiores utilizadas na armação dos consolos possuem funções mais construtivas do que estruturais, podendo ser substituídas por barras de menor seção, barateando o modelo e conseguindo resultados semelhantes. Sugere-se a modelagem com novos arranjos de armação levando em consideração essa constatação, bem como ensaios com esses diferentes arranjos.

No campo de modelagem numérica sugere-se para trabalhos futuros que se consiga dados suficientes relacionados ao material utilizado na ancoragem química e que a partir desses dados se configure um modelo de interação representativo. Essa ação permitirá fazer uma análise ainda mais fiel ao que ocorre na prática. Além disso, sugere-se também que se busque outras formas de modelar a interface entre consolo e pilar, tentando minimizar os danos que essa região sofre.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Modelos para previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR-6118 versus CEB**. Teoria e prática na engenharia civil, n. 12, p. 81-91, Outubro 2008. Disponível em: [Microsoft Word - Art8\\_N12.doc \(furg.br\)](#). Acesso em: 01 mai. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro. ABNT, 2017.
- BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.
- CARVALHO, D. C. S. *et al.* **Análise computacional de consolos de concreto armado de alta resistência**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, [S. l.], v. 2, n. 18, p. 147–166, 2017. DOI: 10.26512/ripe.v2i18.20958. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/20958>. Acesso em: 03 fevereiro. 2023.
- CHIQUESE, A. P. L.; PEGORETTI, T. S. **Uso do método dos elementos finitos para o cálculo dos deslocamentos em treliças**. 2020. 15p. V Congresso Interdisciplinar de Pesquisa, Iniciação Científica e Extensão Universitária – Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. Universidade de Araraquara. Araraquara, 2020. Disponível em: [485-499-elementos-finitos.pdf \(izabelahendrix.edu.br\)](https://485-499-elementos-finitos.pdf(izabelahendrix.edu.br)). Acesso em: 01 mai. 2023.
- COSTA, Jônatas Barreto de Andrade. **Estudo experimental de consolos de concreto com fibras moldados em etapas distintas dos pilares**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. doi:10.11606/D.18.2009.tde-14072009-170612. Acesso em: 03 fevereiro. 2023.
- DAMASCENO, Joao Henrique Lannes *et al.* **Análise experimental de consolos instalados em etapa posterior à concretagem de pilar com auxílio de adesivo químico. Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 3, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0483>. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/22367>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2ª edição. São Carlos: EESC-USP, 2017. 456 p.
- Elkady, Ahmed. **ABAQUS\_CDP\_Generator**: A tool for generating concrete damage parameters for ABAQUS. Zenodo, 2023. Version v23.04. DOI: 10.5281/zenodo.7755926
- MARCO, Marina Drummond de. **Industrialização na construção civil pré-fabricados em concreto armado**. 2015. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA->

[BDGL9D/1/industrializa o na constru o civil marina de marco.pdf](#). Acesso em: 8 mar. 2023.

NASCIMENTO, W. O. **Contribuição para a análise comparativa do desempenho de ancoragens de vergalhões, com a utilização de chumbador químico por injeção e adesivo estrutural base epóxi, em elementos de concreto**. São Paulo, 2017. 123 p. Monografia (Especialização) – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Gestão de Projetos de Sistemas Estruturais – Edificações. Disponível em: [Microsoft Word - MONOGRAFIA PECE WESLEY OLIVEIRA DO NASCIMENTO\\_FINAL.doc \(phd.eng.br\)](#). Acesso em: 05 abr. 2023.

OLIVEIRA, E. M. **Consolos de concreto moldados em duas etapas: Influência do tratamento da interface e da adição de fibras de aço**. (Mestrado em Estruturas), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 155 f. 2012.

PEREIRA, Patrícia da Silva. **Avaliação da teoria atrito - cisalhamento em concreto leve e de alta resistência**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense - Uenf, Campos dos Goytacazes, 2016. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2016/12/Disserta%C3%A7%C3%B5es-de-Mestrado-2016-PATRICIA-DA-SILVA-PEREIRA.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

RODRIGUES, Yury Ouriques. **Estudo experimental de consolos muito curtos de concreto reforçado com fibras de aço**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/23945/1/YURY%20OURIQUES%20RODRIGUES%20-%20TCC%20ENG.%20CIVIL%20CTRN%202017.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.

RUIZ, Phelipe Viana. **A simulação computacional como ferramenta de auxílio à tomada de decisão na produção de elementos pré-fabricados**. 2019. 1 recurso online (264 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1635360>. Acesso em: 31 jan. 2023.

SAMPAIO, Ícaro de Almeida. **Avaliação de materiais na ligação entre concreto novo/concreto velho**. 2010. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em: [http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto\\_de\\_Graduacao/2010/Icaro\\_Sampaio\\_Avaliacao%20de%20%20Materiais%20na%20Ligacao%20Concreto%20Novo\\_Velho.pdf](http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2010/Icaro_Sampaio_Avaliacao%20de%20%20Materiais%20na%20Ligacao%20Concreto%20Novo_Velho.pdf). Acesso em: 12 mar. 2023.

SILVA, João Victor Maciel de Andrade. **Avaliação numérica do comportamento de ligações viga-pilar em estruturas de concreto armado**. 2018. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

SOARES, A. M. M. **Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações**. 1998. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. Disponível em:

[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-17042018-091917/publico/Dissert\\_Soares\\_AnamariaMM.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-17042018-091917/publico/Dissert_Soares_AnamariaMM.pdf). Acesso em: 08 abr. 2023.