



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS VINICIUS GOMES DE SOUSA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES COM CABEÇA
EMBUTIDOS EM CONCRETO ARMADO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS.**

TERESINA-PI

2024

MARCOS VINICIUS GOMES DE SOUSA

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES COM CABEÇA
EMBUTIDOS EM CONCRETO ARMADO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS.

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul

Orientador: Prof. Dr. Helder Pontes Gomes.

TERESINA-PI

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sousa, Marcos Vinícius Gomes de

S725a Análise numérica do comportamento de conectores com cabeça embutidos em concreto armado via método dos elementos finitos / Marcos Vinícius Gomes de Sousa. – 2024.
60 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Helder Pontes Gomes

1. Engenharia civil. 2. Conector com cabeça. 3. Modelo de dano plástico (CDP).
4. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Isabel dos Santos Lima CRB 3/1060

MARCOS VINICIUS GOMES DE SOUSA

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES COM CABEÇA
EMBUTIDOS EM CONCRETO ARMADO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS.

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Helder Pontes Gomes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Freire Soares
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Wallison Angelim Medeiros
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

*A folha de aprovação não deve ser assinada, deve-se somente preencher a data de aprovação do trabalho.

“Se eu vi mais longe,
foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me dar forças e me guia todos os dias nessa jornada.

Agradeço aos meus pais, Eva de Sousa Gomes e Francisco de Assis Monteiro de Sousa, que mesmo longe, me deram o apoio necessário durante toda a graduação. Também agradeço pela compreensão que vocês tiveram, por estar longe e não poder compartilhar alguns momentos, pois estava cumprindo minha jornada atrás de um sonho. Esse apoio, companheirismo e compreensão foram essenciais para que eu pudesse concretizar esse sonho, vocês são meus maiores motivadores diários. Tenho honra em afirmar que essa conquista é nossa.

A minha família por todo o apoio durante essa jornada, essa conquista também é de vocês.

Ao meu orientador e brilhante professor Helder Pontes Gomes, pela oportunidade de ser o seu primeiro orientando de TCC do curso de Engenharia Civil e por toda dedicação e conhecimento passado em nossas reuniões. Sou muito grato pelos seus ensinamentos e apoio durante essa jornada. Além disso, gostaria de agradecer pelos seus ensinamentos durante a graduação, se um dia for um bom engenheiro, o senhor representará boa parcela disso.

Ao professor Wallison Angelim Medeiros, por todo o auxílio concedido na realização da pesquisa, pela disponibilidade em ajudar quanto requisitei. Foi de extrema importância sua participação nesta pesquisa.

Agradecer a Universidade Federal de São Carlos pela disponibilização da licença do software SIMULIA ABAQUS 2017.

Aos meus amigos da primeira turma de Engenharia Civil, pela união ao longo desses 5 anos diante de todos os desafios que a graduação exigiu. Em especial, agradeço aos meus amigos Igor Samuel, André Lopes e Girleiane Santos, que estiveram comigo do início ao fim, dividindo bons momentos, compartilhando sorrisos, trocando brincadeiras, dando conselhos e, sobretudo, me motivando nesta reta final de curso. Vocês tornaram esses 5 anos muito mais leves.

Aos meus melhores amigos João Marcos, Marcos Daniel e Igor Samuel, pelos conselhos trocados, pelo apoio, pelas experiências, pelas conversas até as 3 horas da manhã, sobre a vida, sobre planos, que nossa amizade dure para sempre.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica do comportamento de dispositivos de ancoragem do tipo conector cabeça em elementos de concreto armado. Para isso, foi desenvolvido um modelo tridimensional não linear. A modelagem numérica foi desenvolvida utilizando a versão 2017 do software SIMULIA ABAQUS, por meio da aplicação do método dos elementos finitos (MEF) e fundamentando-se nos dados experimentais obtidos por Lima (2024) para validação do modelo numérico. Para modelagem do concreto foi adotado o modelo constitutivo de dano plástico (*Concrete Damaged Plasticity*). Para o conector do tipo cabeça foi adotado o modelo elastoplástico. Para simular a interação entre os dois materiais foi utilizada a função *embedded* presente no software. Diante disso, com os resultados obtidos foi possível avaliar o comportamento do modelo quanto às deformações no conector dentro e externo ao concreto, bem como através da análise da curva carga-deslizamento. Assim, possibilitando a comparação com o experimento de Lima (2024) para validação do modelo. Além disso, o modelo possibilitou analisar as regiões danificadas, ângulo de ruptura e padrões de fissuração pelos esforços de tração no concreto através da variável dano (*DAMAGE*). Por fim, foi possível observar que o modelo apresentou boa concordância com os resultados experimentais de Lima (2024) e modo de ruptura condizente com a bibliografias analisadas.

***Palavras-chave:** Conector com Cabeça; Modelo de Dano Plástico (CDP); Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

This work presents a numerical analysis of the behavior of anchorage devices of the headed stud type in reinforced concrete elements. For this, a three-dimensional nonlinear model was developed. The numerical modeling was carried out using the 2017 version of the SIMULIA ABAQUS software, through the application of the finite element method (FEM) and based on the experimental data obtained by Lima (2024) for the validation of the numerical model. For the concrete modeling, the Concrete Damaged Plasticity (CDP) constitutive model was adopted. For the headed stud, the elastoplastic model was used. To simulate the interaction between the two materials, the embedded function present in the software was applied. Based on the results obtained, it was possible to evaluate the model's behavior concerning deformations in the stud inside and outside the concrete, as well as through the analysis of the load-slip curve. Thus, it enables the comparison with the experiment conducted by Lima (2024), which contributes to the validation of the proposed model. Furthermore, the model enabled the analysis of damaged regions, rupture angle, and cracking patterns due to tensile forces in the concrete through the damage variable (DAMAGE). Finally, it was observed that the model showed good accuracy with Lima's (2024) experimental results and a failure mode consistent with the analyzed literature.

Keywords: Headed Stud; Concrete Damaged Plasticity; Finite Element Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Barras ancoradas no concreto submetidas a tração – (a) Ancoragem em estruturas mistas; (b) Ancoragem de vigas e pilares pré-moldados; (b) Instalação de forros suspensos em lajes de concreto armado.	19
Figura 2 – Mecanismos de transferência de esforços entre aço e concreto: (a) Adesão química; (b) Atrito; (c) Aderência mecânica	21
Figura 3 – Modos de Ruptura de barras tracionada.	22
Figura 4 – Cone de ruptura de barras tracionadas – (a) eção transversal; (b) Superfície de ruptura.	23
Figura 5 – Sistema de ensaio pull-out para arrancamento de barras.	25
Figura 6 – Comparação entre as cargas últimas – $h_{ef}=110\text{mm}$ e $\phi_s= 16 \text{ mm}$	26
Figura 7 – Curvas carga-deslizamento dos modelos.	27
Figura 8 – Padrão de fissuração. $h_{ef} =1500 \text{ mm}$ (esq); $h_{ef} =150 \text{ mm}$ (dir)	27
Figura 9 – Elementos finitos comuns.	28
Figura 10 – Curva tensão-deformação do modelo elastoplástico.	30
Figura 11 – Superfícies de escoamento no plano desviante.	32
Figura 12 – Curva completa de tensão-deformação de compressão do concreto. ...	33
Figura 13 – Parâmetro α_t para ramo descendente.	35
Figura 14 – Curva completa de tensão-deformação de tração do concreto.	36
Figura 15 – Características construtivas espécime 2 do grupo 1.	37
Figura 16 – Ensaio de caracterização dos materiais: (a) Tração, Compressão e módulo de elasticidade – Concreto; (b) Tração – Aço	38
Figura 17 – Curva carga-deslizamento.	39
Figura 18 – Instrumentação utilizada por Lima (2024) – (a) posicionamento dos LVDT's; (b) Nomenclatura e posicionamento dos extensômetros	39
Figura 19 – Prisma de concreto.	40
Figura 20 – Modelagem dos elementos de aço. (a) Conector. (b) Cabeça do conector; (c) Barra longitudinal; (d) Estribo.	41
Figura 21 – Tipos de elementos finitos. (a) Elemento linear C3D8; (b) Elemento linear T3D2;	44
Figura 22 - Imagem da malha do prisma de concreto.	45
Figura 23 – Imagem da malha do conector.	45
Figura 24 – Imagem da malha da cabeça do conector.	45

Figura 25 – Montagem dos elementos modelados.....	46
Figura 26 – Contato tipo <i>tie</i> entre as superfícies do conector e cabeça. (a) <i>Master surface</i> (conector); (b) <i>Slave surface</i> (cabeça).....	47
Figura 27 – <i>Constrain Embedded Region</i> . (a) Conectores (<i>embedded region</i>) e Prisma (<i>host region</i>); (b) Armadura (<i>embedded region</i>) e Prisma (<i>host region</i>).....	48
Figura 28 – Pontos acoplados. (a) <i>Reference Point</i> 1 em conector (b) <i>Reference Point</i> 2 em conector.....	49
Figura 29 – Condições de Contorno e sistema de ensaio.....	50
Figura 30 – Aplicação dos deslocamentos no modelo.	51
Figura 31 – Curva Carga-deslizamento.....	53
Figura 32 – Deformações do Modelo. (a) Conector: fora do concreto; (b) Conector: dentro do conector	53
Figura 33 – Vista lateral da superfície de ruptura do espécime.....	55
Figura 34 – Vista lateral da superfície de ruptura do espécime.....	55
Figura 35 – Corte transversal do modelo numérico.....	56
Figura 36 – Corte transversal da superfície de ruptura do espécime H110 por Silva (2018).....	56
Figura 37 – Vista superior do cone de ruptura.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de parâmetros α_a e α_d	34
Tabela 2 – Resistência à tração das barras com cabeça do grupo 1.	38
Tabela 3 – Parâmetros elásticos e plásticos do CDP.	43
Tabela 4 – Parâmetros à compressão.....	43
Tabela 5 – Parâmetros à tração.	43
Tabela 6 – Parâmetros elásticos e plásticos do aço.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CDP	Concrete damaged plasticity
MEF	Método dos elementos finitos
CCD	Concrete Cone Design
GDL	Graus de Liberdade
LVDT	Transdutores de variação de deslocamento linear

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{ef}	Comprimento de embutimento
$\varnothing_s$	Diâmetro nominal da barra ancorada
ε	Deformação total
ε^{el}	Deformação elástica
ε^{pl}	Deformação plástica
ε_{nom}	Deformação nominal
σ_v	Tensão verdadeira
σ_{nom}	Tensão nominal
F	Função do critério de escoamento
ρ	Pressão hidrostática
q	Tensão efetiva equivalente de Von Mises
α	Parâmetro obtido pela relação entre as compressões
σ_{b0}	compressão biaxial
σ_{c0}	Compressão uniaxial
β	Parâmetro obtido pela relação entre as tensões de coesão efetiva
σ_c^e	Tensão de coesão efetiva de compressão
σ_t^e	Tensão de coesão efetiva de tração
σ_c	Tensão de compressão
σ_t	Tensão de tração
d_c	Dano por compressão
d_t	Dano por tração
K_c	Razão entre o meridiano de tração e compressão

G	Função hiperbólico de Drucker-Prugger
ϵ	Excentricidade da superfície de potencial elástico
σ_{t0}	Tensão de tração uniaxial
ψ	Ângulo de Dilatância
μ	Viscosidade
ϵ_p	Deformação correspondente à tensão máxima de compressão
σ	Tensão aplicada
f_c	Resistência a compressão do concreto
α_a	Parâmetro ascendente da curva de compressão
α_d	Parâmetro do ramo descendente da curva de compressão
α_t	Parâmetro do ramo descendente da curva de tração
E_0	Módulo de Elasticidade
E_s	Módulo secante no pico de tensão
ϵ_s	Extensômetro fora do concreto
ϵ_{sh}	Extensômetro dentro do concreto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO.....	21
2.2	MODOS DE RUPTURA	22
2.3	ESTUDOS EXPERIMENTAIS	24
2.3.1	Lima (2024).....	24
2.3.2	Silva (2018).....	25
2.4	ESTUDOS NUMÉRICOS.....	26
2.4.1	Santana (2020)	26
2.4.2	Ozbolt et al. (2007)	27
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	28
2.5.1	Graus de liberdade e dimensão do elemento.....	28
2.5.2	Condições de contorno.....	29
2.6	MODELOS CONSTITUTIVOS	29
2.6.1	Aço.....	29
2.6.2	Concreto	31
2.6.2.1	Concrete Damaged Plasticity.....	31
2.6.2.2	Comportamento a compressão.....	33
2.6.2.3	Comportamento a tração.....	34
3	DESENVOLVIMENTO E ASPECTOS METOLÓGICO	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL REALIZADO POR LIMA (2024).....	37
3.2	MODELAGEM NUMÉRICA.....	40
3.2.1	Geometria dos modelos.....	40
3.2.2	Propriedades dos materiais.....	42
3.2.3	Malha em elementos finitos	44
3.2.4	Montagem.....	46
3.2.5	Contatos	47
3.2.6	Condições de contorno.....	49
3.2.7	Passos de carga	50
3.2.8	Carregamento	51
3.2.9	Dados de Saída	51
3.2.10	Trabalho.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52

4.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	52
4.2 MODOS DE RUPTURA	54
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

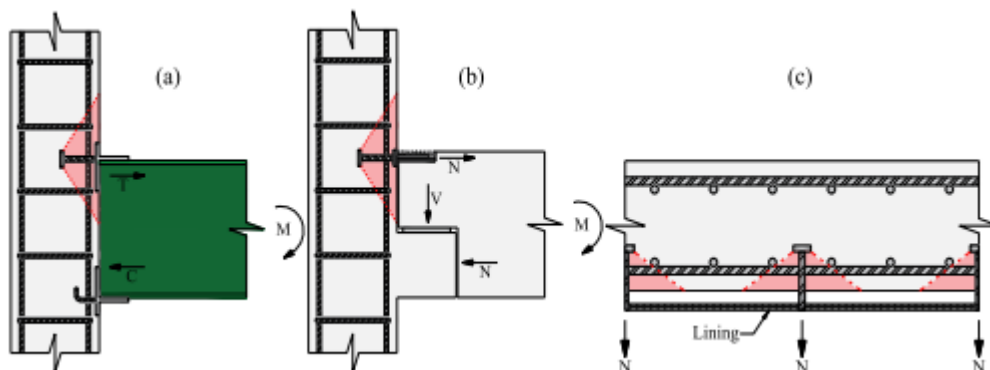
1 INTRODUÇÃO

Na etapa de concepção de um projeto é necessário decidir qual a solução estrutural que mais se adeque ao modelo arquitetônico e a que proporciona uma maior economia ao empreendimento, assim como a que irá produzir uma maior facilidade na fase de construção. Desse modo, as estruturas mistas de concreto e aço tornam-se bastante utilizadas, pois a combinação entre esses dois materiais permite extrair o máximo desempenho de ambos. Dessa forma, torna-se fundamental a verificação e o correto dimensionamento das ligações entre esses dois materiais, visto que estes devem atuar em conjunto de maneira a absorver as deformações e os esforços solicitantes.

Segundo Clímaco (2008) a aderência entre aço e concreto é o que assegura o bom desempenho de ambos os materiais sem que haja deslizamento ou escorregamento relativo sob solicitação. Portanto, a solidariedade entre os materiais é de extrema importância para que o conjunto possua um comportamento monolítico e um bom desempenho estrutural. Além disso, segundo Fusco (1994) esta propriedade é resultado da composição de diversas parcelas, sendo elas: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica.

O emprego das barras de aço é bem difundido na construção civil, tendo em vista sua diversidade de aplicação em diferentes tipos de obras. Assim, é importante ressaltar que além de sua aplicação como armadura de vigas, pilares e lajes de concreto armado, elas também podem ser utilizadas como elementos de ligação em estruturas mistas de aço-concreto (ver Figura 1-a), em estruturas pré-moldadas (ligação viga-pilar, Fig 1-b) e na instalação de forros em lajes de concreto armado (Figura 1-c). Visto isso, a ineficiência dessas ligações pode impactar diretamente no desempenho estrutural, custo e eficiência da edificação. Portanto, é de grande importância o conhecimento dos mecanismos de resistência desses elementos.

Figura 1 – Barras ancoradas no concreto submetidas a tração – (a) Ancoragem em estruturas mistas; (b) Ancoragem de vigas e pilares pré-moldados; (b) Instalação de forros suspensos em lajes de concreto armado.



Fonte: Santana (2020)

Percebe-se que o fenômeno de transferência de esforços entre barras de aço e concreto possui grande complexidade, pois existem vários fatores que influenciam na interação entre esses materiais. Consequentemente, estudos como os de Lima (2024) e Silva (2018) investigaram o comportamento do arrancamento de elementos de aço embutidos em concreto por meio de experimentos. Com o mesmo intuito, estudos como o de Santana (2020), Ozbolt et al. (2007) utilizaram ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos (MEF) para essa análise.

Por muitas vezes, estudos experimentais se tornam uma opção inviável, tendo em vista aspectos como o custo dos materiais, limitações de instrumentação e a complexidade no desenvolvimento dos ensaios, preponderantemente na análise do arrancamento de barras de aço em elementos de concreto, que utilizam ferramentas que apresentam significativa sensibilidade. Assim, a modelagem computacional pode ser utilizada a fim de simular o comportamento desses experimentos por meio da utilização de softwares com metodologia de análise MEF.

Entretanto, é fundamental destacar que a análise computacional não deve ser vista como um substituto da análise experimental, mas sim como uma abordagem complementar que enriquece a compreensão. Ambas metodologias possuem suas vantagens e limitações, e quando utilizadas em conjunto, proporcionam uma visão mais detalhada do fenômeno estudado. Com base nessa perspectiva, a presente pesquisa realizou uma análise numérica do arrancamento de pinos tipo conector com cabeça inseridos em elementos de concreto armado por meio da utilização do software ABAQUS, fundamentando-se nos dados experimentais obtidos por Lima (2024) para validação dos resultados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo numérico via método dos elementos finitos com a finalidade de investigar o comportamento dos dispositivos de ancoragem do tipo conector com cabeça embutido elementos de concreto armado.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Desenvolver, através do SIMULIA ABAQUS, um modelo computacional tridimensional não linear para análise de 01 ensaio experimental do tipo *pull-out* em conectores com cabeça no realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília por Lima (2024);
- Modelar o concreto armado por meio da utilização do modelo constitutivo de dano plástico *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), modelo capaz de representar o comportamento mecânico de materiais frágeis.
- Comparar os resultados obtidos na modelagem numérica com os resultados experimentais evidenciados no estudo de Lima (2024), com o intuito de realizar a validação do modelo.

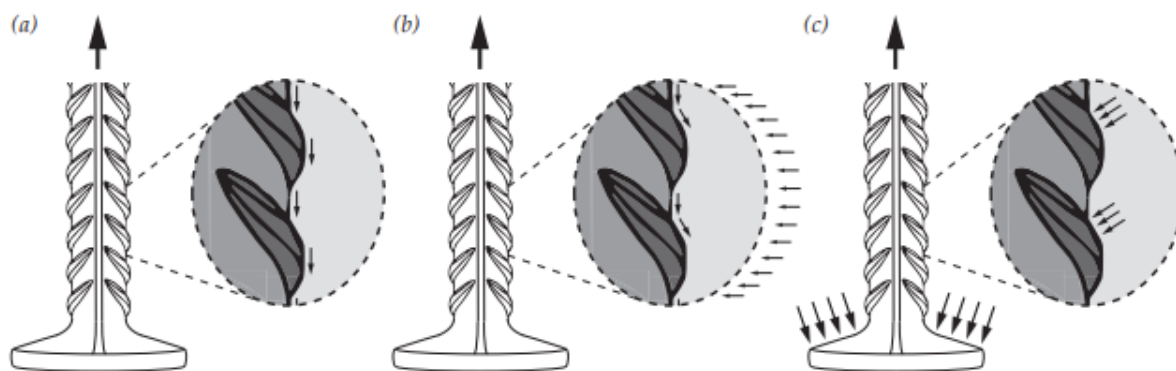
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados conceitos relacionados à ancoragem de barras de aço em elementos de concreto armado. E, seguida, serão apresentados os principais modos de ruptura das barras ancoradas e uma revisão de estudos experimentais e numéricos que investigam o comportamento dessas ancoragens sob tração. Por fim, serão apresentados conceitos relacionados ao método dos elementos finitos e modelos constitutivos utilizados na análise.

2.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO

A transferência de esforços entre as barras de aço e os elementos de concreto são garantidos pela solidarização entre estes dois materiais, que podem ser classificadas em três parcelas distintas: adesão química, atrito e aderência mecânica, como é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Mecanismos de transferência de esforços entre aço e concreto: (a) Adesão química; (b) Atrito; (c) Aderência mecânica



Fonte: Branstschén (2016)

A adesão química, Figura 2-a, é a primeira parcela dos mecanismos de transferência de esforços em que as forças de ligações químicas entre o aço e o concreto garantem a coesão inicial, oriunda do processo de reação de pega do cimento.

A segunda parcela é o atrito, Figura 2-b, que surge na presença de esforços normais, resultante do deslizamento entre as superfícies de contato do aço e do concreto. Segundo Fusco (1994), essas forças dependem dos coeficientes de atrito

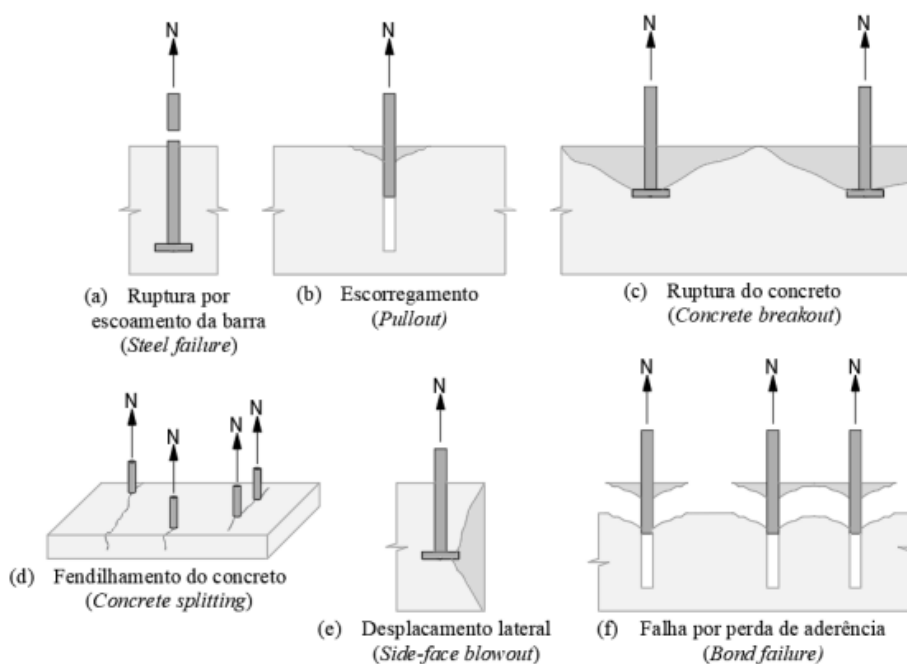
entre o aço e o concreto, os quais são determinados pela rugosidade da superfície da barra, assim como pela pressão de contato exercida pelo concreto sobre a barra que surgem no processo de retração do concreto. Diante disso, com a presença da barra, o processo de retração é inibido parcialmente, surgindo assim a pressão transversal, que ocasiona o acréscimo de aderência.

A aderência mecânica, Fig. 2-c, é a que ocorre devido às deformações mecânicas ao longo da superfície das barras, que são dispostas intencionalmente no processo de fabricação. Dessa forma, as nervuras nas barras funcionam como apoio, gerando tensões de compressão no concreto. (FUSCO, 1994)

2.2 MODOS DE RUPTURA

Segundo a ACI (*American Concrete Institute*) 318 (2019), quando submetidas ao esforço de tração, as barras ancoradas em elementos de concreto armado, apresentam os principais modos de ruptura (Fig. 3), sendo eles: escoamento e ruptura da barra de aço, escorregamento da ancoragem, ruptura pela formação do cone de concreto, fendilhamento, deslocamento, e ruptura por falta de aderência entre as superfícies.

Figura 3 – Modos de Ruptura de barras tracionada.



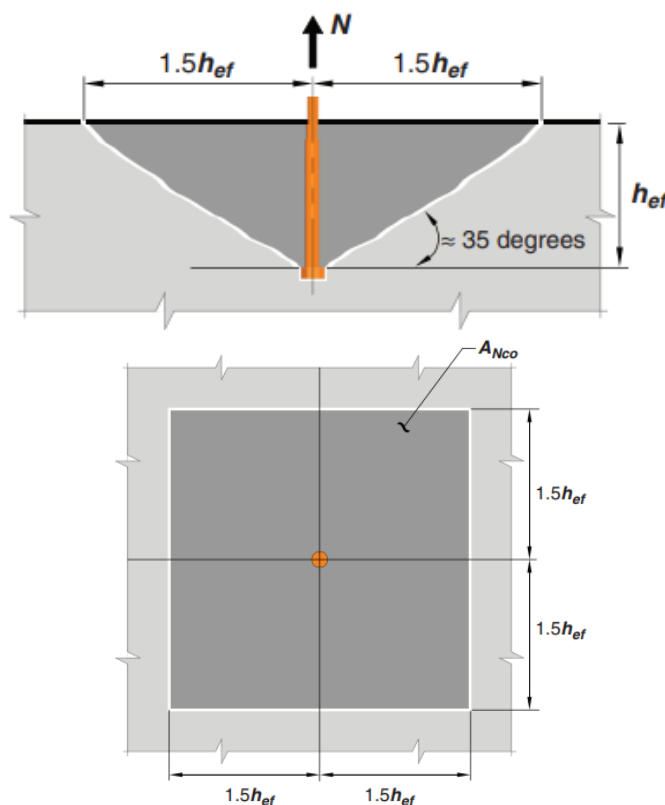
Fonte: Silva (2018)

A ruptura por escoamento, (Fig. 3-a), ocorre quando o esforço de tração for igual ou maior que a carga de escoamento, que pode ser causado pela utilização de barras de aço com área insuficiente em seu estado de solicitação, bem como por grandes comprimentos de embutimento, dessa forma ocorrendo a falha do aço sem que haja a ruptura do concreto.

No escorregamento, (Fig. 3-b), o processo de transferência de esforços entre a barra de aço e o elemento de concreto falha, principalmente na aderência por atrito e na adesão gerada pelas nervuras, desse modo ocorre o escorregamento relativo entre os dois materiais.

Já na Figura 3-c, segundo Eligehausen et al. (2006), ocorre a falha por ruptura do concreto caracterizada pela formação do cone originado da base do conector. Ele afirma que a superfície cônica do elemento de concreto é de aproximadamente 35° . A norma ACI 318 (2019), para verificação da ruptura desse cone a partir do modelo da capacidade de concreto (CCD – Concrete Cone Design), onde h_{ef} é o comprimento de embutimento do conector, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Cone de ruptura de barras tracionadas – (a) seção transversal; (b) Superfície de ruptura.



Fonte: ACI 318 (2019)

Na Fig. 3-f, apresenta comportamento similar ao modo de ruptura da Figura 3-c, entretanto esta possui uma menor mobilização de concreto no cone de ruptura, tendo em vista a falha do mecanismo de transferência de esforços pela perda de aderência. Além disso, percebe-se o efeito de grupo gerado pela proximidade das barras em ambos modos de ruptura.

O fendilhamento do concreto, Fig. 3-d, é a formação de fissuras que ocorre paralelamente ao eixo da barra, que é ocasionado pelo acúmulo de esforços de tração oriundos do mecanismo de aderência. Dessa forma, quando a barra de ancoragem está próxima a borda do elemento de concreto, Figura 3-e, ocorre o descolamento lateral de concreto na região abaixo da cabeça do conector. (Fusco, 1994)

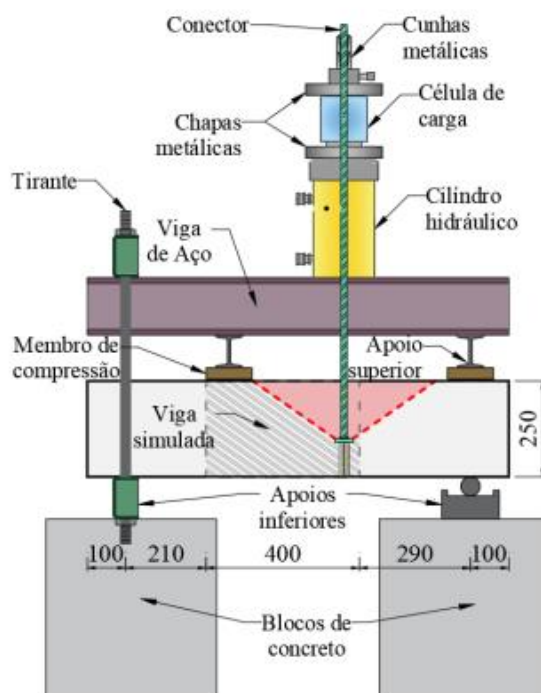
2.3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

2.3.1 Lima (2024)

Lima (2024), analisou o comportamento do arrancamento de barras com cabeça sob o esforço de tração. O autor realizou 38 ensaios, 12 desses, analisou-se o efeito de borda e a ação combinada dos efeitos de borda e de grupo, levando em consideração a influência das armaduras longitudinais na resistência última das barras. Os outros 24 ensaios, foram realizados com o intuito de investigar o impacto gerado pela colocação de armaduras suplementares e pelo aumento da resistência do concreto nos efeitos de borda e de grupo. Além disso, foram realizadas as variações nos diâmetros das barras com cabeça (12,5 a 20,0 mm), nos comprimentos de embutimento (60 a 150 mm), e nas distâncias do pino até a borda. Os prismas de concreto possuíam forma cúbica, com comprimento de altura de 1100 e 250mm respectivamente, e com largura variada de 225 a 600mm. Na Figura 5 é apresentado o esquema de aplicação de carga do sistema de ensaio.

Por meio dos resultados, o autor identificou que o h_{ef} representa maior parcela de influência na resistência do cone de concreto das barras, que variando o comprimento de embutimento de 80 mm para 110 mm e 150 mm, foi possível obter um acréscimo de 38% e 153%, respectivamente, na capacidade resistente das barras à tração. Além disso, ele verificou que a presença da armadura suplementar elevou o valor da resistência do cone de ruptura das barras, chegando a ter uma contribuição de até 56%.

Figura 5 – Sistema de ensaio pull-out para arrancamento de barras.



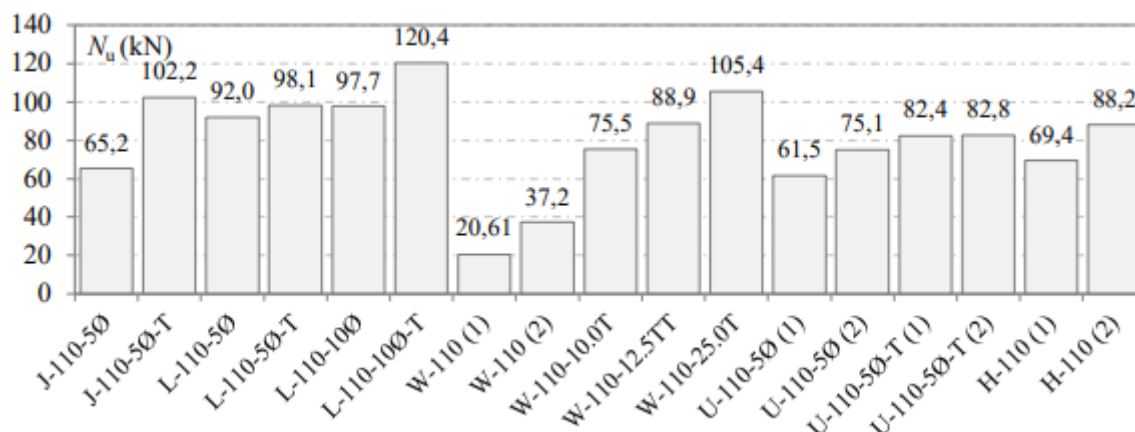
Fonte: Lima (2024)

2.3.2 Silva (2018)

Na pesquisa realizada por Silva, foi analisado o arrancamento de barras variando diferentes tipos de ancoragem, com o intuito de observar o comportamento desta quando submetido a tração. A autora fez análise 34 modelos para ensaio experimental, 17 desses foram realizados com diâmetro nominal de 10 mm e com comprimento de 60 mm. Os outros 17 o diâmetro nominal utilizado foi de 16 mm e altura de embutimento de 110 mm. Além disso, a variação da ancoragem foi feita utilizando conectores com cabeça, ganchos de 45° e 180°, e dobras com 90°.

Com base nos resultados da pesquisa, a autora identificou, que a variação dos tipos de ancoragem apresentou resultados semelhantes ou próximos, nos modelos de 60 mm de embutimento, e com diâmetro de 10mm. Entretanto, os modelos com 16 mm de diâmetro nominal e embutimento igual a 110 mm, apresentam mudanças significativas. Por fim, a ancoragem que proporcionou maior esforço de tração foi a com dobra de 90° em ambos modelos analisados. Abaixo na Figura 6, serão apresentadas as comparações entre as cargas últimas alcançadas pelos conectores com $h_{ef}=110\text{mm}$ e $\phi_s = 16 \text{ mm}$, que é dada em função dos modelos do tipo de gancho 45°(J), 90°(L), barra reta (W), 180° (U) e conectores com cabeça (H).

Figura 6 – Comparação entre as cargas últimas – $h_{ef}=110\text{mm}$ e $\phi_s=16\text{ mm}$.



Fonte: Silva (2018)

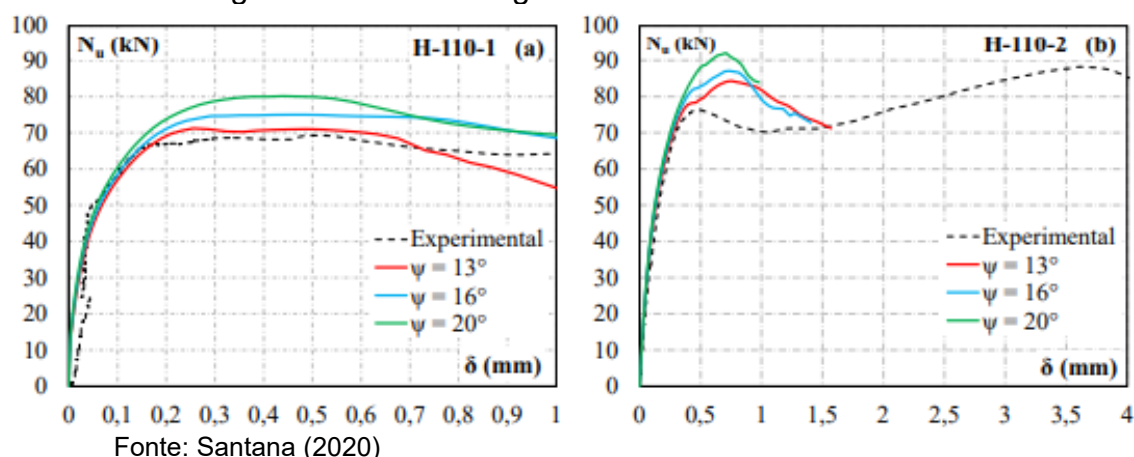
2.4 ESTUDOS NUMÉRICOS

2.4.1 Santana (2020)

Santana, desenvolveu modelo numérico tridimensionais não-linear para analisar o arrancamento de ancoragens de pinos do tipo conector com cabeça sob tração. O modelo foi elaborado através da utilização do software ABAQUS, que foi capaz de simular 4 ensaios *pull-out*, utilizando como base para validação os experimentos realizados por Silva (2018). Para representação do comportamento do concreto foi utilizado o modelo constitutivo CDP. No estudo, o autor analisou as variações nos resultados, tendo em vistas as seguintes variáveis: tipo de elemento finito (C3D8, C3DR8) e ângulo de dilatância (13° , 16° e 20°).

Os resultados da modelagem numérica mostraram que o elemento finito do tipo C3D8 aplicados nas regiões de formação do cone de ruptura apresentaram uma melhor precisão nas curvas carga-deslizamentos quando comparados com os resultados experimentais de Silva (2018). Na análise do ângulo de dilatância, o autor observou que para este ângulo igual a 13° uma maior precisão nas curvas carga deslizamento é obtida, dessa forma, apresentando um erro médio de 2,5%. Na Figura 7 é apresentado a análise comparativa das curvas carga-deslizamento do modelo com 110 mm de comprimento de embutimento.

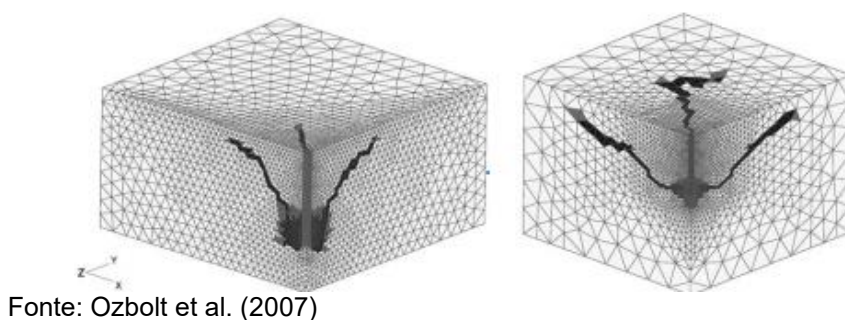
Figura 7 – Curvas carga-deslizamento dos modelos.



2.4.2 Ozbolt et al. (2007)

Neste estudo, foram realizadas as modelagens numéricas de diferentes ancoragens de pinos com cabeça embutidos no concreto em situação de tração, preponderantemente, em grandes comprimentos, com intuito de comparar as cargas de rupturas obtidas na modelagem com as estimada por métodos normativos. Desse modo, no modelo foram analisadas diferentes profundidades de embutimento variando de 150 a 1500 mm. Além disso, também foram variadas as dimensões das cabeças dos conectores, variando de 22 a 311 mm.

Através dos resultados da pesquisa, o autor identificou que quanto maior o h_{ef} das barras maior a resistência do cone de concreto. Também, os dados da modelagem numérica evidenciaram que com o aumento da cabeça dos pinos existe um aumento na resistência ao arrancamento. Além disso, a modelagem numérica possibilitou a observação dos padrões de fissuração do concreto. Desse modo, foi possível observar que em grandes profundidades de embutimento o cone de concreto possui maior inclinação. Como é apresentado na Figura 8.

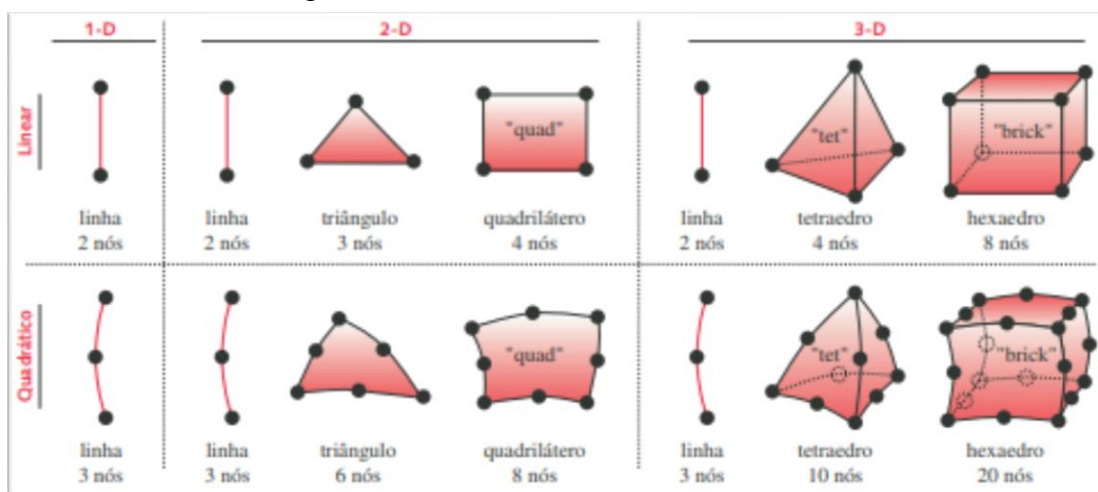
Figura 8 – Padrão de fissuração. $h_{ef} = 1500$ mm(esq); $h_{ef} = 150$ mm(dir)

2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.5.1 Graus de liberdade e dimensão do elemento

Segundo Norton (2013), os elementos finitos são divididos em grupos, que são classificados de acordo com suas dimensões, podendo ser grupos com uma, duas e três dimensões, intitulados de 1-D, 2-D e 3-D, respectivamente, como é apresentado na Figura 9. Além disso, esses grupos definem os graus de liberdade (GDL) de cada nó em seus respectivos elementos.

Figura 9 – Elementos finitos comuns.



Fonte: Norton (2013)

Os elementos de barra são indicados para modelagem de vigas e treliças com seção transversal constante ao longo de seu comprimento longitudinal, e podem ter 1, 2, 3 e 6 GDL em seus nós. (Norton, 2013)

Nesse sentido, os elementos de linha 1-D têm 2 GDL no total, sendo um em cada nó. Fisicamente, esses elementos representam uma barra de treliça, conectada por pinos em ambas as extremidades. Esse elemento pode transmitir esforços ao longo de seu comprimento e não suportam momentos em seus nós. (Norton, 2013)

Os elementos de linha 2-D possuem 3 GDL por nó e são indicados para análise de vigas em 2-D, com forças e momentos em duas direções. Ademais, os elementos 2-D podem ser aplicados na análise de estruturas tridimensionais se sua geometria e seu carregamento criam tensões e deformações planas em que suas intensidades são nulas na terceira dimensão. (Norton, 2013)

Segundo Norton (2013), os elementos 3-D têm 6 GDL em cada nó e podem ser utilizados para análise de vigas que possuem esforços em 3-D com momentos, torques e forças lineares nas três dimensões. Já os elementos como triângulo, quadrilátero, tetraedros e hexaedros, possuem mais GDL e são utilizados para análise de geometrias mais complexas, como é o caso do objeto de estudo da presente pesquisa.

2.5.2 Condições de contorno

Segundo Norton (2013), a definição das condições de contorno (CC), que representa as restrições reais em um componente, não é uma tarefa simples e pode fazer diferença, já que se pode obter uma solução razoável ou ridícula para um determinado problema.

As condições de contorno devem ser aplicadas ao modelo para remover qualquer tipo de grau de liberdade, a fim de se obter o equilíbrio estático da peça. Em acréscimo, as restrições devidas as conexões físicas externas devem ser modeladas o mais próximo da realidade. (Norton, 2013)

Uma restrição física não apresentará uma rigidez infinita, mas quando um nó é especificado como não móvel em uma análise por MEF, ele está realmente fixo e se torna infinitamente rígido. Dessa forma, ocorre um exagero no efeito das restrições físicas. (Norton, 2013)

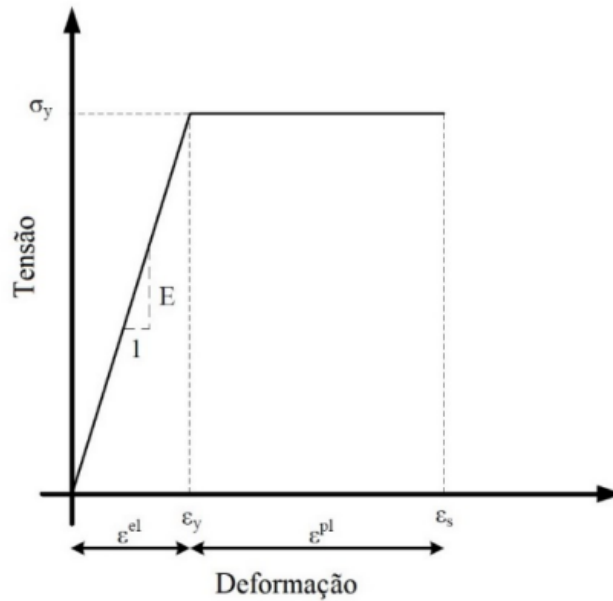
2.6 MODELOS CONSTITUTIVOS

Para representar o comportamento dos materiais a serem simulados no software, utilizou-se de modelos constitutivos, que serão apresentados nesta seção.

2.6.1 Aço

O comportamento do aço é descrito pela Figura 10, que consiste no modelo elastoplástico do material.

Figura 10 – Curva tensão-deformação do modelo elastoplástico.



Fonte: Medeiros (2018)

O modelo elastoplástico descreve o comportamento do aço por meio do gráfico de tensão-deformação, conforme ilustrado na Figura 10. O modelo dividi o material em duas fases, elástica e plástica. Assim, para calcular a deformação total utiliza-se a equação 1.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad (1)$$

Onde ε^{el} é a deformação elástica e ε^{ep} é a deformação plástica. No entanto, o software ABAQUS trata essas deformações separadas. Portanto, torna-se necessário a conversão de tensão nominal para tensão verdadeira, conforme Equação 2.

$$\sigma_v = \sigma_{nom} \cdot (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

De posse desses valores torna-se possível calcular a deformação total para cada valor de tensão verdadeira através da equação 3.

$$\varepsilon = \ln \cdot (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3)$$

Como a resposta elástica é linear e isotópica utiliza-se apenas o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Entretanto, na parte plástica torna-se

necessário a utilização de uma relação plástica uniaxial, onde a deformação plástica é obtida pela subtração da deformação total pela por uma parcela relativa à deformação elástica, apresentada na equação 4.

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma_v}{E} \quad (4)$$

2.6.2 Concreto

2.6.2.1 Concrete Damaged Plasticity

De acordo com Kmiecik e Kaminski (2011), o modelo constitutivo Concret Damaged Plasticity é uma adaptação do modelo proposto por Drucker-Prager, que é amplamente utilizado na modelagem de materiais com comportamento não linear, como o concreto. De acordo com Santos (2019), os modelos constitutivos são adequados para representarem o comportamento mecânico do concreto em modelagens numéricas, visto que, este representa o comportamento inelástico do concreto utilizando conceitos de tração isotrópica e compressão plástica. Dessa forma, este modelo é integrado ao software ABAQUS para modelagem de concreto em baixo confinamento de pressões.

O modelo constitutivo de dano plástico leva em consideração uma série de parâmetros para descrever o comportamento do concreto, são eles os critérios de escoamento, regra de fluxo e a evolução dos parâmetros. Segundo Lubliner et al. (1989) e modificado por Lee e Fenves (1998), a função F que representa o critério de escoamento é definida logo abaixo pela Equação 5:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} \cdot (q - 3 \cdot \alpha \cdot p + \beta \cdot \langle \sigma_{m\acute{a}x} \rangle - \gamma - \langle \sigma_{m\acute{a}x} \rangle) - \sigma_c^e = 0 \quad (5)$$

Onde p é a pressão hidrostática, q é a tensão efetiva equivalente de Von Mises. O parâmetro α é calculado de acordo com a Equação 6, onde σ_{b0} é a compressão biaxial e σ_{c0} é a compressão uniaxial. Conforme manual do usuário ABAQUS, utiliza-se $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$.

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})^{-1}}{2 \cdot (\sigma_{b0}/\sigma_{c0})^{-1}} \quad (6)$$

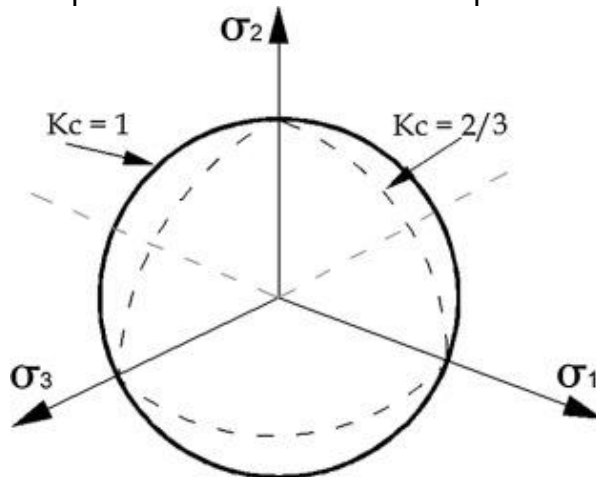
O parâmetro β é dado em função das tensões de coesão efetiva para compressão (σ_c^e) e tração (σ_t^e), conforme 7, sendo $\sigma_c^e = \sigma_c / (1 - d_c)$ e $\sigma_t^e = \sigma_t / (1 - d_t)$. Onde d_c e d_t são os valores que representam os danos do material a compressão e a tração, respectivamente. Consequentemente, é necessário realizar as correções das tensões verdadeiras e deformações plásticas assim como é feito para o modelo constitutivo do aço, conforme apresentado no tópico anterior (Equações 2, 3 e 4).

$$\beta = \frac{\sigma_c^e}{\sigma_t^e} \cdot (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (7)$$

A superfície de escoamento é definida pelo parâmetro γ de acordo com a Equação 8, onde o parâmetro K_c é a razão entre o meridiano de tração e compressão, que define a forma da superfície de escoamento no plano deslizando, conforme Figura 11. O ABAQUS recomenda assumir $K_c = 2/3$.

$$\gamma = \frac{3 \cdot (1 - K_c)}{2 \cdot K_c - 1} \quad (8)$$

Figura 11 – Superfícies de escoamento no plano desviante.



Fonte: Genikomsou et al. (2015)

Para definição do fluxo plástico, o modelo CDP utiliza a função hiperbólica de Drucker-Prager não associativa, que é definida de acordo com a Equação 9.

$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{t0} \cdot \tan\psi)^2 + q^2} - p \cdot \tan\psi \quad (9)$$

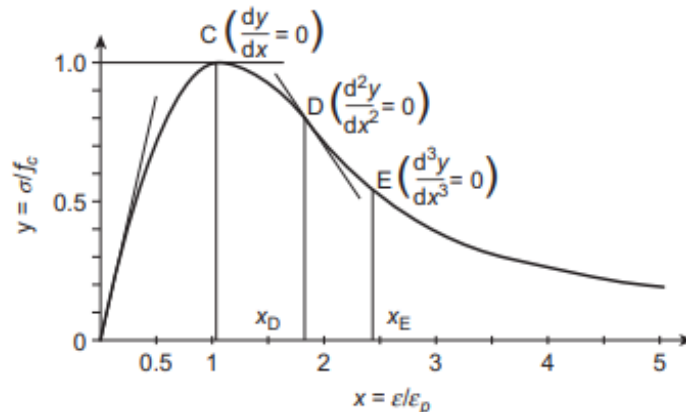
Onde ϵ é a excentricidade da superfície de potencial plástico, σ_{t0} é a tensão de tração uniaxial e ψ é o ângulo de dilatância. Segundo Kmiecik e Kaminski (2011), determina-se o ângulo de dilatância como o ângulo de atrito interno do concreto e recomenda a utilização do ângulo de $\psi = 36^\circ$.

Além dos parâmetros apresentados, é necessário fornecer ao software ABAQUS a viscosidade (μ), que é o valor responsável pela regularização viscoplástica das equações constitutivas, fazendo com que a rigidez tangente consistente do material se torne positiva para incrementos de tempo suficientemente pequenos, indicado para materiais com dificuldade de convergência em programas de análise implícita, como ABAQUS. O software utiliza como padrão o valor desse parâmetro igual a 0, de modo que não seja feita nenhuma regularização viscoplástica. (Medeiros, 2018)

2.6.2.2 Comportamento a compressão

Segundo Guo (2014) o comportamento do concreto pode ser descrito pela curva típica de materiais sujeitos a compressão uniaxial, ver Figura 12. Esta curva consiste em transformar o comportamento do concreto na curva tensão-deformação em coordenadas adimensionais x e y , onde x é a razão entre a deformação (ϵ) e a deformação correspondente à tensão máxima de compressão (ϵ_p), e y a razão entre tensão aplicada (σ) e a tensão máxima ou resistência à compressão do material (f_c).

Figura 12 – Curva completa de tensão-deformação de compressão do concreto.



Fonte: Guo (2014)

O comportamento é dividido em duas etapas: (1) um trecho semi parabólico ascendente, indicando que à medida que a tensão aumenta, a deformação também aumenta, ou seja, o material se encontra na fase elástica e parcialmente plástica até chegar ao ponto C ($\sigma=f_c$). Por conseguinte, inicia-se o trecho (2), que representa a fase plástica do material, ou seja, as deformações aumentam sem que haja o acréscimo de tensões. Analiticamente, as duas regiões da curva são descritas pelas Equações 10 e 11.

$$x \leq 1 \quad y = \alpha_a x + (3 - 2)x^3 \quad (10)$$

$$x \geq 1 \quad y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} \quad (11)$$

Onde, o parâmetro α_a , é o parâmetro ascendente que representam o valor da razão entre o módulo de elasticidade inicial (E_0) e o módulo secante no pico de tensão (E_p). O α_d é o parâmetro que representa o ramo descendente, que varia de 0 ao ∞ , ou seja, total plasticidade e total fragilidade, respectivamente. (GUO, 2014)

Segundo Guo (2014) apud Guo et al. (1981), esses parâmetros são adotados de acordo com seu grau de resistência do cimento usado, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de parâmetros α_a e α_d .

Grau de Resistência	Grau do cimento usado	α_a	α_d
C20, C30	32,5	2,2	0,4
	42,5	1,7	0,8
C40	42,5	1,7	2,0

Fonte: Modificado Guo (2014)

2.6.2.3 Comportamento a tração

A curva de tensão-deformação para descrever o comportamento do concreto a tração pode ser dividida em dois trechos: um trecho ascendente suave apresentando um único pico e outro trecho descendente, similar a curva de compressão. Entretanto, no ramo descendente da curva de tração apresenta comportamento mais acentuada. Assim, satisfazendo as características geométricas da curva tensão deformação completa para tração.

O gráfico é representado por dois eixos, x e y, onde x é a razão entre a deformação (ϵ) e a deformação correspondente à tensão máxima de tração ($\epsilon_{t,p}$), e y a razão entre tensão aplicada (σ) e a tensão máxima ou resistência à tração (f_t).

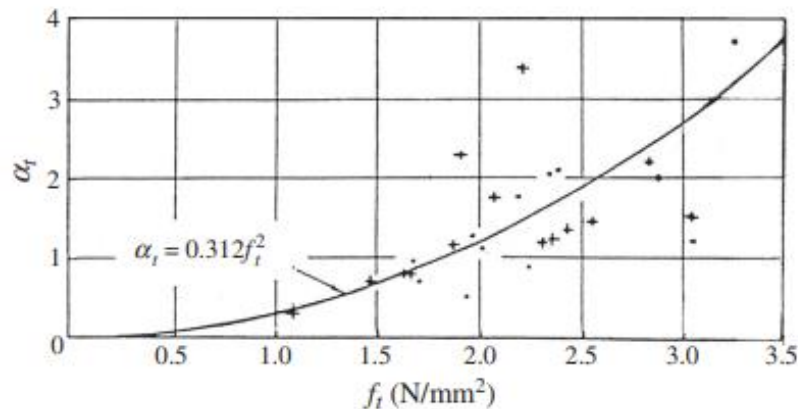
As equações 12 e 13, respectivamente, representam analiticamente o comportamento ascendente e descendente da curva.

$$x \leq 1 \quad y = 1,2x + 0,2x^6 \quad (12)$$

$$x \geq 1 \quad y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1,7}+x} \quad (13)$$

O valor 1,2 representa a relação entre o módulo de elasticidade inicial e os módulos secantes de deformação no ponto de pico.

Figura 13 – Parâmetro α_t para ramo descendente.



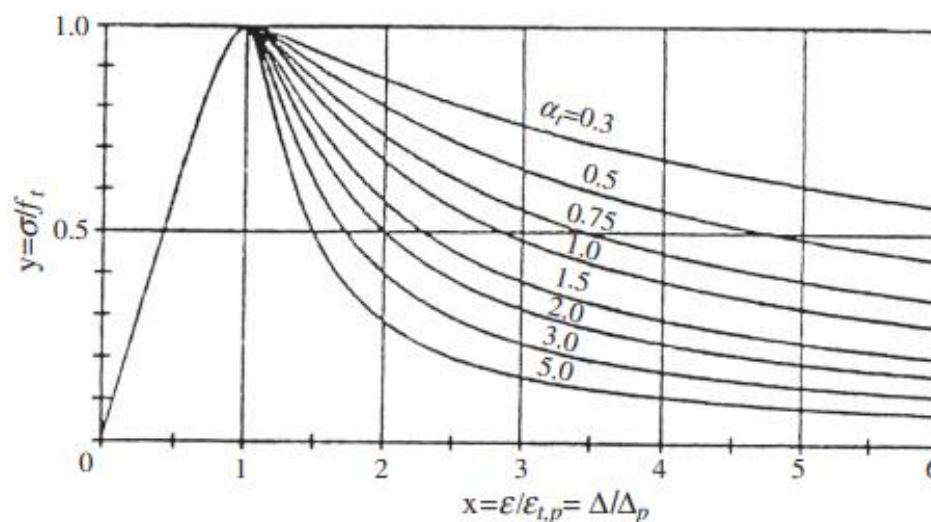
Fonte: Guo (2014)

O parâmetro α_t , representa o comportamento do ramo descendente que aumenta em função da resistência a tração, ver Figura 13, e pode ser calculado empiricamente pela equação 13.

$$\alpha_t = 0,312f_t^2 \quad (14)$$

Onde f_t é a resistência à tração do concreto em N/mm². Assim, as curvas teóricas calculadas por estas equações são mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Curva completa de tensão-deformação de tração do concreto.



Fonte: Guo (2014)

3 DESENVOLVIMENTO E ASPECTOS METOLÓGICO

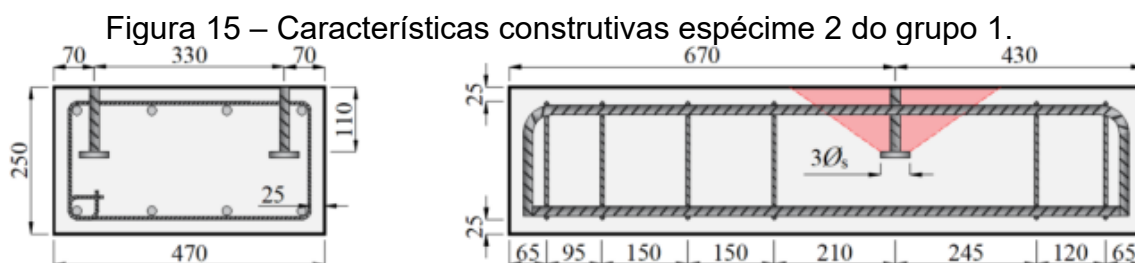
Para análise de uma estrutura real pode-se elaborar um modelo numérico, a fim de observar o comportamento da estrutura sob as diversas solicitações com confiabilidade e precisão, por meio da utilização de ferramentas computacionais. No entanto, os modelos computacionais precisam de validação. Dessa maneira, inicialmente foram realizadas consultas bibliográficas para se ter como base ensaios experimentais e optou-se pela utilização dos estudos realizados por Lima (2024).

Portanto, a presente seção irá apresentar a metodologia empregada neste trabalho. No primeiro momento, serão expostas as características construtivas, e resultados obtidos pelo estudo experimental proposto pelo Dr. Nataniel Wontoon Barbosa Lima em sua tese de doutorado, intitulada “Influência da armadura longitudinal na resposta experimental de barras com cabeça sujeitas ao efeito de borda, efeito de grupo e com armadura suplementar”. Por conseguinte, serão apresentados os aspectos do concreto e do conector com cabeça modelados no ambiente ABAQUS, que são eles: a geometria, propriedades, malha em elementos finitos, montagem, contatos, condições de contorno, passos de carga, carregamentos, dados de saída e trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL REALIZADO POR LIMA (2024)

Lima realizou a análise de 38 espécimes, que foram divididas em 4 grupos. No grupo 1 foram analisadas a influência do efeito de borda na resistência à tração do conector. O grupo 2, além de analisar o efeito de borda, incluiu também o efeito de grupo na análise. Nos grupos 3 e 4, respectivamente, foram incluídos na análise a adição de armaduras suplementares, mantendo as características construtivas e parâmetros analisados pelo grupo 1 e 2.

Na presente pesquisa foi realizada a modelagem do espécime 2 do grupo 1, cujas características construtivas são apresentadas na Figura 15. No grupo 1, foram variados os valores de h_{ef} entre 60 mm e 150 mm e distâncias de bordas de 52 mm a 135 mm. É necessário informar que a cabeça do conector possui diâmetro de 3 vezes o diâmetro do conector e espessura de 10 mm. Além disso, a armação é composta por barras longitudinais e estribos, que possuem diâmetro de 16 e 6,3 mm, respectivamente.



Fonte: Lima (2024)

Para caracterização das propriedades mecânicas do concreto Lima (2024) utilizou como parâmetros as recomendações das normas ABNT NBR 7222 (2011), ABNT NBR 5739 (2018), ABNT NBR 8522-1 (2021), que trazem diretrizes para os ensaios de compressão uniaxial, tração por compressão diametral e determinação do módulo de elasticidades. Assim como, as propriedades mecânicas do aço utilizado nos ensaios foram definidas seguindo as recomendações prescritas na norma ABNT NBR 6892 (2013). Conforme é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Ensaios de caracterização dos materiais: (a) Tração, Compressão e módulo de elasticidade – Concreto; (b) Tração – Aço



(a)



(b)

Fonte: Lima (2024)

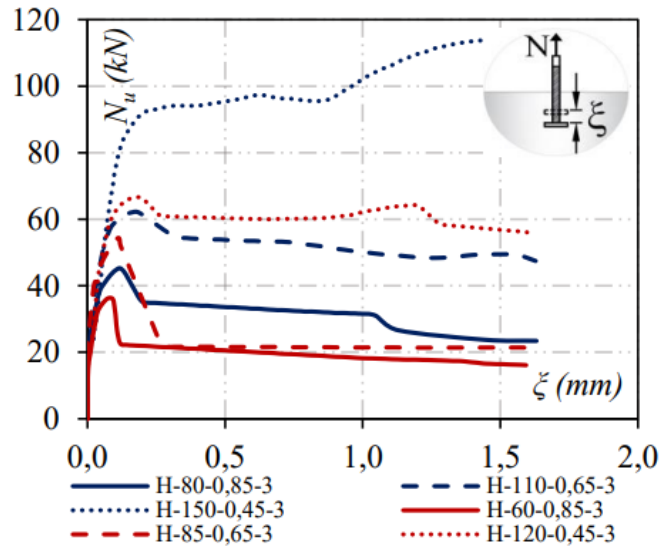
Na tabela 2, é apresentado um resumo das cargas alcançadas no arrancamento dos conectores com cabeça do grupo 1. A Figura 17, apresenta o comportamento carga-deslizamento dos espécimes 1, em especial a curva do espécime H-110-0,65-3, que foi utilizado para calibração do modelo numérico dessa pesquisa. Além disso, a Figura 18 apresenta processo de instrumentação utilizado por Lima (2024) para a leitura destes dados.

Tabela 2 – Resistência à tração das barras com cabeça do grupo 1.

ID	Espécime	h_{ef} (mm)	N_u (KN)
1	H-80-0,85-3	80	45,2
2	H-110-0,65-3	110	62,5
3	H-150-0,45-3	150	114,2
4	H-60-0,85-3	60	36,3
5	H-85-0,65-3	85	54,4
6	H-120-0,45-3	120	66,7

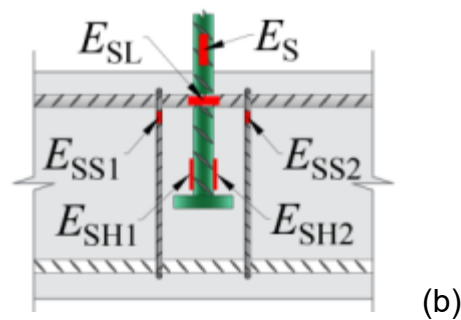
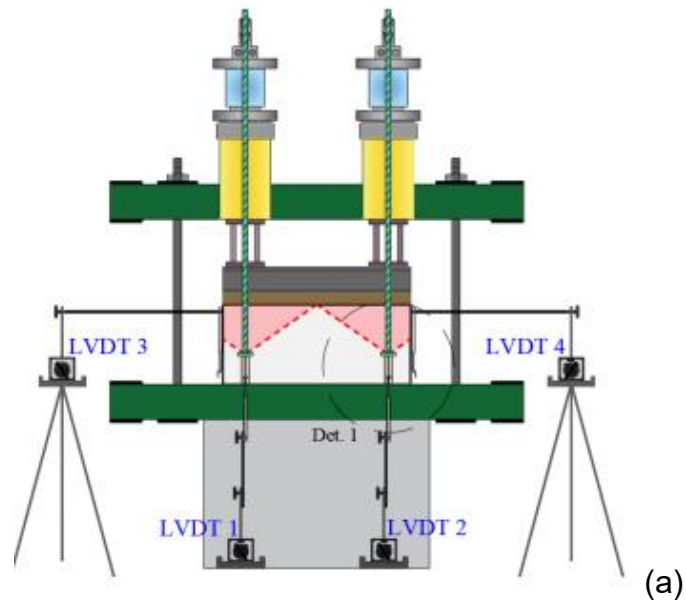
Fonte: Modificado Lima (2024)

Figura 17 – Curva carga-deslizamento.



Fonte: Lima (2024)

Figura 18 – Instrumentação utilizada por Lima (2024) – (a) posicionamento dos LVDT's; (b) Nomenclatura e posicionamento dos extensômetros



Fonte: Lima (2024)

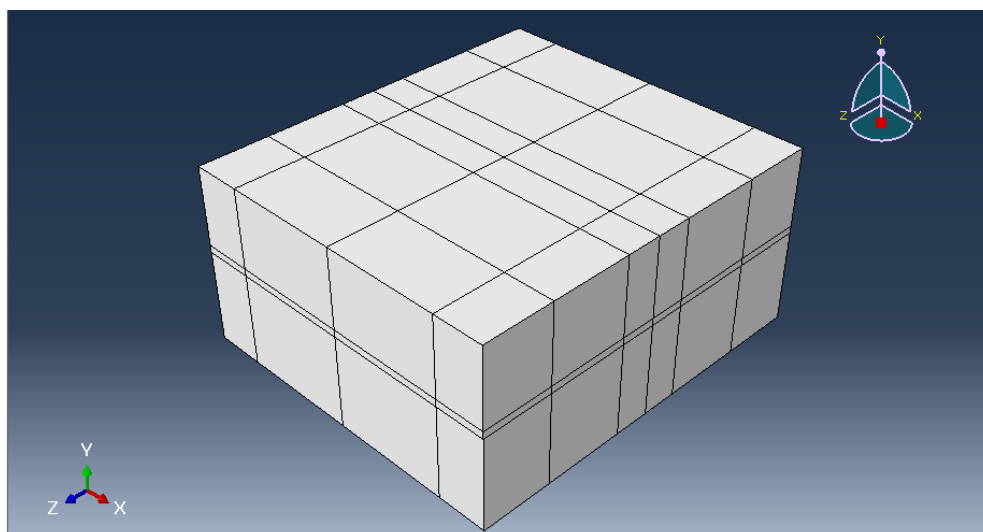
3.2 MODELAGEM NUMÉRICA

3.2.1 Geometria dos modelos.

Segundo manual do ABAQUS, a geometria de um modelo pode ser definida e organizada em partes, para posterior montagem. No software esta função é trazida como *Parts*.

Primeiramente, foi realizada a modelagem do elemento de concreto. Em primeiro instante, procurou-se modelá-lo com as mesmas dimensões do prisma de concreto do estudo experimental usado como referência, conforme foi apresentado no tópico 3.1. No entanto, para economizar tempo de processamento, o elemento de concreto foi modelado apenas na região que está compreendido o cone de arrancamento, que, segundo a ACI 318(2019) é cerca de uma vez e meia o comprimento de embutimento, conforme apresentado no tópico 2.2. Além disso, foi colocada uma parcela de 100 mm de cada lado para a região dos apoios, que levou em consideração dimensões do sistema de ensaio, apresentados no tópico 2.3.1. Assim, o elemento foi desenhado em 2D (X, Y) e extrudado, por meio da opção de modelagem por extrusão (*Extrusion*) de elementos 3D (X, Y, Z) deformáveis disponível no software. Como resultado, o elemento ficou com seção transversal de 250x430mm e comprimento de 530 mm (Z), que difere do prisma do experimento, que possui 1100 mm. A Figura 19 apresenta o resultado da modelagem do concreto.

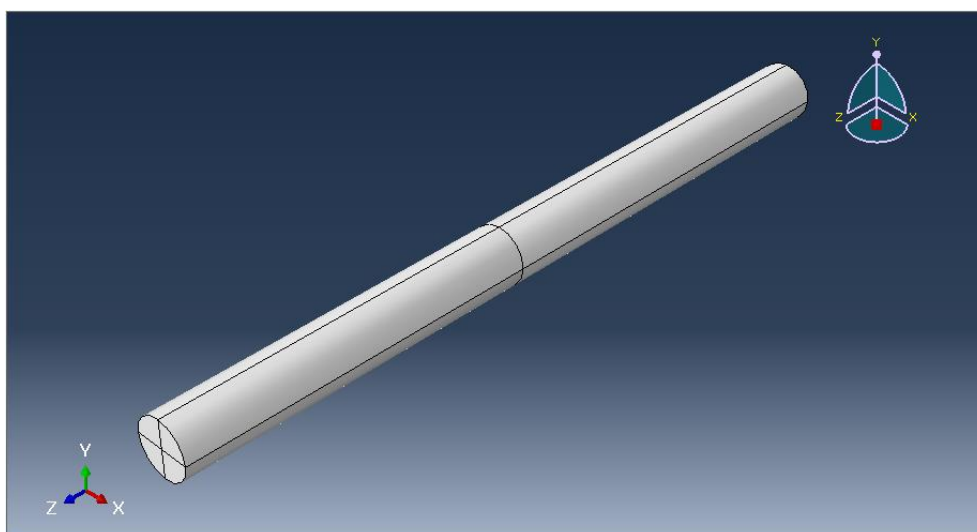
Figura 19 – Prisma de concreto.



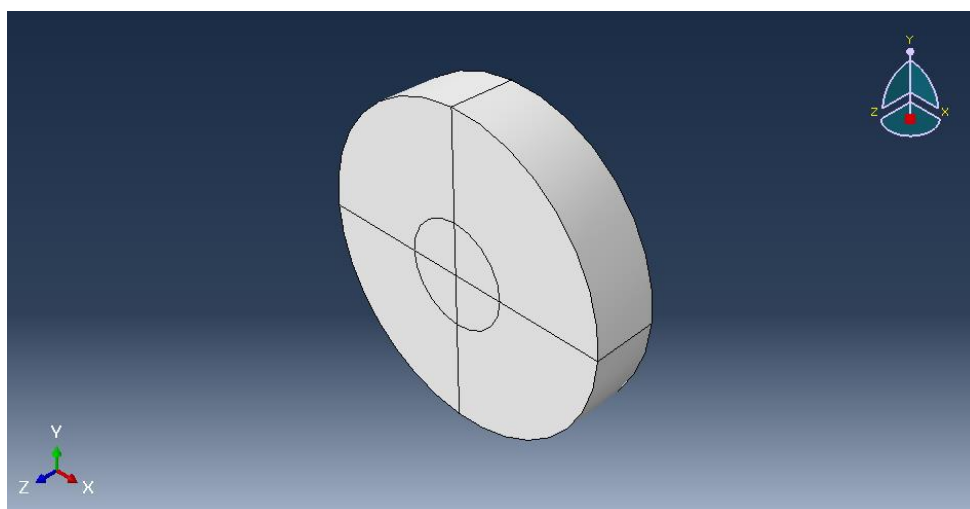
Fonte: Autor (2024)

Por conseguinte, foi realizada a modelagem dos demais elementos utilizados, que diferentemente do concreto seguiram as mesmas dimensões propostas no experimento, exceto as barras longitudinais, que tiveram seu comprimento limitado pelo tamanho do prisma de concreto, ficando com 530 mm. A metodologia utilizada nos modelos dos conectores e cabeça do conector foi a mesma usada no concreto, a extrusão de elementos deformáveis, já as barras longitudinais e estribos foram modelados como elementos planos bidimensionais, com posterior definição da área desses elementos. Mais detalhes da modelagem podem ser vistos nas Figura 20.

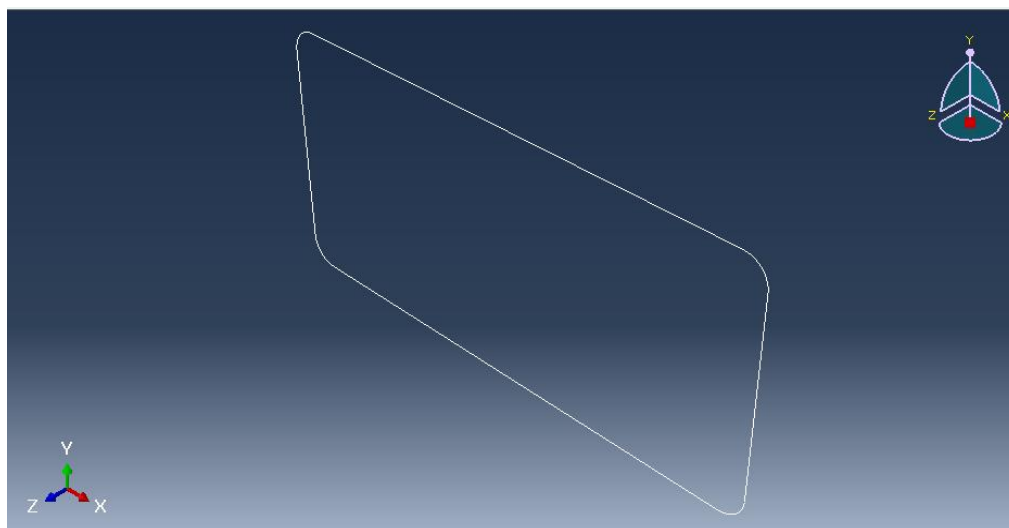
Figura 20 – Modelagem dos elementos de aço. (a) Conector. (b) Cabeça do conector; (c) Barra longitudinal; (d) Estribo.



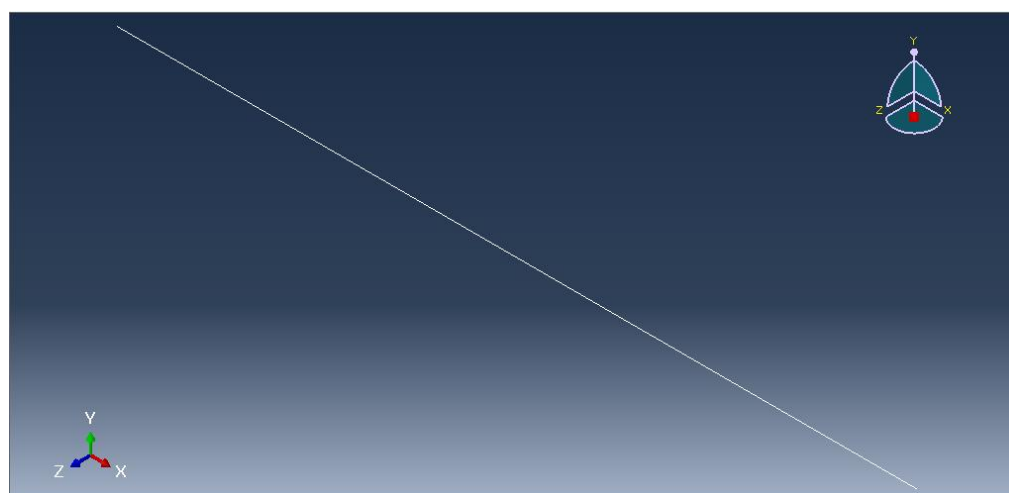
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor (2024)

3.2.2 Propriedades dos materiais.

As propriedades dos materiais são inseridas no software ABAQUS na aba *materials*. Para modelagem do concreto foi utilizado o modelo de dano plástico (CDP) disponível no software. As propriedades mecânicas utilizadas na modelagem do concreto foram extraídas experimentalmente por Lima (2024). Dito isso, assumiu-se o módulo de elasticidade igual a 39 GPa, os valores de resistência à compressão característica de 47,6 MPa e de resistência a tração igual a 3,75 MPa. Além desses parâmetros, foi inserido no software o coeficiente de Poisson (ν), que segundo a NBR 6118 (2023) é igual a 0,2.

De posse destes parâmetros foi possível calcular os valores das curvas de tensão deformação necessários para abastecer o software, por meio da utilização dos

modelos constitutivos de Guo (2014), conforme foi apresentado no 2.6.1. Deste modo, os parâmetros do CDP foram calculados e inseridos no software, conforme são apresentados na Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 3 – Parâmetros elásticos e plásticos do CDP.

Elasticidade		Plasticidade				
E(MPa)	ν	ψ	ϵ	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c	u
39000	0,2	36	0,1	1,16	0,6667	0,001

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4 – Parâmetros à compressão.

x	y	σ_{nom} (MPa)	ϵ_{nom}	σ_v (MPa)	ϵ_v	ϵ_{inel}	Dc
0,1046	0,1731	14,28	0,0004	14,2852	0,0004	0,0000	0,0000
0,5523	0,7664	36,47	0,0019	36,5494	0,0019	0,0010	0,0000
1,0000	1,0000	47,60	0,0035	47,7666	0,0035	0,0023	0,0000
2,0000	0,5000	23,80	0,0070	23,9666	0,0070	0,0064	0,4965
3,0000	0,2727	12,98	0,0105	13,1181	0,0104	0,0101	0,7244
4,0000	0,1818	8,65	0,0140	8,7757	0,0139	0,0137	0,8156
5,0000	0,1351	6,43	0,0175	6,5450	0,0173	0,0172	0,8625

Fonte: Autor (2024)

Tabela 5 – Parâmetros à tração.

x	y	σ_{nom} (MPa)	ϵ_{nom}	σ_v (MPa)	ϵ_v	ϵ_{inel}	Dt
1,0000	1,0000	3,75	0,0001	3,7504	0,0001	0,00000	0,0
2,0000	0,3333	1,25	0,0002	1,2502	0,0002	0,00016	0,6666
3,0000	0,1875	0,70	0,0003	0,7035	0,0003	0,00027	0,8124
4,0000	0,1338	0,50	0,0004	0,5020	0,0004	0,00037	0,8661
5,0000	0,1059	0,39	0,0005	0,3972	0,0005	0,00047	0,8941
6,0000	0,0886	0,33	0,0006	0,3325	0,0006	0,00057	0,9113
7,0000	0,0768	0,28	0,0007	0,2883	0,0007	0,00067	0,9231

Fonte: Autor (2024)

A modelagem do aço foi realizada com a utilização do modelo elastoplástico disponível software e as propriedades mecânicas dos aços CA 50 e SAE 1045 foram extraídas de catálogos de aço para construção civil brasileira.

Para as conectores, barras longitudinais e estribos foi utilizado o aço CA50. Para a cabeça do conector foi usado o SAE 1045. Na tabela 5, são apresentados os parâmetros dos aços utilizados na modelagem.

Tabela 6 – Parâmetros elásticos e plásticos do aço.

Aço	Elasticidade		Plasticidade				
	E (MPa)	ν	σ_{nom} (MPa)	ϵ_{nom}	σ_v (MPa)	ϵ_v	ϵ_{inel}
CA 50	200000	0,3	500,00	0,00250	501,25	0,00250	0,0000
			540,00	0,01000	545,40	0,00995	0,0072
SAE1045	200000	0,3	310,00	0,00155	310,48	0,00155	0,0000
			565,00	0,01000	570,65	0,00995	0,0071

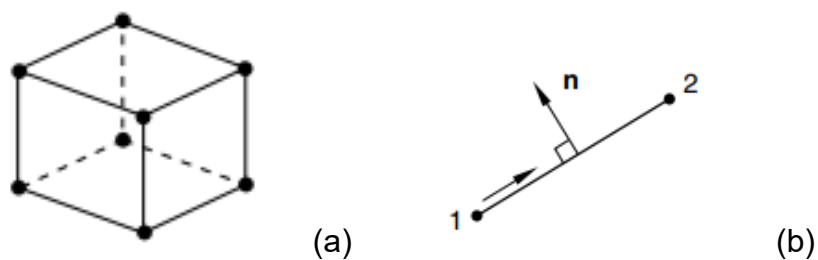
Fonte: Autor (2024)

3.2.3 Malha em elementos finitos

Após a modelagem dos elementos e a aplicação das propriedades mecânicas, foi realizada a definição da malha. No software utilizado, essa opção está localizada na aba *mesh*.

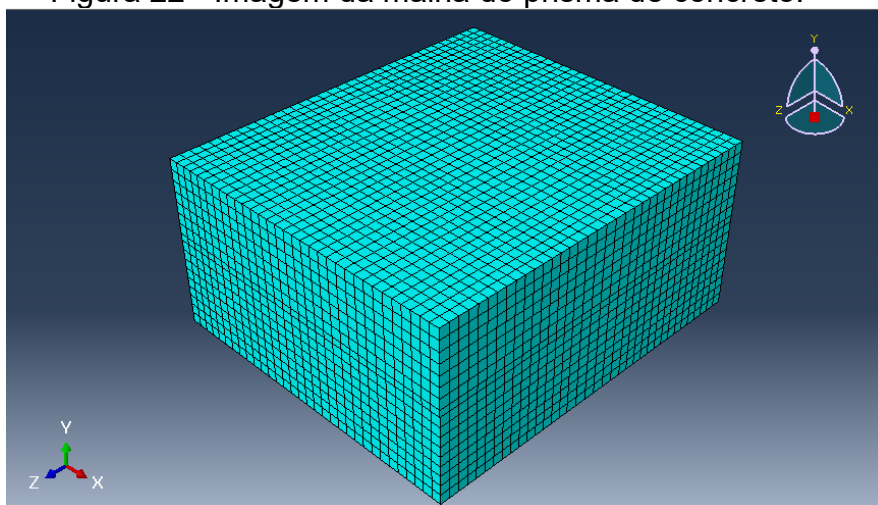
De acordo com o manual do usuário do ABAQUS (2017), o C3D8 é um elemento finito hexaédrico com 8 nós, sendo um em cada vértice, conforme Figura 21-a. Foram adotados os elementos desse tipo para o prisma de concreto, conector e cabeça do conector com a malha linear automática de 15 mm, onde os elementos foram particionados em pontos estratégico de modo a não ter irregularidades na malha, conforme resultado do processo é apresentado nas Figura 22, 23 e 24. Para as barras longitudinais e estribos foram adotados os elementos de treliça T3D2(Figura 21-b), que segundo o manual do ABAQUS (2017) são elementos do tipo linear de duas dimensões indicadas para modelar estruturas delgadas, que suportem carregamentos ao longo de um eixo ou linha central do elemento.

Figura 21 – Tipos de elementos finitos. (a) Elemento linear C3D8; (b) Elemento linear T3D2;



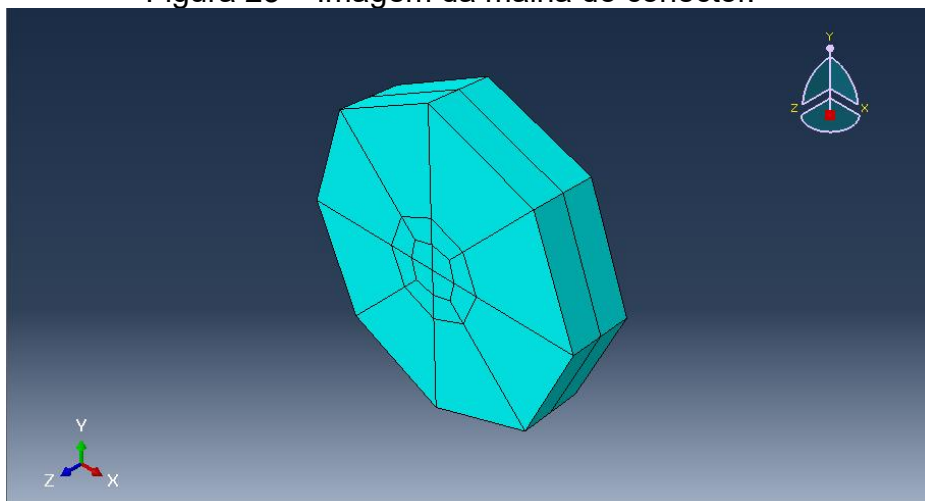
Fonte: ABAQUS (2017)

Figura 22 - Imagem da malha do prisma de concreto.



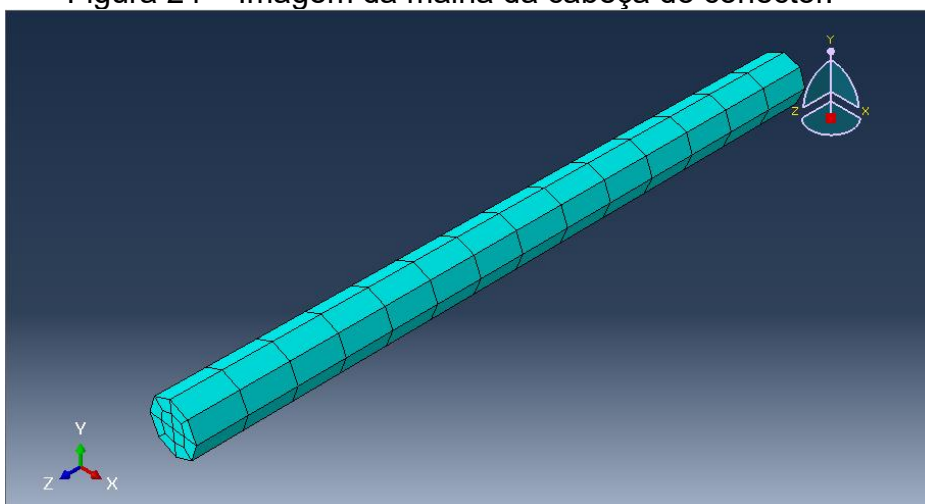
Fonte: Autor (2024)

Figura 23 – Imagem da malha do conector.



Fonte: Autor (2024)

Figura 24 – Imagem da malha da cabeça do conector.

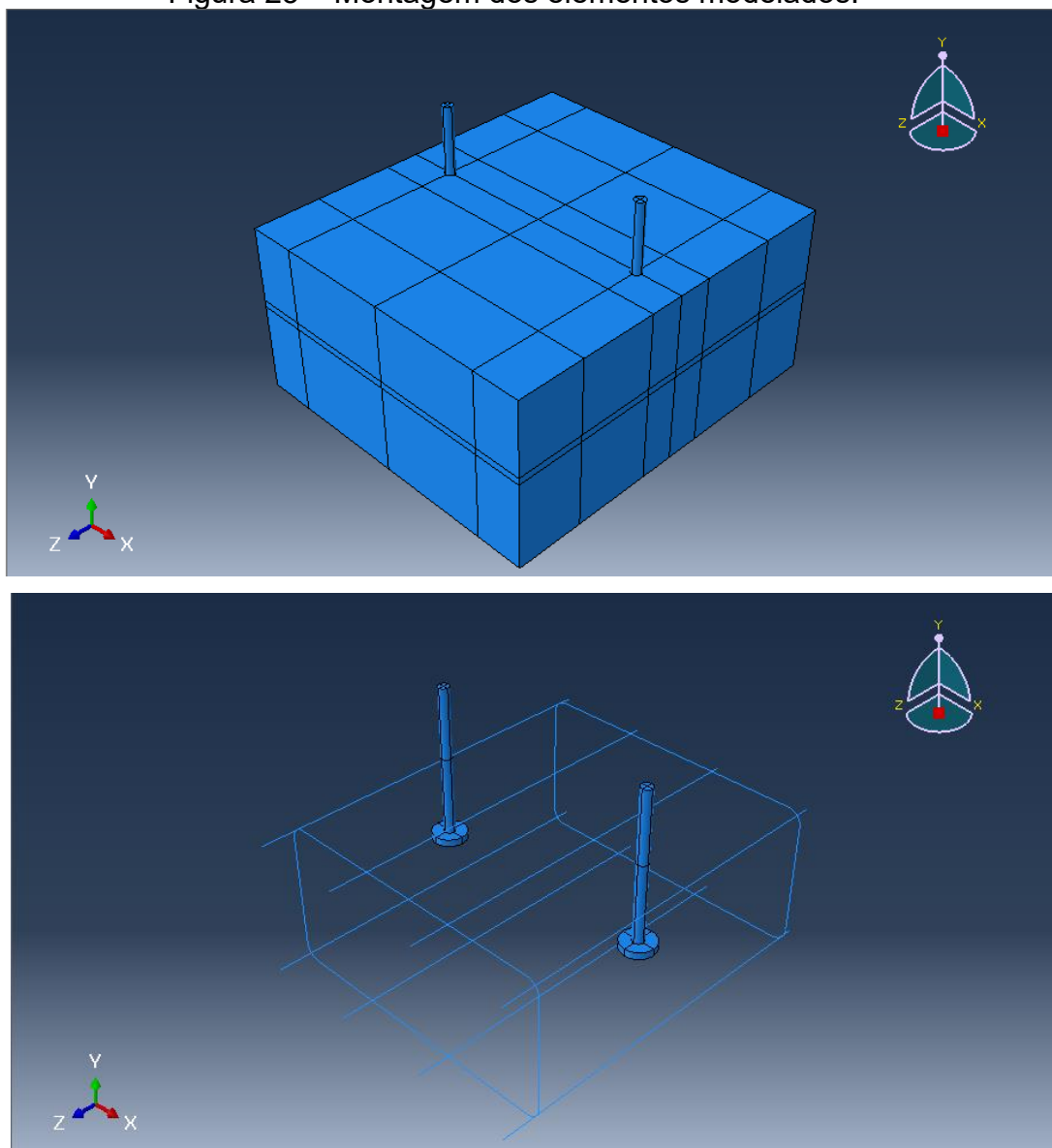


Fonte: Autor (2024)

3.2.4 Montagem

Após a definição da malha, a junção das partes modeladas até aqui foi realizada no software ABAQUS na janela *Assembly*. Os elementos foram unidos na interface conforme as características construtivas do espécime apresentado no tópico 3.1. A Figura 25 apresenta o resultado da junção dos elementos.

Figura 25 – Montagem dos elementos modelados.



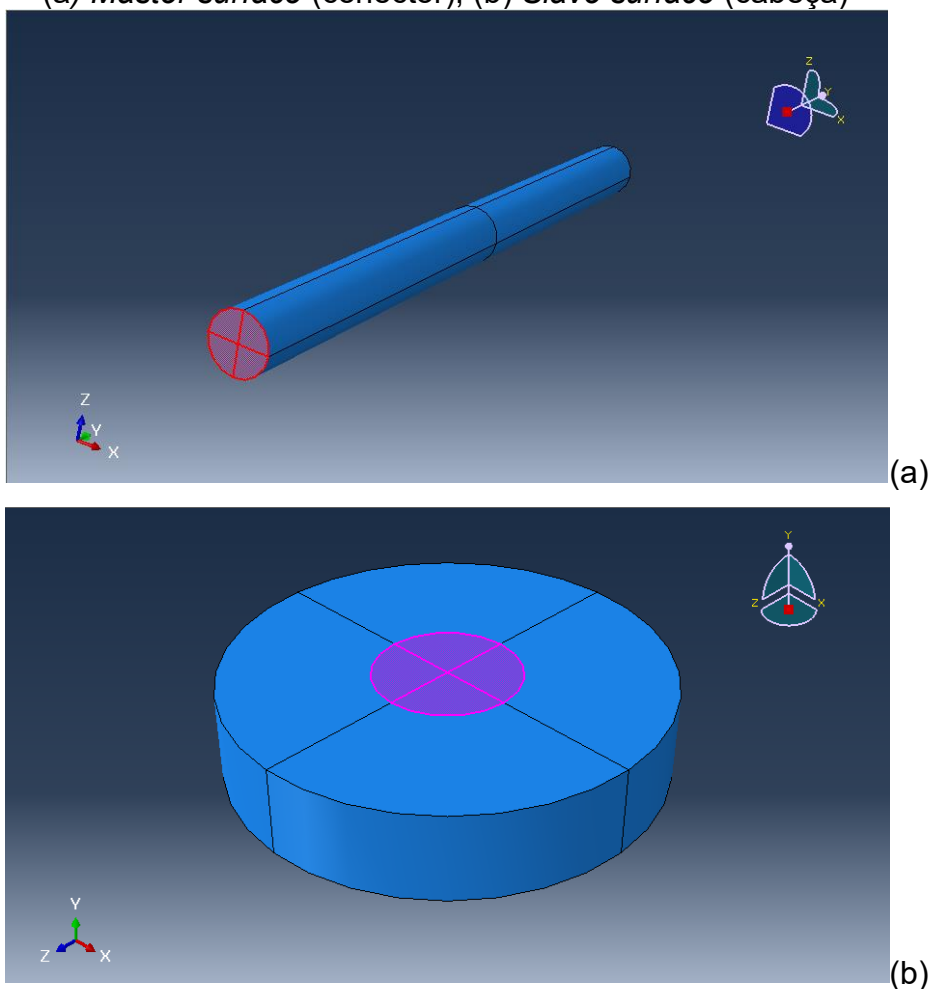
Fonte: Autor (2024)

3.2.5 Contatos

Neste tópico serão apresentados os contatos utilizados no modelo, restrições aplicadas nos elementos, as interações entre as superfícies, bem como o acoplamento utilizado para aplicação de cargas.

Com intuito de simular a solda realizada entre a cabeça e o conector, utilizou-se a técnica *tie*, que no software encontra-se em *Interaction > Constraint > Tie*. Essa técnica consiste em um tipo de restrição que permite que as superfícies de diferentes elementos compartilhem o mesmo campo de deslocamento. Esse tipo de contato é feito entre as superfícies, que são *master* (conector) e *slave* (cabeça do conector), conforme é apresentado na Figura 26.

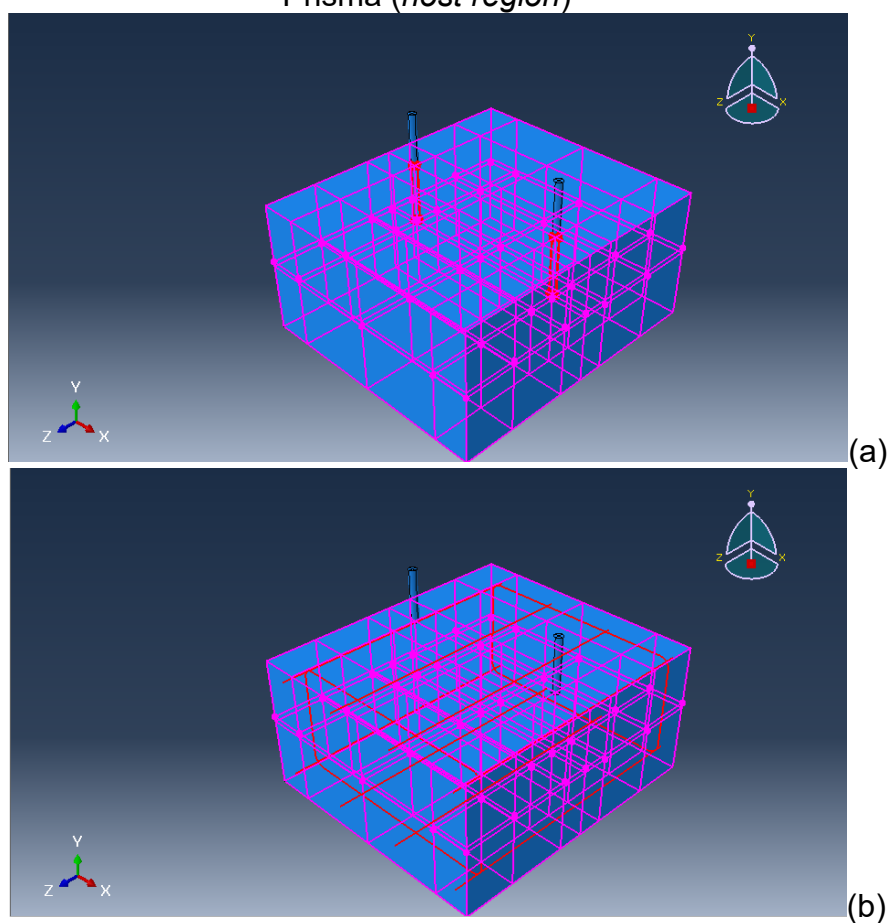
Figura 26 – Contato tipo *tie* entre as superfícies do conector e cabeça.
(a) *Master surface* (conector); (b) *Slave surface* (cabeça)



Fonte: Autor (2024)

Para representar o comportamento entre os conectores e o prisma de concreto, assim como entre as armaduras e o prisma de concreto, foi utilizada a função *embedded*, que no ABAQUS está localizada em *Interaction > Constraint > Embedded*. Segundo o Abaqus, essa técnica consiste em especificar um elemento ou um grupo de elementos como incorporados em um elemento hospedeiro (*host*). Assim, se um nó de um elemento incorporado estiver dentro de um elemento hospedeiro, os graus de liberdade translacionais e o grau de liberdade de pressão de poros no nó são eliminados, transformando-o em um "nó embutido". Portanto, é necessário definir o elemento a ser embutido (*embedded region*) e qual será o elemento hospedeiro (*host region*). No caso da modelagem abordada nessa, foi realizada a incorporação dos conectores e armaduras no prisma de concreto, como é apresentado na Figura 27.

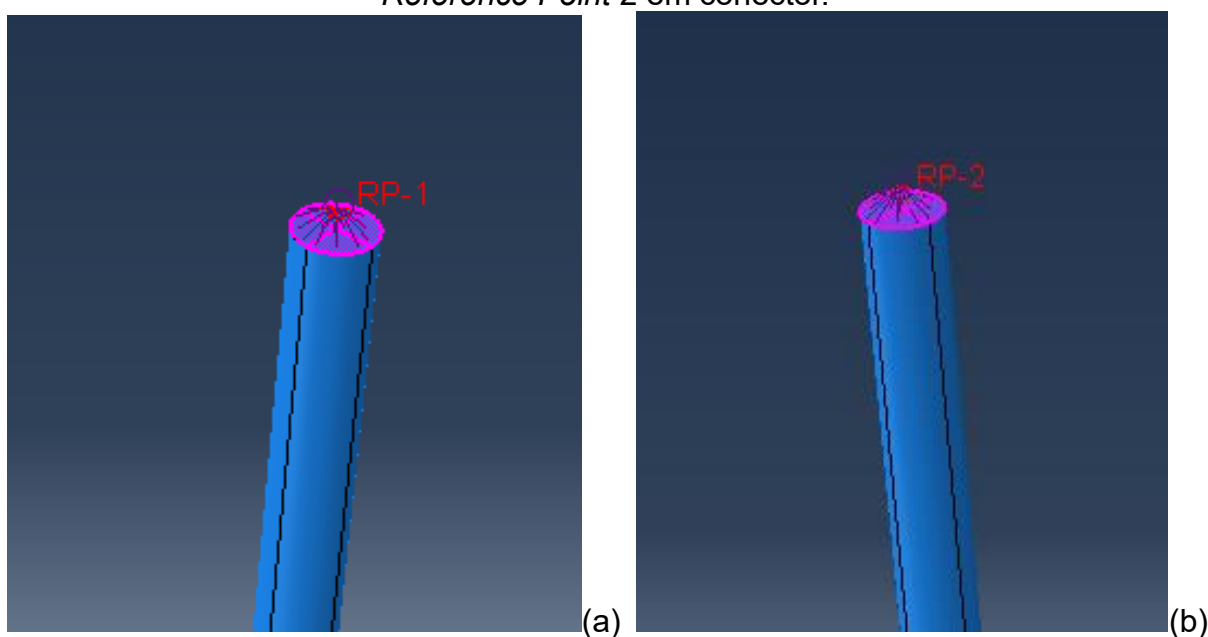
Figura 27 – *Constrain Embedded Region*. (a) Conectores (*embedded region*) e Prisma (*host region*); (b) Armadura (*embedded region*) e Prisma (*host region*)



Fonte: Autor (2024)

Para aplicação das cargas foram criados dois pontos de referência (*reference point*), onde foram incorporados ao sistema através da função acoplamento cinemático (*coupling*), que no software é localizado em *Interaction > Constraint > Coupling*. Essa interligação ocorreu através da aplicação desta função nas faces dos conectores, conforme Figura 28. Onde o nó de referência tem graus de liberdade translacionais e rotacionais e as restrições cinemáticas são transferidas para a superfície acoplada.

Figura 28 – Pontos acoplados. (a) *Reference Point 1* em conector (b) *Reference Point 2* em conector.

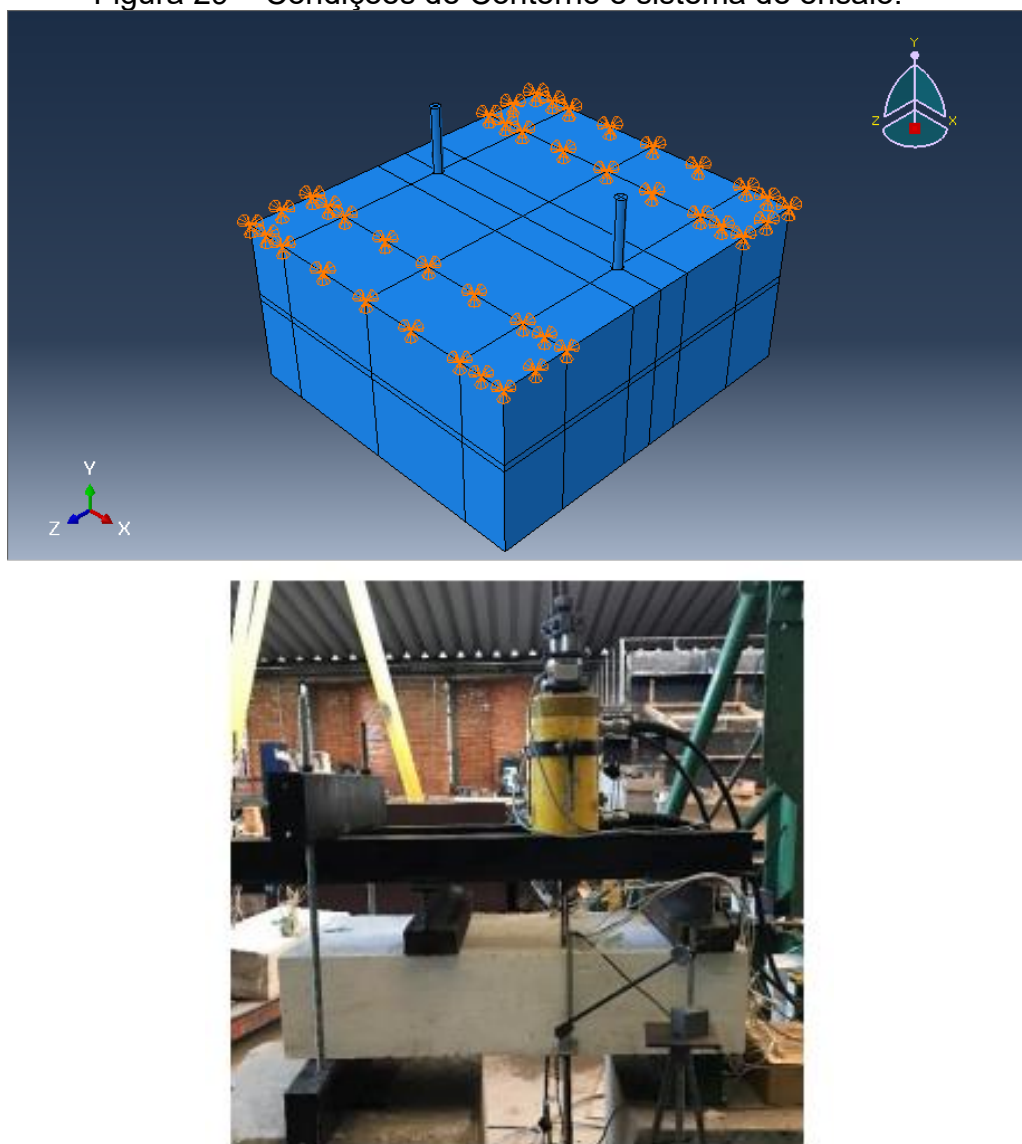


Fonte: Autor (2024)

3.2.6 Condições de contorno

As condições de contorno foram aplicadas ao modelo de forma a reproduzir o sistema de ensaio utilizado por Lima (2024). Os apoios foram inseridos nas bordas do prisma de concreto, cobrindo uma região de 100 mm a contar das extremidades do prisma, deixando a região compreendida como o cone de ruptura livre para análise. Assim, restringindo o movimento de translação nos eixos X, Y e Z. Na Figura 29 observa-se as condições de contorno aplicados no modelo de acordo com o sistema de ensaio.

Figura 29 – Condições de Contorno e sistema de ensaio.



Fonte: Lima (2024)

3.2.7 Passos de carga

No ABAQUS, pode-se definir a sequência de uma ou mais etapas de análise, o que permite capturar de maneira eficiente as mudanças nas condições de carga e contorno ao longo da simulação. A sequência de etapas é essencial para refletir as variações na interação entre as diferentes partes do modelo, assim como para incluir ou remover componentes conforme necessário durante a análise.

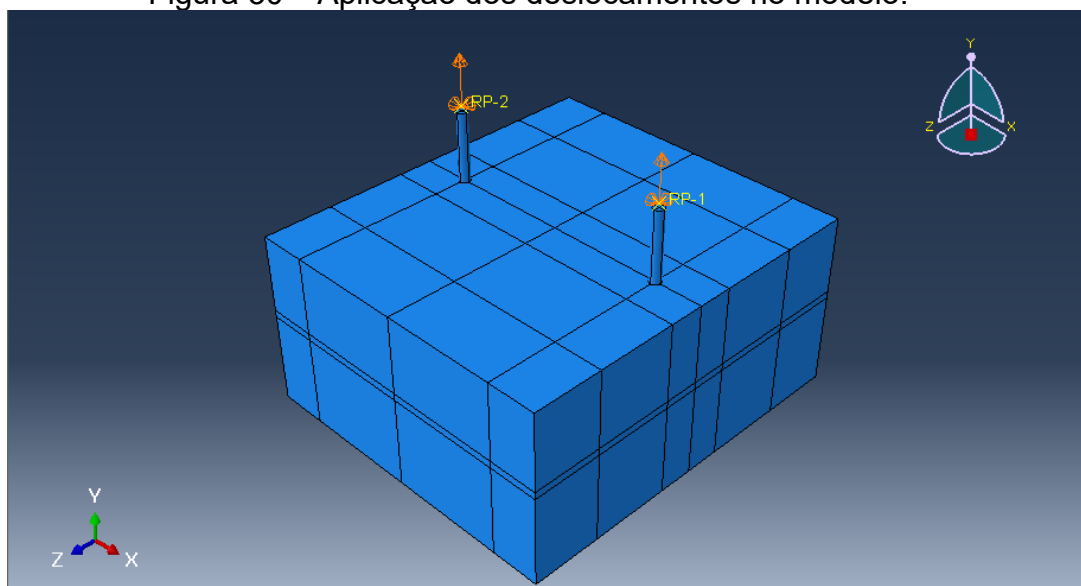
Além disso, essas etapas possibilitam a modificação do procedimento de análise, a configuração da saída de dados e o ajuste de diversos controles conforme a necessidade da simulação. A metodologia também incorpora a utilização de etapas para realizar análises de perturbação linear sobre estados não lineares de base.

Isto posto, o software traz a janela *steps*. Diante disso, no step, foi inserido o procedimento de análise não-linear, com período de tempo igual a 1. O incremento inicial foi adotado igual a 0,001 do período, com mínimo de 0,00001 e máximo 0,1.

3.2.8 Carregamento

O carregamento imposto no modelo foi do tipo deslocamento prescrito, aplicado nos dois nós acoplados a superfície dos conectores, promovendo assim um deslocamento de corpo rígido nestes elementos. O deslocamento prescrito de 2 mm no eixo Y e zero nos eixos X e Z. Percebe-se esse valor é aparentemente exagerado, propositalmente, com o intuito de analisar o comportamento pós ruptura do modelo. Na Figura 30 observa-se os deslocamentos impostos nos nós.

Figura 30 – Aplicação dos deslocamentos no modelo.



Fonte: Lima (2024)

3.2.9 Dados de Saída

No ABAQUS, trazido como Fields Output, refere-se aos dados que são gerados durante a simulação e armazenados para posterior análise. Neste trabalho, foram solicitados os seguintes dados nessa função:

- Deformação Total (E);
- Deslocamento (U);
- Força de reação (RF) e

- Dano à tração (DAMAGET).

Além disso, o software traz a função *History Output*, e através dessa função foram retirados dados específicos de força de reação no eixo Y (RF), deslocamento (U2) para os conectores nos pontos de instalação do LVDT's (Figura 16-a) e deformações (E22) nos pontos de colocação dos extensômetros (Figura 16-b).

3.2.10 Trabalho

No ABAQUS o processamento do modelo é obtido através da criação do *JOB*. O *JOB* foi configurado e o modelo foi resolvido pelo solver ABAQUS, que processou as informações e gerou os dados de saída.

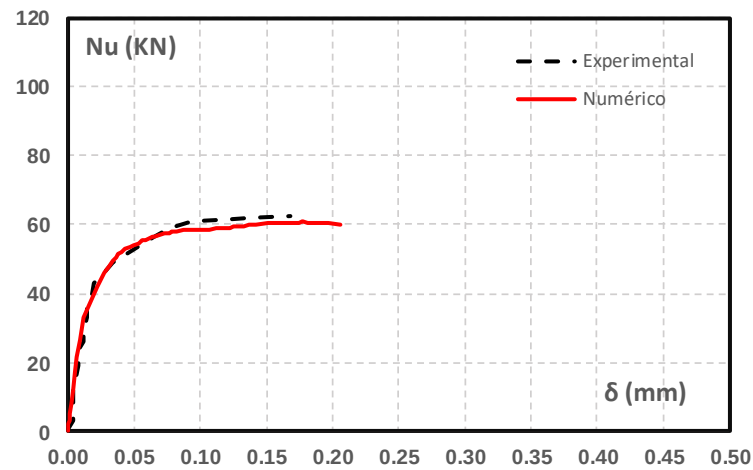
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos do processamento do modelo numérico proposto. Esses resultados são discutidos de acordo com as curvas carga-deslocamento, deformações e padrões de dano, tomando como base os resultados obtidos por Lima (2024)

4.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

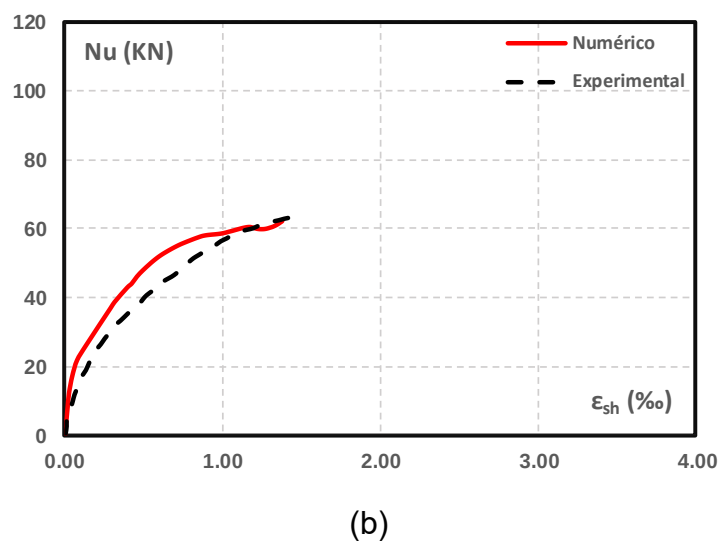
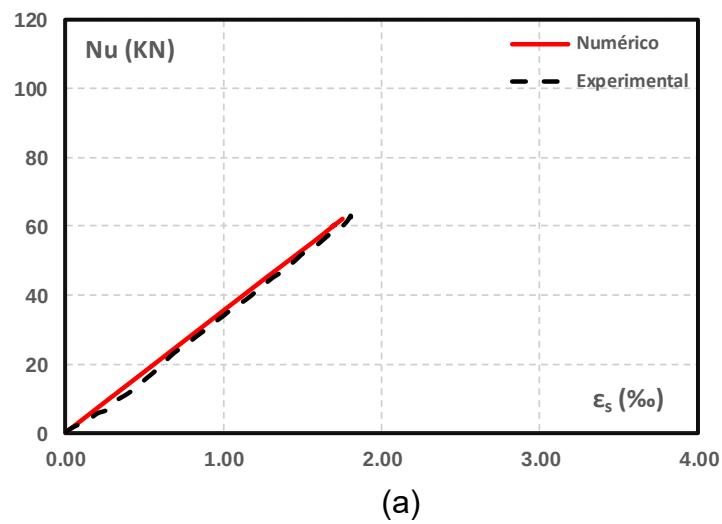
Para o modelo numérico proposto, três repostas experimentais foram analisadas e usadas para validação, sendo elas: curva carga-deslocamento, deformação dos conectores em dois pontos distintos, sendo um dentro do prisma de concreto (ϵ_{sh}) e outro fora do concreto (ϵ_s), conforme instrumentação está esquematizada no tópico 3.1. As Figuras 31 e 32 apresentam os resultados obtidos em comparativo com os experimentos de Lima (2024).

Figura 31 – Curva Carga-deslizamento.



Fonte: Autor (2024)

Figura 32 – Deformações do Modelo. (a) Conector: fora do concreto; (b) Conector: dentro do conector



Fonte: Autor (2024)

A Figura 31, apresenta as curvas de carga-deslocamento dos conectores, percebe-se que a curva que representa o modelo numérico tem comportamento similar a curva do experimento. No entanto, o pico de carga na análise numérica ocorre aos 60 KN, já no experimento é alcançado apenas nos 62,5 KN, ambos com deslocamento de aproximadamente 0,16 mm. Diante disso, percebe-se pequena divergência, evidenciando boa correspondência entre os resultados analisados.

A Figura 32-a, apresenta as curva carga-deformação do conector fora do concreto. É perceptível que a curva do modelo numérico apresentou boa concordância quando comparado com a curva experimental. Na Figura 32-b, a curva numérica tem comportamento similar a curva experimental em termos gerais. No entanto, há divergências, em particular, existe uma diferença inicial na inclinação, onde o modelo numérico prevê um aumento menor nas deformações em relação ao aumento da força, quando comparado com a comportamento experimental, indicando que o modelo numérico apresentou maior rigidez nas fases iniciais dos passos de carga. Entretanto, para cargas próximas a carga de ruptura do espécime (62,5 KN), as duas curvas tendem a convergir.

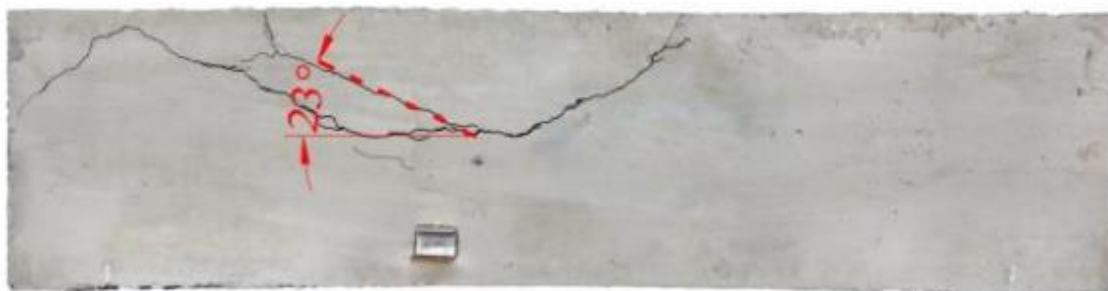
Comparando os gráficos das Figuras 32a e 32b, percebe-se que há efetiva contribuição dos mecanismos de transferência por aderência entre o aço e o concreto. Enquanto o comportamento fora do concreto apresenta uma resposta linear ao longo de toda aplicação da carga, dentro do concreto a relação força-deformação torna-se ligeiramente não linear devido a contribuição do concreto em resistir a parte dos esforços transmitidos pelo aço. Indicado a presença dos mecanismos de transferências abordados no tópico 2.1, que na modelagem numérica foram simulados através da função *embedded*. Portanto, percebe-se que esta função presente no software possui capacidade de simular a interação entre esses dois materiais.

4.2 MODOS DE RUPTURA

Segundo Lima (2024), a espécime H-110-0,65-3 falham pela ruptura do cone de concreto. Ele concluiu em seu trabalho que a inclinação de ruptura do tronco de cone de concreto para essa espécimes tenderam a valores inferiores a 35°, conforme pode ser visto na Figura 33.

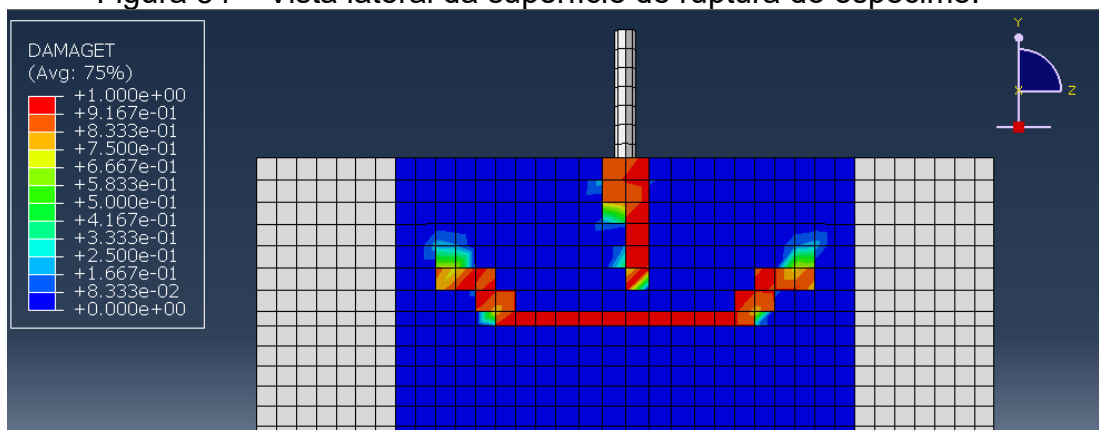
A modelagem computacional realizada neste trabalho apresenta as regiões danificadas por tração. A variável analisada é o dano no concreto à tração (*DAMAGET*), que varia de 0 (azul) a 1 (vermelho), ou seja, indicando áreas com pouco ou nenhum dano e áreas com dano máximo, respectivamente. Na Figura 34, pode ser observada similaridade entre a zona danificada prevista pelo modelo numérico com as fissuras que surgiram na superfície lateral da ruptura do espécime, Figura 33. No entanto, é importante destacar que o modelo numérico apresentou o ângulo de formação de fissuras de aproximadamente 45° , divergindo do experimental. Além disso, ele apresentou danos paralelos ao eixo Y próximos a região superior do prisma, indicando danos por tração devido ao efeito de borda.

Figura 33 – Vista lateral da superfície de ruptura do espécime.



Fonte: Lima (2024)

Figura 34 – Vista lateral da superfície de ruptura do espécime.

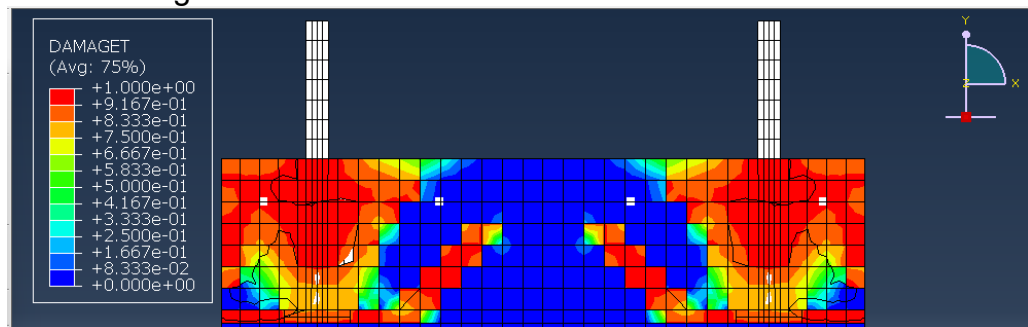


Fonte: Autor (2024)

Percebe-se que o dano do concreto se propaga do conector em direção aos apoios, formado assim o cone de ruptura, conforme pode ser visto no corte transversal do modelo na Figura 35. Padrão de fissuração, que foi apresentado por Ozbolt et al. (2007), conforme apresentado no tópico 2.4.2 (Figura 8). Na Figura 36, este padrão e região danificadas do concreto também são apresentadas por Silva (2018).

No entanto, a formação do cone de ruptura do modelo numérico não parte da cabeça do conector como é esperado, de acordo Eligehausen et al (2006), apresentado no tópico 2.2. O que poderia ser alcançado pelo refinamento da malha dos elementos. Além disso, com o modelo, na Figura 37 é possível observar região de abrangência do cone na face superior do prisma de ambos os conectores instalados no prisma. Outro aspecto a ser observado, é a descontinuidade gerada pelo efeito de borda no cone de ruptura.

Figura 35 – Corte transversal do modelo numérico.



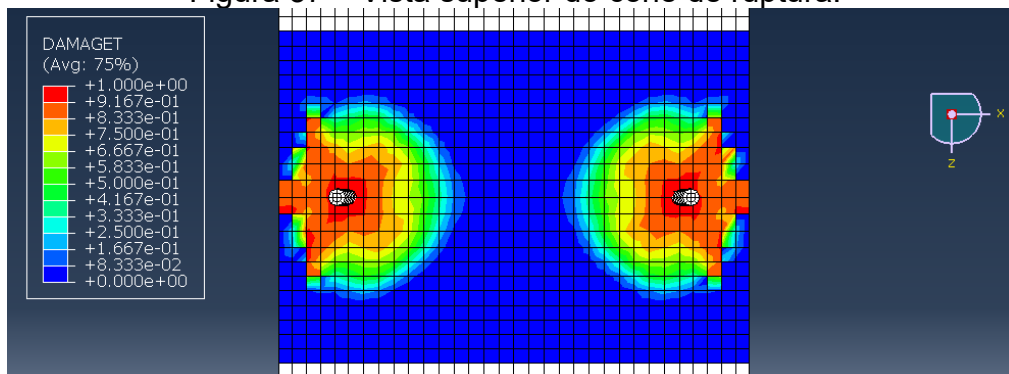
Fonte: Autor (2024)

Figura 36 – Corte transversal da superfície de ruptura do espécime H110 por Silva (2018).



Fonte: Silva (2018)

Figura 37 – Vista superior do cone de ruptura.



Fonte: Autor (2024)

5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo computacional tridimensional não linear via método dos elementos finitos com base nos ensaios experimentais, do tipo *pull-out* de ancoragem, do tipo conector cabeça, realizados por Lima (2024). O objetivo da análise computacional foi avaliar a capacidade do modelo numérico em reproduzir ensaios experimentais que possam contribuir para o comportamento mecânico dos fenômenos que envolve a interação entre estes dispositivos. Assim, foi escolhido o modelo constitutivo de dano plástico CDP para representação do espécime.

O modelo CDP, foi capaz de simular o comportamento carga-deslizamento dos conectores com boa precisão, assim como para as repostas carga-deformação longitudinal nos pontos distintos do espécime de Lima (2024). Assim como os outros modelos constitutivos, devem ser calculadas as curvas tensão-deformação de tração e compressão, com o objetivo de descrever o comportamento do concreto. Foram adotadas as curvas de compressão e tração do concreto apresentadas por Guo (2014), quem foram eficientes e práticas para desenvolvimento do estudo e alimentação do modelo constitutivo presente no ABAQUS.

É importante destacar que a alimentação correta dos parâmetros das curvas de compressão e tração é fundamental para descrever o comportamento do material e para correta calibração do modelo, tendo em vista, que no cálculo proposto por Guo (2014), as equações teóricas recebem como dados de entrada as propriedades mecânicas do concreto, que são elas: resistência característica à tração, resistência característica à compressão e módulo de elasticidades. Logo, a utilização dos dados experimentais presentes no estudo por Lima (2024), utilizados na modelagem, permitem maior confiabilidade nos resultados numéricos.

A consideração *embedded region* entre os conectores e o prisma permitiu simular a aderência entre aço e concreto, tendo em vista as deformações alcançadas pelo conector dentro e fora do concreto. Além disso, foi possível identificar os padrões de ruptura e regiões danificadas, visualizadas através das variáveis de dano d_t (*DAMAGE_T*).

Diante dos aspectos observados, percebe-se que o modelo computacional apresentou boa concordância com os resultados experimentais do estudo de Lima (2024), no que diz respeito as variáveis analisadas.

A fim de compreender mais sobre o comportamento de ancoragens no concreto podem ser realizados os seguintes trabalhos:

- Realizar a modelagem computacional para analisar os demais espécimes do estudo experimental realizado por Lima (2024) e estabelecer um comparativo com a equação da capacidade resistente proposta por ele;
- Realizar a modelagem numérica de diferentes tipos de ancoragens, como por exemplo, ancoragens por dobra com 90° , ganchos de 180° e ganchos de 45° . Com intuito de analisar e comparar os padrões de fissuração e formação dos cones de ruptura;
- Realizar a modelagem numérica de barras ancoradas com distâncias inferiores a $1,5.h_{ef}$ entre si, a fim de observar a diminuição da capacidade de resistência causada pela proximidade das barras.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 6118:2023 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.
- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). **ACI 318: Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-19)**. Farmington Hills, MI, USA, 2019.
- ABAQUS. **User's Manual, Version 2017**. Dessault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2017.
- BRANTSCHEN, F. **Influence of bond and anchorage conditions of the shear reinforcement on the punching strength of RC slabs**. 2016. 227 p. PhD Thesis, Doctoral Program in Civil and Environmental Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado**. 2008.
- ELIGEASEN, R.; COOK, R. A. **Behavior and design of adhesive bonded anchors**. ACI Structural Journal, v. 103, n. 6, p. 822, 2006.
- FUSCO, P. B. **Técnicas de armar estruturas de concreto armado**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994.
- GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. **Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS**. Engineering Structures, v. 98, p. 38-48, 2015.
- GUO, Z. **Principles of reinforced concrete**. Butterworth-Heinemann, 2014.
- KMIECIK, P.; KAMIŃSKI, M. **Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration**. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 11, n. 3, p. 623-636, 2011.
- LEE, J.; FENVES, G. L. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures**. Journal of Engineering Mechanics, v. 124, n. 8, p. 892-900, 1998.
- LIMA, N. W. B. **Influência da armadura longitudinal na resposta experimental de barras com cabeça sujeitas ao efeito de borda, efeito de grupo e com armadura suplementar**. 2024. 157 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; ONATE, E. **A plastic-damage model for concrete**. International Journal of Solids and Structures, v. 25, n. 3, p. 299-326, 1989.
- MEDEIROS, W. A. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante**. 2018. 163 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. São Paulo, 2013.

OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R.; PERISKIC, G.; MAYER, U. **3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths**. Engineering Fracture Mechanics, v. 74, p. 168-178, 2007.

SANTANA, P. F. M. **Análise numérica de ancoragens tipo conector com cabeça embutidos em membros de concreto armado sob tração**. 2020. 91 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SILVA, P. C. **Resistência à tração de diferentes tipos de ancoragens embutidas em elementos de concreto armado**. 2018. 128 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SANTOS, L. M. **Análise numérica da interação mecânica de conector tipo pino com cabeça em vigas mistas**. 2019. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, DF.