



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

FRANCISCA GIZELE BEZERRA

**MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO
CONCRETO**

CARAÚBAS/RN

2024

FRANCISCA GIZELE BEZERRA

**MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO
CONCRETO**

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

Orientador: Gilvan Bezerra dos Santos Júnior,
Prof. Dr.

CARAÚBAS/RN

2024

© 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.

B574m Bezerra, Francisca Gizele.
Modelo numérico para análise do comportamento
mecânico do concreto / Francisca Gizele Bezerra. -
2024.
65 f. : il.

Orientador: Gilvan Bezerra dos Santos Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Concreto. 2. MEF. 3. Abaqus. 4. Concrete
Damaged Plasticity. I. Santos Júnior, Gilvan
Bezerra dos, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

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.

FRANCISCA GIZELE BEZERRA

MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO

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

Defendida em: 18 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 GILVAN BEZERRA DOS SANTOS JÚNIOR
Data: 19/04/2024 17:57:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos Santos Júnior (UFERSA)
Presidente

	2024.04.20
Paulo Henrique	16:15:59
Araújo Bezerra	-03'00'

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 WALLISON ANGELIM MEDEIROS
Data: 19/04/2024 17:59:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wallison Angelim Medeiros (IFPI)
Membro Examinador

Dedico aos meus pais, Francisco e Gianote,
pelo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, a Deus, por ser meu guia incondicional, por estar sempre comigo, me ajudando em cada caminhada.

Agradeço aos meus pais, Francisco Bezerra e Gianote Gonçalves dos Santos Bezerra, minha irmã Gislaine dos Santos Bezerra e ao meu namorado Dulciel Marcos Abel da Silva, pelo carinho, amor e apoio ao longo da minha vida. A meus amigos pelo apoio, amizade e companheirismo.

Agradeço a meu professor e orientador Gilvan Bezerra dos Santos Júnior pela orientação, pela dedicação e por todo o suporte no decorrer deste trabalho.

Agradeço ao professor Wallison Angelim Medeiros, pela contribuição neste trabalho, me atendendo e sanando dúvidas valiosas sobre a ferramenta ABAQUS.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da minha vida acadêmica que repassaram conhecimentos e compartilharam ensinamentos, contribuindo na minha trajetória.

Agradeço também a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

“Todo aquele, pois, que escuta estas minhas palavras e as pratica, assemelhá-lo-ei ao homem prudente, que edificou a sua casa sobre a rocha; e desceu a chuva, e correram os rios, e assopraram ventos e combateram aquela casa, e não caiu, porque estava edificada sobre a rocha”.

(Mateus 7: 24 - 25)

RESUMO

As estruturas de concreto desempenham um papel significativo na área da construção civil, isso se dá devido à sua durabilidade, resistência e versatilidade. No entanto, estão sujeitas a mecanismos de envelhecimento e deterioração, causadas não somente devido a falhas humanas, mas também pela influência da agressividade ambiental e ações externas não previstas. Dessa forma, se torna essencial realizar avaliações minuciosas para que se consiga entender o desempenho dessas estruturas, e viabilizar as manutenções, ajudando a prolongar a vida útil, e consequentemente reduzir os custos associados a intervenções corretivas. Nas últimas décadas com o intuito de contribuir na avaliação das estruturas vem sendo utilizado o Método dos elementos finitos, passando a complementar os ensaios experimentais, auxiliando na avaliação de problemas mais complexos. Nesse sentido, esse trabalho tem como principal objetivo aplicar o Método dos Elementos finitos para avaliação de estruturas de concreto. Para essa avaliação foi utilizado o modelo numérico Concrete Damaged Plasticity Model (CDP), presente no software ABAQUS. O CDP é baseado na Mecânica do Dano e na Teoria da Plasticidade. O modelo consegue reproduzir vários tipos de simulações, com diferentes condições de carregamento e níveis de deterioração, devido considerar o comportamento não linear do concreto atrelado a propagação do dano no material. Para a análise, foram realizadas modelagens numéricas de ensaio à compressão axial e à tração na flexão de 4 pontos, usando como base dados de ensaios experimentais realizados por Costa (2023), com o intuito de similar e calibrar o modelo para reproduzir e auxiliar nas avaliações dessas estruturas além de identificar a influência dos parâmetros do CDP. Os dados fornecidos se resumiram a dados de força e deslocamento, dessa forma foi utilizado o método de Guo (2014) que transforma tensões e deformações em coordenadas cartesianas moldadas por parâmetros do modelo, que vão facilitar na convergência dos modelos numéricos. Em ambos, os dados foram analisados e comparados levando em consideração a curva força-deslocamento, nos modelos numéricos se percebeu a influência significativa dos parâmetros de viscosidade e módulo de elasticidade. No modelo de compressão axial, foi obtido um modelo representativo apresentando erro de 3,4%, com divergência na fase plástica sem apresentar amolecimento como esperado. Já no modelo de tração à flexão de 4 pontos o modelo numérico conseguiu reproduzir a curva de força-deslocamento dos ensaios experimentais, apresentando um erro de 16,5%, considerado aceitável, mostrando que o modelo numérico foi calibrado adequadamente.

Palavras-chave: Concreto. MEF. Abaqus. Concrete Damaged Plasticity.

ABSTRACT

Concrete structures play a significant role in the area of civil construction, this is due to their durability, resistance and versatility. However, they are subject to aging and deterioration mechanisms, caused not only by human failures, but also by the influence of environmental aggression and unforeseen external actions. Therefore, it is essential to carry out thorough assessments to understand the performance of these structures, and enable maintenance, helping to extend their useful life, and consequently reduce the costs associated with corrective interventions. In recent decades, with the aim of contributing to the evaluation of structures, the Finite Element Method has been used, starting to complement experimental tests, helping to evaluate more complex problems. In this sense, the main objective of this work is to apply the Finite Element Method to evaluate concrete structures. For this evaluation, the Concrete Damaged Plasticity Model (CDP) numerical model was used, present in the ABAQUS software. CDP is based on Damage Mechanics and Plasticity Theory. The model can reproduce several types of simulations, with different loading conditions and deterioration levels, due to considering the non-linear behavior of concrete linked to the propagation of damage in the material. For the analysis, numerical modeling of tests for axial compression and tension in 4-point bending were carried out, using as a basis data from experimental tests carried out by Costa (2023), with the intention of similar and calibrating the model to reproduce and assist in evaluations of these structures in addition to identifying the influence of CDP parameters. The data provided was limited to force and displacement data, thus Guo's method (2014) was used, which transforms stresses and deformations into Cartesian coordinates shaped by model parameters, which will facilitate the convergence of numerical models. In both cases, the data were analyzed and compared taking into account the force-displacement curve; in the numerical models, the significant influence of the viscosity and elastic modulus parameters was noticed. In the axial compression model, a representative model was obtained with an error of 3.4%, with divergence in the plastic phase without showing softening as expected. In the 4-point flexural traction model, the numerical model was able to reproduce the force-displacement curve of the experimental tests, presenting an error of 16.5%, considered acceptable, showing that the numerical model was properly calibrated.

Keywords: Concrete.MEF. Abaqus. Concrete Damaged Plasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento sob tensão uniaxial.....	23
Figura 2 - Diagramas tensão-deformação típicos de materiais.....	24
Figura 3 - Malha triangular de elementos finitos.	25
Figura 4 - Tipos de elementos finitos.	26
Figura 5 - Grau de liberdade.....	26
Figura 6 - Passos para solução em Elementos Finitos.....	27
Figura 7 - Fases do Método dos Elementos Finitos.	28
Figura 8 - Interface inicial do ABAQUS.....	30
Figura 9 - Fluxograma da criação de simulação no software ABAQUS.	31
Figura 10 - Representação do modelo matemático no concreto.....	33
Figura 11 - Curva teórica tensão deformação na compressão.	36
Figura 12 - Curva teórica tensão-deformação na tração.....	37
Figura 13 - Etapas do trabalho.....	39
Figura 14 - Dimensões das geometrias.....	40
Figura 15 - Montagem do ensaio a compressão axial	42
Figura 16 - Montagem do ensaio a tração na flexão.....	43
Figura 17 - Geometria compressão axial.....	44
Figura 18 - Geometria tração na flexão.....	44
Figura 19 - Condição de contorno no ensaio à compressão axial.	46
Figura 20 - Condição de contorno inferiores no ensaio à tração na flexão.	47
Figura 21 - Carregamento aplicado no ensaio à compressão axial.....	48
Figura 22 - Carregamento aplicado no ensaio à tração na flexão.....	48
Figura 23 - Malha para o ensaio à compressão axial.....	49
Figura 24 - Malha para o ensaio à tração na flexão.....	49
Figura 25 - Modo de falha por compressão: (a) trinca de cisalhamento, (b) corpo de prova rompido.....	57
Figura 26 - Modo de ruptura à tração por flexão de 4 pontos: (a) resposta numérica e (b) amostra experimental.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Influência do Módulo de Elasticidade na curva força-deslocamento à compressão axial.	52
Gráfico 2 - Influência do ângulo de dilatância na curva força-deslocamento à compressão axial.	53
Gráfico 3 - Influência da viscosidade na curva força-deslocamento à compressão axial.	54
Gráfico 4 - Influência do Módulo de Elasticidade na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.....	55
Gráfico 5 - Influência do ângulo de dilatância na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.....	55
Gráfico 6 - Influência da viscosidade na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.	56
Gráfico 7 - Curvas força-deslocamento do ensaio à compressão axial.	57
Gráfico 8 - Curvas força-deslocamento do ensaio à tração na flexão de 4 pontos.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para as equações da curva tensão-deformação do concreto.	36
Tabela 2 - Parâmetros de compressão do ensaio à compressão axial e à tração na flexão.....	41
Tabela 3 - Parâmetros de tração do ensaio à compressão axial.....	41
Tabela 4 - Parâmetros de tração do ensaio à tração na flexão.....	41
Tabela 5 - Parâmetros elásticos usados no CDP.	45
Tabela 6 - Parâmetros plásticos usados para o CDP.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDP	Concrete Damaged Plasticity
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SI	Sistema Internacional
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
d_c	Porcentagem de degradação do concreto à compressão
d_t	Porcentagem de degradação do concreto à tração
E	Módulo de elasticidade
e	Parâmetro de excentricidade
f_{b0}/f_{c0}	Relação entre as resistências biaxial e uniaxial à compressão do concreto
f_c	Tensão de resistência do concreto à compressão
f_{ct}	Resistência do concreto à tração
$f_{ct,f}$	Resistência do concreto à tração na flexão
f_t	Tensão de resistência do concreto à tração
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Mega pascal
N	Newton
y	Ordenada do sistema cartesiano
x	Abcissa do sistema cartesiano
α_a	Parâmetro ascendendo da curva tensão-deformação de compressão de Guo (2014)
α_d	Parâmetro descendente da curva tensão-deformação de compressão de Guo (2014)
α_t	Parâmetro descendente da curva tensão-deformação de tração de Guo (2014)
ε_c	Deformação plástica do material;
ε_{el}	Deformação elástica
ε_{inel}	Deformação inelástica
ε_p	Deformação última do material à compressão
ε_{nom}	Deformação nominal
ε_v	Deformação verdadeira
ν	Coeficiente de Poisson
μ	Parâmetro de viscosidade
σ	Tensão
σ_c	Tensão de resistência plástica concreto à compressão
σ_t	Tensão de resistência plástica concreto à tração
σ_v	Tensão verdadeira

σ_{nom}	Tensão nominal
ψ	Ângulo de dilatação
°	Grau
%	Percentual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Estruturas de Concreto	19
2.2	Características do concreto.....	20
2.2.1	Deformação.....	20
2.2.2	Deformação elástica.....	20
2.2.3	Deformação plástica	20
2.2.4	Módulo de elasticidade	20
2.2.5	Resistência à compressão.....	21
2.2.6	Resistência à tração.....	21
2.3	Mecânica do Dano.....	22
2.4	Teoria da Plasticidade	22
2.5	Método dos elementos finitos	24
2.5.1	Passos para a análise e solução de elementos finitos.....	27
2.5.2	Fases do método dos elementos finitos.....	28
2.5.3	O software ABAQUS	29
2.5.4	Concrete Damaged Plasticity Model	32
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	Visão geral	39
3.2	Bases de dados.....	40
3.3	Produção dos modelos tridimensionais no software ABAQUS	41
3.3.1	Criação da geometria	42
3.3.2	Propriedades do concreto	44
3.3.3	Modelo constitutivo	45
3.3.4	Condições de contorno e carregamento	46
3.3.4.1	Condições de contorno.....	46
3.3.4.2	Carregamento.....	47

3.3.5	Malha de elementos finitos	48
3.3.6	Processamento	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	Ajuste dos parâmetros dos modelos constitutivos	51
4.2	Validação dos modelos constitutivos	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado mundialmente na indústria da construção civil, devido a suas características, como a sua durabilidade, porém pode-se melhorar algumas das características do concreto o utilizando juntamente com barras de aço. As estruturas de concreto armado desempenham um papel significativo nas construções contemporâneas, pois possuem um elevado valor de resistência a tração e compressão, proveniente da união do concreto e aço, (Parizotto, 2017). No entanto, essas estruturas tendem a sofrer deterioração ao longo do tempo, causadas não somente por falhas humanas cometidas na fase de concepção e execução de obras, mas também devido a influência da agressividade ambiental e ações externas não previstas. Assim, torna-se essencial realizar uma avaliação minuciosa para entender o desempenho das estruturas, porém com os avanços dos mecanismos de envelhecimento e degradação, a viabilização de manutenções preventivas pode-se prolongar a vida útil, reduzindo os custos associados a intervenções corretivas (De Moraes, 2020).

A realização de avaliações periódicas nas estruturas de concreto armado possibilita a detecção precoce de danos, permitindo a implementação oportuna de medidas de manutenção preventiva. Essa abordagem é fundamental para evitar intervenções mais extremas no futuro, contribuindo significativamente para prolongar a vida útil das estruturas. Torna-se essencial a utilização de métodos capazes de quantificar os danos presentes nas estruturas, visto que isso pode resultar em economia a longo prazo, já que permite intervenção antes que os danos se agravem, evitando a necessidade de demolição e reconstrução, processos que consomem mais recursos naturais e energia (Gasparetto, 2021).

Devido ao grande número de estruturas com deterioração precoce, que apresentam danos de diversas origens, e os recentes colapsos que ocorreram no Brasil e no mundo, cresce a atenção no meio técnico para entender e estudar a segurança estrutural (Menon; Risson; Arcine, 2020).

Nas últimas décadas surgiram os métodos numéricos capazes de encontrar soluções aproximadas de problemas complexos, desde a geometria até condições de contorno. Suas aplicações se encontram em diversas áreas de pesquisas e continuam crescendo, apesar das soluções não serem exatas, possuem um bom nível de precisão. Na Engenharia Estrutural os principais métodos usados são o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF); o MEF é o mais eficiente e prático, sendo o mais utilizado (Silva, 2023).

O MEF é utilizado como ferramenta de estudo para entender o comportamento dos elementos estruturais, passando a complementar os ensaios experimentais. Para criar um modelo numérico capaz de reproduzir o comportamento observado experimentalmente, é essencial adotar modelos construtivos que descrevam de maneira adequada o comportamento dos materiais, incluindo etapas em que o material está degradado após o aumento do carregamento. No caso de estruturas de concreto, o programa ABAQUS oferece um modelo de plasticidade do dano conhecido como Concrete Damaged Plasticity Model (CDP), baseado na Mecânica do Dano e na Teoria da Plasticidade (Brackmann *et al.*, 2021).

No modelo CDP, o concreto é visto como um material coesivo com atrito, e sua perda de rigidez (dano) está associada a perda de coesão (Nunes, 2020). Segundo Pituba (1998), essa formulação associa o comportamento não linear do concreto ao processo de microfissuração, que causa a perda de rigidez e a plastificação do material, de modo que a deformação total é dividida em uma componente recuperável e outra irrecuperável. O modelo consegue reproduzir vários tipos de simulações, com diferentes condições de carregamento e níveis de deterioração, devido considerar o comportamento não linear atrelado a propagação do dano no material. Se apresentando como uma ferramenta útil para avaliação da segurança e integridade de estruturas.

1.1 Objetivos

Nesta seção, serão abordados os objetivos do presente trabalho, subdivididos em objetivo geral e específicos com o intuito de estabelecer os principais pontos da pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver modelo numérico para análise do comportamento mecânico do concreto.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver através do software ABAQUS, modelo tridimensional capaz de simular ensaios experimentais de compressão axial e tração na flexão do concreto;
- Calibrar modelo numérico de plasticidade do dano, o Concrete Damaged Plasticity Model (CDP) no software ABAQUS, para reproduzir resultados das respostas numéricas que coincidam com os resultados dos ensaios experimentais;
- Identificar como os parâmetros plásticos influenciam no modelo numérico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão abordados os fundamentos teóricos e conceitos fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 Estruturas de Concreto

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira (NBR) 12655: 2015, define o concreto como, um material resultante da mistura homogênea de cimento, agregado miúdo e graúdo, e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários. Suas propriedades se desenvolvem por meio do endurecimento da pasta de cimento, composta por cimento e água.

As estruturas de concreto armado são amplamente utilizadas em construções atualmente, devido à sua durabilidade, resistência e versatilidade. No entanto, estão sujeitas a mecanismos de envelhecimento e deterioração. As vigas de concreto armado, por exemplo, estão sujeitas à formação de fissuras devido a vários fatores, como sobrecarga, práticas construtivas abaixo do padrão e efeitos ambientais, como a corrosão. Essas fissuras têm o potencial de comprometer a estabilidade da estrutura e podem levar a falhas se não forem tratadas adequadamente (Luu; Kim; Kim, 2023).

Em estruturas já existentes, em várias situações, há a necessidade de realizar avaliações para determinar seu estado e capacidade. Contudo, existem diversas dificuldades associadas à caracterização realista de uma estrutura, principalmente para determinar as características físicas e mecânicas dos materiais, bem como o grau de deterioração interna de um elemento estrutural. Diante desse fato, vários estudos vêm sendo realizados nas últimas décadas com o intuito de desenvolver novas técnicas capazes de determinar as características das estruturas de concreto armado, possibilitando uma avaliação e análise precisas de seu desempenho ao longo de sua vida útil (Candian, 2017).

Para auxiliar na análise do desempenho das estruturas, vem sendo empregado o método de elementos finitos (MEF), que quando calibrado com dados experimentais, permite simular o comportamento real da estrutura, sendo possível obter várias informações, como, dados térmicos, deslocamentos e tensões (Dias; Karam, 2021).

2.2 Características do concreto

Neste item, serão abordadas as definições e características do concreto.

2.2.1 Deformação

A deformação é qualquer mudança na estrutura física do concreto. De acordo com Onuki e Gasparetto (2013), elas podem se apresentar de duas naturezas, sendo causada por variações das condições ambientes, como a retração e deformações produzidas pela variação de temperatura e umidade do ambiente, e deformações provenientes de cargas externa, se apresentando como deformações lentas, imediata, recuperável e fluência. Quando a deformação é devido a aplicação de carga externa, ela é dividida em deformação elástica e plástica.

2.2.2 Deformação elástica

A deformação elástica, definida por uma deformação linear, se dá quando o concreto deformado devido a aplicação de uma carga consegue retornar ao seu formato original após cessar a carga. Isso ocorre quando o corpo é submetido a uma carga que não é capaz de superar a sua tensão de elasticidade (Melconian, 2014). Ainda segundo Melconan (2014), esse comportamento é visto até o limite elástico do material, uma vez superado esse limite o material passa para o estado de deformação plástica.

2.2.3 Deformação plástica

A deformação é considerada plástica ou permanente quando após remover a carga do corpo ele não retorna ao seu estado original. Segundo Beer (2021), para muitos materiais a deformação plástica não depende somente de quando é atingido seu valor máximo de tensão, mas também do tempo que o carregamento ficou aplicado.

2.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é a relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica produzida, ou seja, é a tensão necessária para induzir uma quantidade unitária de deformação (Melconian, 2014). O módulo de Young está vinculado à rigidez do

material, é expresso em termos de tensão de tração ou compressão, por meio da Lei de Hooke, dada pela Equação 1 abaixo.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade, σ é a tensão e ε é a deformação específica.

A deformação específica é uma quantidade adimensional, sendo assim, o módulo de elasticidade é expresso nas mesmas unidades da tensão, as quais, no SI estão em Pascal e seus múltiplos (Beer, 2021).

2.2.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão é de grande importância para avaliação do desempenho em estruturas de concreto, está ligada diretamente à capacidade do material de resistir aos esforços sem que ocorra a ruptura (Penido, 2022).

A resistência à compressão de corpos de prova no Brasil é determinada por meio de ensaios padronizados pela Norma Brasileira 5739: 2018 – Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos, os corpos de provas são normalmente usados com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (ABNT, 2018).

2.2.6 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é bastante inferior quando comparada com a resistência à compressão. Dessa forma, coloca-se em seu interior armaduras em aço, pois é um material com alta resistência a tração, por meio dessa combinação pode-se melhorar uma deficiência natural do concreto, mantendo inalteradas suas outras características. Em decorrência dessa deficiência, foram desenvolvidos vários ensaios para determinar a resistência a tração, o ensaio de tração axial, de compressão diametral e flexão em vigas (Pimentel, 2020). Todos esses ensaios são importantes, permitem melhor compreender os materiais para se realizar projetos mais seguros, adequados e econômicos.

2.3 Mecânica do Dano

A representação do comportamento físico não linear do concreto é uma tarefa complexa, devido à dificuldade em se obter diversos parâmetros que governam esse fenômeno e a concepção de um modelo numérico confiável. Por essa razão, nas últimas décadas foram propostos diversos modelos discretos e contínuos, para descrever o comportamento do concreto além do regime elástico linear. Dentre os modelos desenvolvidos a mecânica do dano contínuo de destaca na área (Silva, 2023).

Materiais como o concreto, argamassa, aço e madeira apresentam estruturas fisicamente distintas, no entanto, os seus comportamentos mecânicos são similares no quesito de parcelas elásticas, deformações, danos, e propagação de fraturas. Devido a essas similaridades, a mecânica do dano contínuo consegue descrever de forma adequada o comportamento desses matérias (De Mesquita Roehl, 2021).

Segundo Miranda (2022), a mecânica do dano contínuo assume que a deterioração do material tem relação exclusivamente com o processo de microfissuração distribuída, que ocorre devido ao aumento dos níveis de solicitação mecânica. De acordo com a mecânica do dano, a microfissuração é distribuída de forma aleatória, informe e continua.

2.4 Teoria da Plasticidade

A Teoria da Plasticidade se preocupa principalmente com as deformações sofridas pelos materiais, essa deformação é empregada para determinar o limite de resistência quando o material é sujeito a solicitações. Ao contrário das deformações elásticas, as plásticas são permanentes, ou seja, se a carga que ocasionou a deformação for cessada, uma parte da deformação permanece no material, logo tem-se uma deformação permanente. A teoria da plasticidade é estudada principalmente para atender aos materiais de engenharia que sob orientação de projeto atingem alto grau de deformação, sem atrapalhar a função de projeto, aumentando assim, a capacidade de carga do sistema (Nonato, 2024).

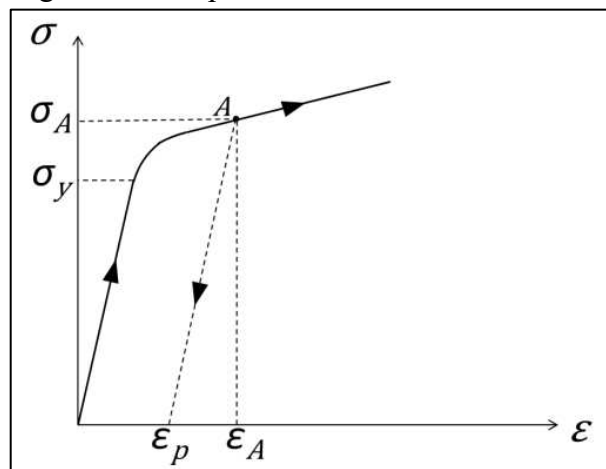
Pode-se modelar e estudar de maneira mais lógica usando a plasticidade, os comportamentos mais complexos do concreto ou do concreto armado, como por exemplo, fissuração, engrenamento de agregados, tensão-deformação não linear e outros efeitos que antes eram desprezados ou tratados de uma forma mais simplificada (Chen e Han, 1988).

A teoria da elasticidade possui como extensão de seus conceitos a teoria da plasticidade, ela ocupa-se com análises de tensões e deformações em estruturas tanto nos domínios plásticos

quanto nos domínios elásticos. A utilização de uma forma de análise elastoplástica, de forma geral proporciona um melhor entendimento acerca das respostas do elemento estrutural (Chen e Han, 1988).

A Figura 1 traz o diagrama do comportamento da tensão pela deformação de um material elastoplástico genérico quando submetido a uma tensão uniaxial. Observando o gráfico, nota-se o aparecimento de deformações irreversíveis, em decorrência do aumento das tensões acima de um limite máximo, denominado de limite de escoamento (Araújo, 2017).

Figura 1 - Comportamento sob tensão uniaxial.



Fonte: Araújo (2017).

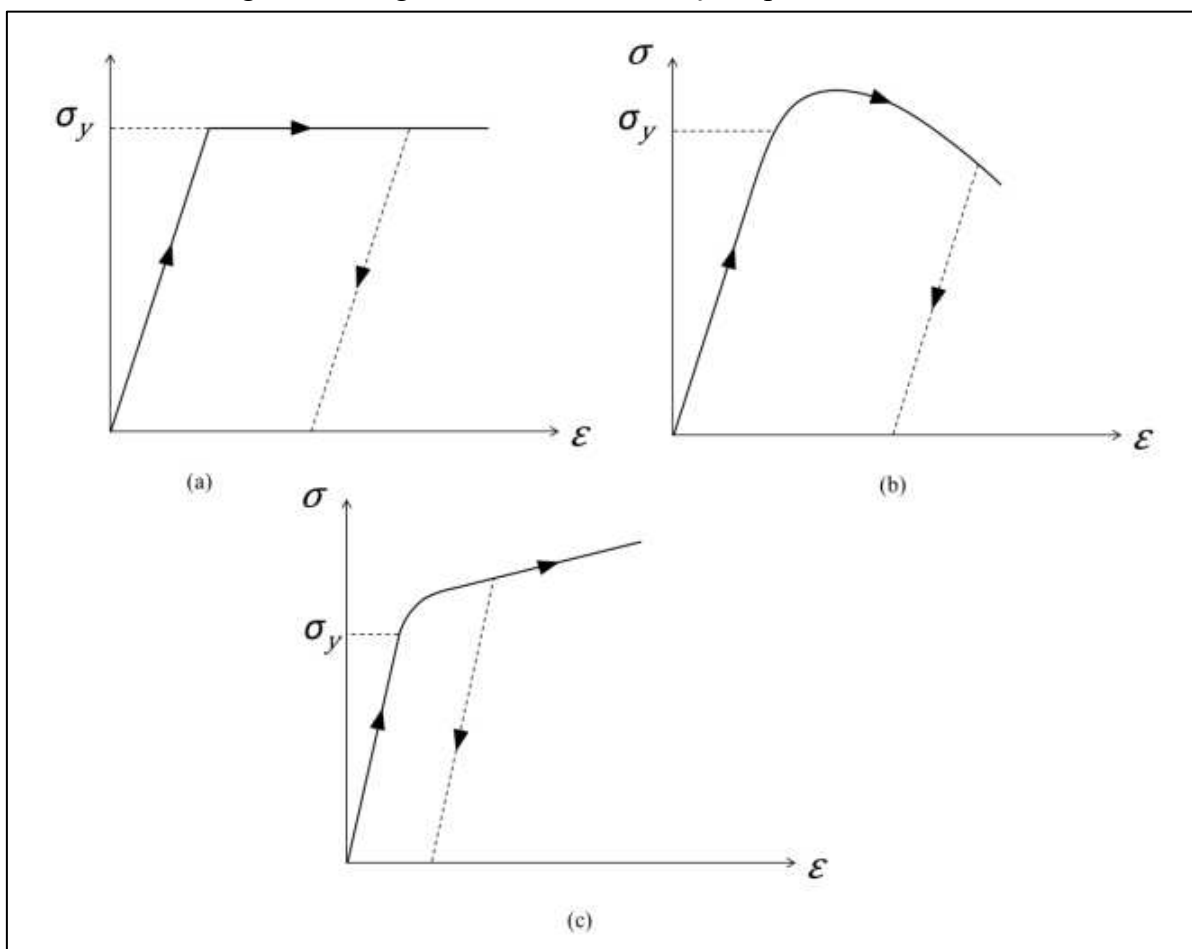
“Para tensões inferiores à tensão de escoamento, o material encontra-se em regime elástico linear, caracterizado por uma relação linear de tensão e deformação e pela ausência de deformações residuais em ciclos de carga e descarga” (Araújo, 2017, p.25). O regime elástico linear é descrito pela Equação 1.

Durante o regime plástico do material, a descarga não ocorre pelo mesmo caminho percorrido durante o processo de carregamento, mas por um trajeto quase paralelo a trajetória do regime elástico, como pode ser visto no descarregamento no ponto A da Figura 1. Quando temos uma tensão onde $\sigma_A > \sigma_y$, ocorre uma tensão residual quando é realizado o descarregamento, denominada de deformação plástica. Sendo assim, é possível definir que a deformação total ε_A , correspondente a tensão σ_A , é composta por uma parcela elástica ε_e e elástica ε_p (Equação 2).

$$\varepsilon_e = \varepsilon_A - \varepsilon_p \quad (2)$$

Segundo Araújo (2017), os materiais que possuem comportamento elastoplástico perfeito apresentam um patamar de escoamento, onde a tensão permanece constante, mas a deformação continua crescendo (Figura 2a). Já outros materiais a partir de um certo nível de tensão apresentam um comportamento conhecido como amolecimento, onde os valores de deformação correspondem a níveis continuamente menores de tensão (Figura 2b). Há também materiais que apresentam endurecimento depois do ponto de plastificação, ocorrendo aumento na tensão em conjunto com o aumento de deformação (Figura 2c).

Figura 2 - Diagramas tensão-deformação típicos de materiais.



Fonte: Araújo (2017).

2.5 Método dos elementos finitos

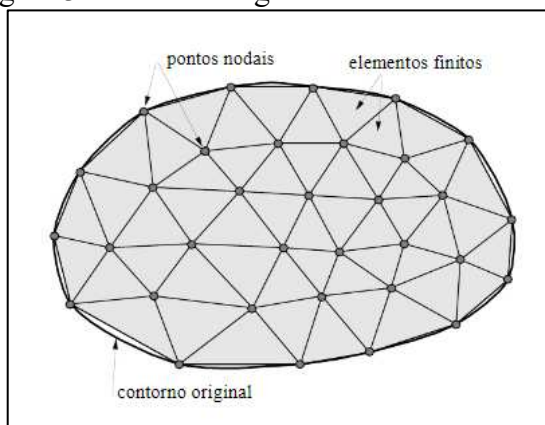
O MEF é um processo que realiza análises ao dividir a estrutura em pequenos elementos. Estes elementos são analisados separadamente, levando em consideração as condições de contorno e as vinculações estabelecidas. As interações entre esses elementos são

compatibilizadas por meio de métodos matemáticos avançados. (Babuska; Banerjee; Osborn, 2004).

A utilização de ferramentas numéricas, como o MEF possibilitam analisar detalhadamente problemas mais complexos. Trabalhando com o comportamento não linear dos materiais, os resultados obtidos apresentam níveis mais rigorosos do desempenho das estruturas (Santos, 2022).

O principal objetivo da utilização do MEF é simplificar problemas inicialmente complexos. Para alcançar isso, o método utiliza um número finito e definido de elementos, claramente especificados, dividindo em sub-regiões com geometrias simples, o conjunto desses elementos são chamados de malha, se constituindo em forma de triangular, quadrilateral, cubico, entre outros, conforme ilustra a Figura 3. Quando combinado com análise numérica, o MEF proporciona uma visualização detalhada do comportamento estrutural, incluindo flexão, torção, distribuição de tensões e deslocamentos (Monteiro, 2021).

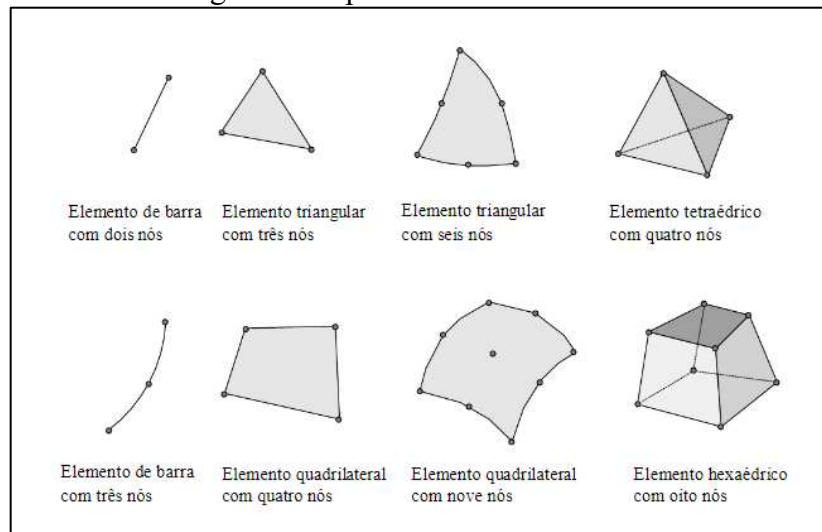
Figura 3 - Malha triangular de elementos finitos.



Fonte: Souza (2003).

Diversos tipos de elementos finitos são usados para desenvolver análises, constituindo elementos de várias geometrias (triangular, quadrilateral e cubico) em função do tipo e da dimensão do problema (unidimensional, bidimensional e tridimensional). A Figura 4 traz alguns dos tipos de elementos usados.

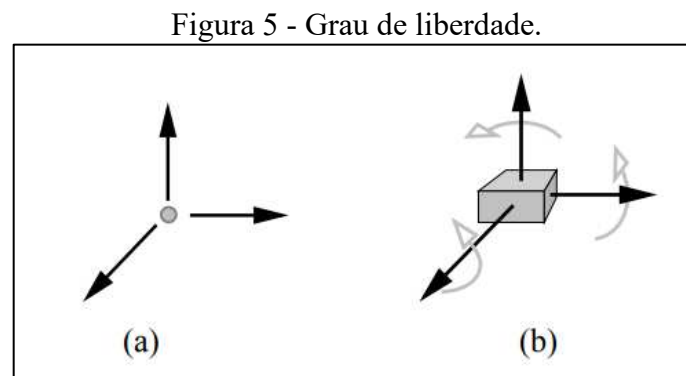
Figura 4 - Tipos de elementos finitos.



Fonte: Souza (2003).

Segundo Souza (2003), a quantidade de nós, o tipo e o tamanho dos elementos são cruciais para determinar a precisão do método. O MEF baseia-se na convergência dos dados computacionais com o problema real, e esses dados se tomam mais precisos à medida que os elementos são definidos, quanto menores foram esses elementos para definição da malha mais preciso são os resultados das análises.

Os nós são pontos presentes em cada elemento que o representa, eles podem ser adjacentes quando estão no mesmo elemento, a sua junção forma a malha, quando esses nós se encontram nas extremidades pertencem a mais de um elemento. Outro conceito importante no MEF é o grau de liberdade, esse conceito relaciona-se com a movimentação das partículas, quando se trata de um ponto, ele possui três graus de liberdade, ligadas a três possíveis formas de movimentações de translação, já um corpo rígido no espaço tridimensional, possui seis graus de liberdade, com três movimentos de translação e três de rotação (Melconian, 2014). A Figura 5 ilustra os graus de liberdades dos elementos de um nó (a) e um corpo rígido (b).

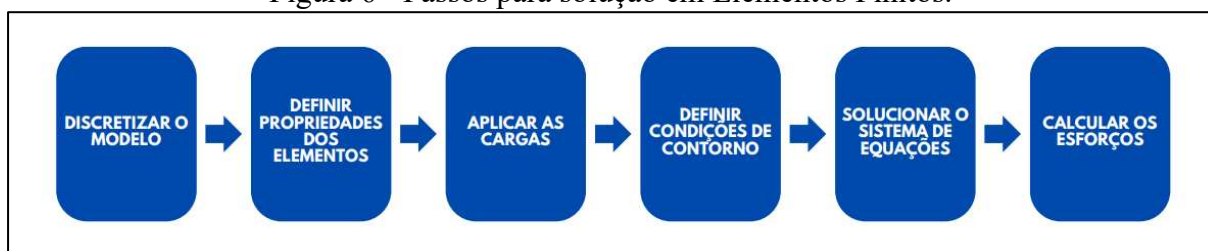


Fonte: Souza (2003).

2.5.1 Passos para a análise e solução de elementos finitos

O processo de análise de elementos finitos é desenvolvido a partir de alguns passos gerais, descritos na Figura 6.

Figura 6 - Passos para solução em Elementos Finitos.



Fonte: Autoria própria (2024).

- Processo de discretização do método:

O processo de converter a estrutura em elementos finitos é denominado de discretização. É realizada para que se consiga utilizar as teorias clássicas de cálculos, uma vez, que são analisados de forma isolada (Biagi, 2023). De acordo com Melconian (2014), como não existe teoria definida quanto a escolha dos elementos para a discretização, ela é realizada principalmente pela experiência do modelista, e essa sensibilidade é essencial para um resultado aceitável.

- Definição das propriedades dos elementos:

Nessa etapa são determinadas as características dos elementos, seu formato, tamanho e o posicionamento dos nós.

- Aplicar as cargas:

As cargas externas, concentradas ou distribuídas são aplicadas nessa etapa.

- Definir as condições de contorno:

São definidos o domínio e as condições iniciais de contorno, sendo forças e fixações que agem sobre a geometria do modelo número, e passam a influenciar o seu comportamento.

- Solucionar o sistema de equações:

Segundo Melconian (2014), a sequência descrita anteriormente conduz para um sistema de equações algébricas que vão calcular os deslocamentos nodais em cada um dos elementos da estrutura. Ainda de acordo com o autor, esse processo pode ser realizado utilizando softwares que trabalham com o método implícito ou explícito.

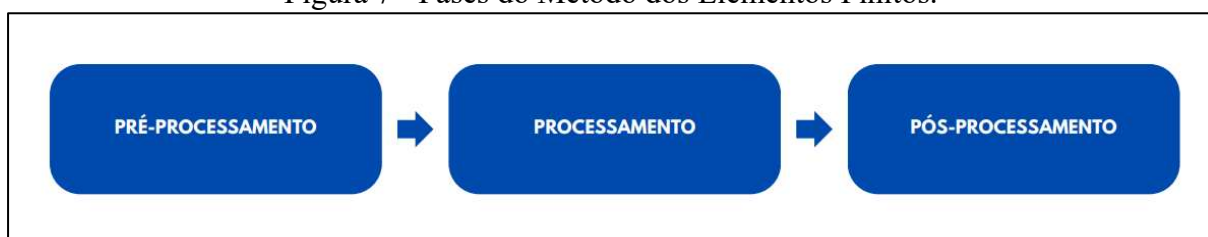
- Calcular os esforços:

As equações que definem o problema são calculadas por softwares, que trabalham com análises de elementos finitos, onde o usuário consegue visualizar os esforços, deformações, reações, e várias outras informações por meio de animações e gráficos geradas como resultado no pós-processamento (Melconian, 2014).

2.5.2 Fases do método dos elementos finitos

O Método dos elementos finitos pode ser dividido em três fases principais que englobam os passos descritos anteriormente, definindo assim a solução do problema, conforme os passos destacados no esquema presente na Figura 7.

Figura 7 - Fases do Método dos Elementos Finitos.



Fonte: Autoria própria (2024).

- Pré-processamento:

Na etapa de pré-processamento ocorre a criação e discretização do domínio para a solução em elementos finitos. São definidas todas as funções que iram representar o comportamento físico de cada elemento, posteriormente essas funções são desenvolvidas para cada elemento, onde juntas formam a matriz de rigidez. Depois disso, são definidas as propriedades dos materiais, carregamentos e condições de contorno (Da Cunha Mastela, 2023).

- Processamento:

Na etapa de processamento é obtido a solução para o conjunto de equações algébricas lineares ou não lineares, de modo simultânea, obtendo os resultados nodais, como tensões e deslocamentos (Madenci; Guven, 2015). A quantidade de equações geradas depende do tamanho do problema e da quantidade de elementos finitos na malha. Já no que diz respeito ao tempo de processamento está ligado a quantidade de equações geradas e o tipo de solução numérica adotada (Melconian, 2014).

- Pós-processamento:

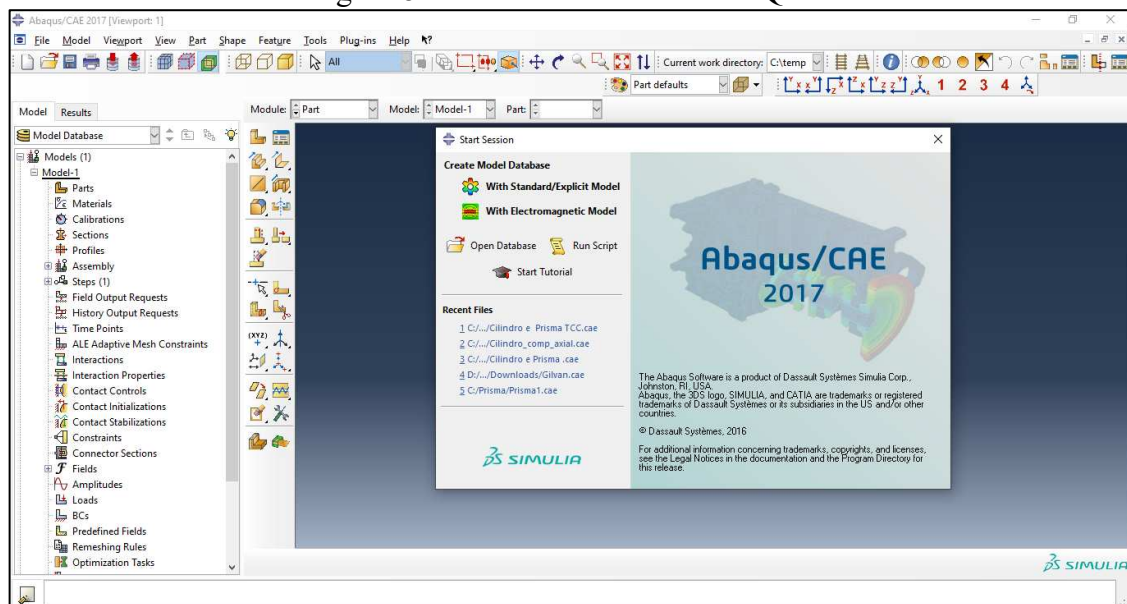
No pós-processamento são apresentados os resultados obtidos através da resolução das equações. Os programas que usam o MEF expressão os resultados por meio de animações onde é possível visualizar a peça deformada, o comportamento em sua maioria é representado por cores, para melhor visualização, identificando por exemplo, distribuição de esforços e temperatura (Melconian, 2014).

2.5.3 O software ABAQUS

O SIMULIA ABAQUS é um software de modelagem e avaliação numérica, fundamentado no Método dos Elementos Finitos, ele realiza etapas de processamento e pós-processamento. O software pertence a empresa DASSAULT SYSTÈMES S.A., que tem sua sede localiza-se em Paris na França, se apresentando como referência no mercado de programas de modelagem 3D e simulações de problemas reais (Borges, 2022). A Figura 8 traz a interface inicial do programa.

Segundo Barrios (2022), o ABAQUS é um programa desenvolvido para solucionar problemas da ciência e engenharia, no qual é possível criar, editar, monitorar e realizar diversas análises, resolvendo assim diversos problemas, que vão desde de simples problemas lineares até os complexos não lineares. O programa conta com uma biblioteca extensa de elementos finitos que permite a criação de diversas geometrias, bem como uma lista de modelos que simulam a maiorias dos materiais, facilitando a aplicação em múltiplas áreas da engenharia.

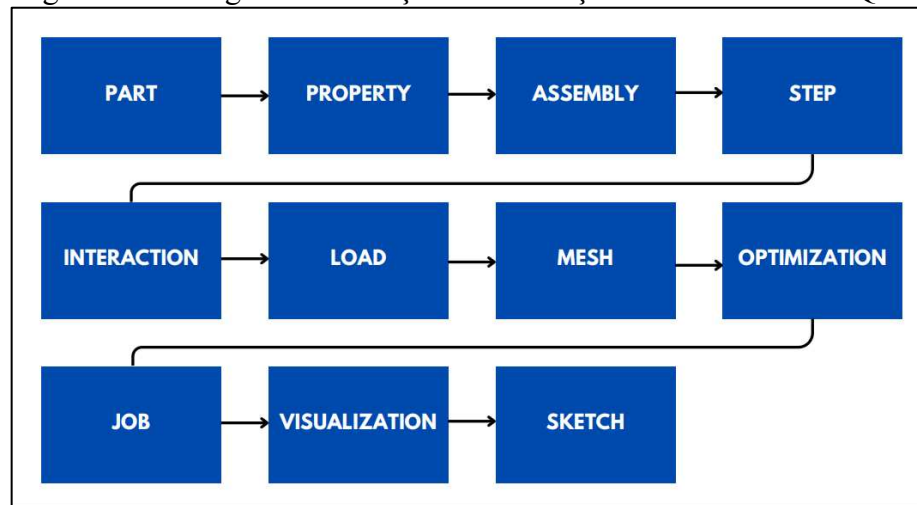
Figura 8 - Interface inicial do ABAQUS.



Fonte: Autoria própria (2024).

O software ABAQUS é dividido em módulos e cada módulo corresponde a uma etapa da criação do modelo. Cada uma dessas unidades possui somente ferramentas que servem exclusivamente para aquele processo específico. Esses módulos são dispostos em uma sequência lógica, que facilita o processo de modelagem. Os módulos e a sua sequência são mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma da criação de simulação no software ABAQUS.



Fonte: Autoria própria (2024).

- a) *Part*: são criadas as geometrias e as partes constituinte do modelo, permite a criação de uma série de elementos, quando é do tipo sólido, pode ser definido como extrudado ou rotacionado dentro de um eixo.
- b) *Property*: são atribuídas as características elásticas e plásticas do modelo.
Quando para a simulação é necessário a criação de vários elementos.
- c) *Assembly*: os elementos são unidos e posicionados de modo a satisfazer o cenário.
- d) *Step*: é definido o período da simulação, indicando o número máximo e mínimo de incrementos.
- e) *Interaction*: é definido o comportamento do sistema, são definidas as condições de contato os elementos.
- f) *Load*: são definidas as movimentações do modelo, é onde é inserido algum deslocamento sofrido pelo material por exemplo.
- g) *Mesh*: são determinados o tipo e tamanho de cada elemento finito da malha.
- h) *Optimization*: é definido o tipo e os parâmetros de otimização do modelo.
- i) *Job*: é responsável pela criação do ensaio.
- j) *Visualization*: são realizadas as análises dos resultados.
- k) *Sketch*: é usado para criar um esboço que defina uma peça plana, uma viga ou uma partição ou para criar um esboço que possa ser extrudado, varrido ou revolvido para formar uma peça tridimensional.

2.5.4 Concrete Damaged Plasticity Model

O Concrete Damage Plasticity (CDP) é um modelo constitutivo desenvolvido para replicar o comportamento estrutural de materiais considerados quase frágeis, como o concreto, argamassa, cerâmica e rochas. Sua implementação está disponível no software ABAQUS (Borges, 2022). O CDP é um modelo de dano contínuo acoplado à plasticidade, que leva em consideração que o comportamento não linear do concreto surge de microfissuras, que causam a perda de rigidez e plastificação. Portanto, a deformação total é composta pela soma de uma parte recuperável e outra irreversível (Santos, 2022).

Segundo Borges (2022), o CDP considera que o material tem um critério de dano, sendo definido por uma superfície de plastificação, e a evolução do processo de deterioração do material é determinado por parâmetros da mecânica do dano. Esse critério de falha foi desenvolvido através dos trabalhos de Lubliner *et al.* (1989) sendo a função da plasticidade e das modificações propostas por Lee e Fenves (1998).

A resposta obtida no modelo depende das propriedades mecânicas dos materiais, podendo ser obtidas por meio de equações ou experimentos, e também por meio de parâmetros próprios do CDP, sendo ajustados a cada situação analisada (Brackmann, 2021).

Através desse modelo é possível simular os danos no material, associados aos mecanismos de falhas, devido a tensões menores que a tensão última de concreto quando é submetido à compressão. Os principais mecanismos de falhas observados são a ruptura por tração e o esmagamento do concreto por compressão (Abaqus, 2014).

No software ABAQUS são inseridos parâmetros que ajustam o critério de falha, são eles: K_c , ângulo de dilatação, excentricidade, razão entre tensões de ensaio uniaxial e bi-axial (f_{b0}/f_{c0}) e o parâmetro de viscosidade.

Os parâmetros mencionados anteriormente são:

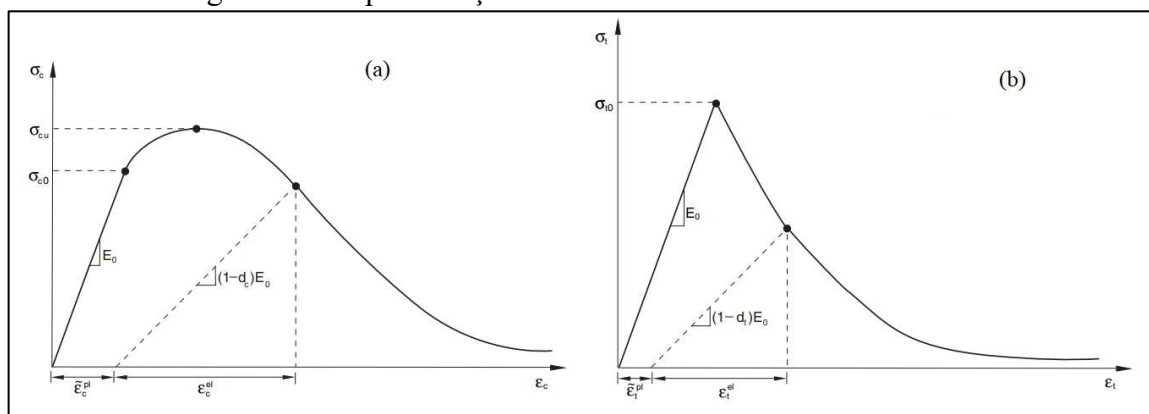
- a) Ângulo de dilatação (ψ): esse parâmetro está associado a mudança de volume do material, causada por deformações plásticas. Esse ângulo determina a capacidade de expansão do concreto quando submetido a deformações plásticas (MATOS, 2021).
- b) Parâmetro de excentricidade (ϵ): a excentricidade representa a taxa de aproximação da hipérbole a sua assíntota no plano meridiano. De acordo com a teoria de Drucker Prager,

essa superfície de escoamento é apresentada na forma de uma reta sendo. O software sugere que o valor adotado de 0,1.

- c) f_{b0}/f_{c0} : esse parâmetro é a relação entre as resistências biaxial e uniaxial à compressão do concreto. O manual de usuário do ABAQUS sugere o valor de 1,16 para o concreto.
- d) K : é representada pela razão entre a distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e de compressão situado no plano desviador. Segundo a documentação do ABAQUS (Abaqus, 2014), K_c deve ser usado com valor de 2/3 para o concreto.
- e) Parâmetro de viscosidade (μ): esse parâmetro diz respeito ao índice de viscosidade do material. Representa o tempo de relaxação do sistema viscoplástico, variando entre 0 e 1, o tempo de carregamento do modelo no software também está ligado a esse parâmetro. Quando se está trabalhando com análises estáticas de pequenas durações é considerado muitas vezes o valor zero. Mas como está ligado a convergência do material trabalhado, um pequeno aumento nesse valor ajuda a aumentar a taxa de convergência do modelo (Abaqus, 2014).

A Figura 10 mostra a resposta do modelo matemático, onde a ilustração (a) representa a resposta à compressão e a ilustração (b) a resposta à tração.

Figura 10 - Representação do modelo matemático no concreto.



Fonte: Abaqus (2017).

Segundo Chaves (2021), o modelo representa o comportamento não linear do concreto, a linha tracejada ilustrada na figura acima corresponde a rigidez danificada do material, isso

significa que a rigidez danificada está associada ao processo cíclico de carregamento e descarregamento, provocando danos no material.

O dano é caracterizado por meio de tensão e deformações sofridas pelos materiais, encontrados através de ensaios experimentais, mas, quando esses valores não são determinados por meios experimentais vários autores usam de modelos matemáticos que auxiliam nessa representação, um dos mais usados no meio técnico é o modelo de Guo (2014) (Chaves, 2021).

De acordo com Jankwoiak e Lodygowski (2005) apud Medeiros (2018), os danos do concreto à compressão e tração são obtidos levando em consideração as tensões resistentes e tensões de deformações plásticas. A Equação 3 é usada para obtenção do dano a compressão do concreto e a Equação 4 para obter os valores de danos a tração.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (3)$$

Onde,

d_c é a porcentagem de degradação do concreto à compressão;

σ_c é a tensão de resistência plástica concreto à compressão;

f_c é a tensão de resistência do concreto à compressão.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (4)$$

Onde,

d_t é a porcentagem de degradação do concreto à tração;

σ_t é a tensão de resistência plástica concreto à tração;

f_t é a tensão de resistência do concreto à tração.

Além do parâmetro de dano é necessário calcular também as deformações elásticas (Equação 5) e inelásticas (Equação 6). É válido ressaltar que os valores das deformações inelásticas de vem ser sempre positivos e crescentes.

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E_0} \quad (5)$$

Onde,

ε_{el} é a deformação elástica do concreto;

σ é a tensão do concreto;

E_0 é o modulo de deformação inicial do concreto.

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon - \varepsilon_{el} \quad (6)$$

Onde,

ε_{inel} é a deformação inelástica do concreto;

ε é a deformação do concreto.

Segundo Medeiros (2018), o software ABAQUS considera as deformações elásticas e inelásticas de forma separada. Sendo assim, é necessário converter as tensões e deformações nominais em verdadeiras, ou seja, será considerado a variação da área do corpo ao longo do ensaio. A formulação para obtenção desses valores de tensão e deformação verdadeiras são expressas na Equações 7 e 8 respectivamente.

$$\sigma_v = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (8)$$

No modelo de Guo (2014), os valores de tensão e deformação são convertidos em coordenadas cartesianas, de acordo com as Equações 9 e 10.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} \quad (9)$$

Onde,

x é a abcissa do sistema cartesiano;

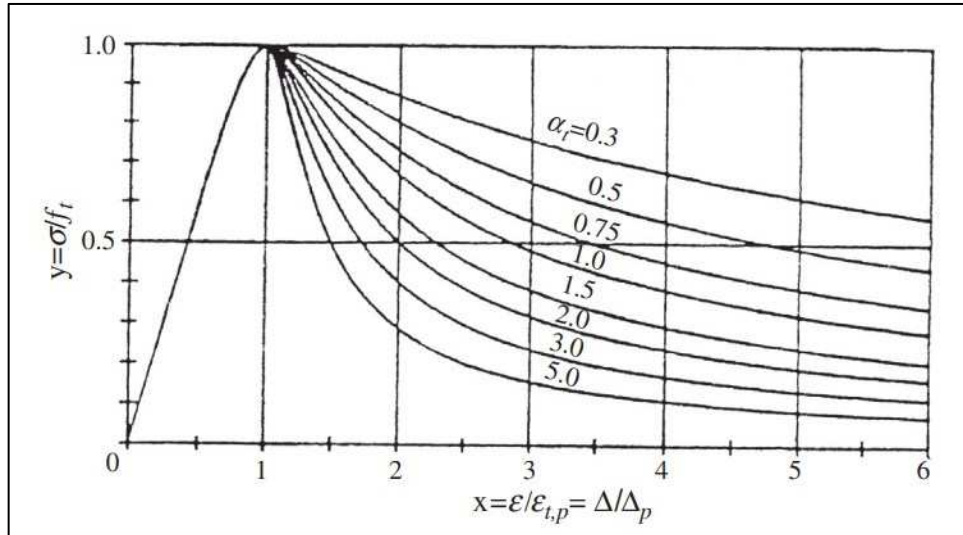
ε_c é a deformação plástica do concreto à compressão;

ε_p é a deformação última do material à compressão.

$$y = \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (10)$$

Além da representação para o comportamento a compressão, Guo (2014) também criou um modelo construtivo para representar o concreto sujeito a tração, pode-se ver as curvas desse modelo na Figura 12.

Figura 12 - Curva teórica tensão-deformação na tração.



Fonte: Guo (2014).

Os valores de tensões e deformações são transformados em um sistema de coordenadas, onde a abcissa é representada pela Equação 13 e a ordenada pela Equação 14.

$$x = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t,p}} \quad (13)$$

Onde,

x é a abcissa do sistema cartesiano;

ε_t é a deformação plástica do material;

$\varepsilon_{t,p}$ é a deformação última do material à tração.

$$y = \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (14)$$

Onde,

y é a ordenada do sistema cartesiano;

σ_t é a tensão de resistência plástica concreto à tração;

f_t é a resistência do concreto à tração.

Para a curva de tração também são considerados intervalos no trecho ascendente e descentes, sendo os valores dos intervalos expressos pelas Equações 15 e 16.

$$x \leq 1 \quad y = 1,2x - 0,2x^6 \quad (15)$$

$$x \geq 1 \quad y = \frac{x}{\alpha_t(x - 1)^{1,7} + x} \quad (16)$$

Sendo α_t encontrado pela Equação 17.

$$\alpha_t = 0,312ft^2 \quad (17)$$

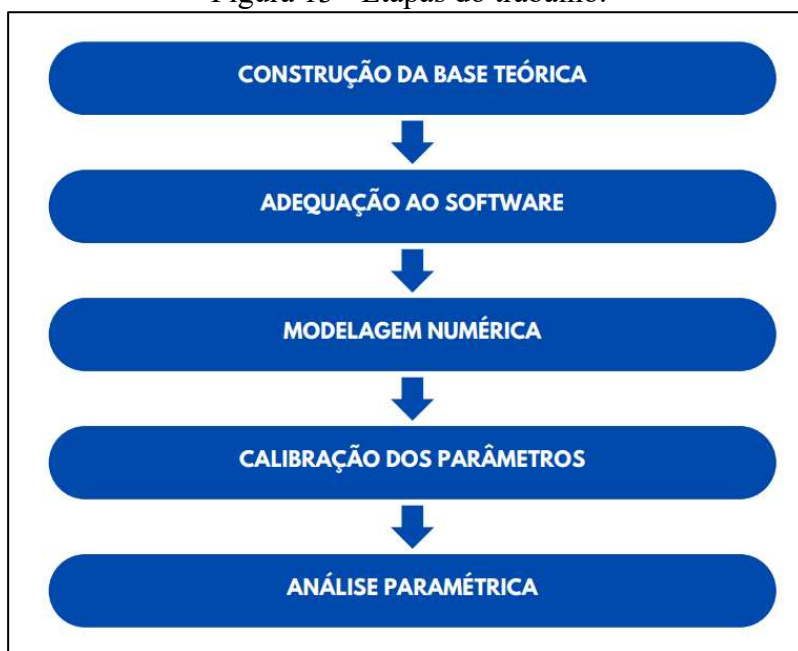
3 METODOLOGIA

3.1 Visão geral

Esse trabalho teve como base os resultados dos ensaios experimentais de compressão axial e tração de flexão por Costa (2023).

Para a elaboração do trabalho, este foi dividido em cinco etapas, expostas na Figura 13.

Figura 13 - Etapas do trabalho.



Fonte: Autoria própria (2024).

Inicialmente realizou-se uma pesquisa e leitura de trabalhos acadêmicos, como livros, artigos, teses e dissertações, com o intuito de se aprofundar no tema abordado, obtendo fundamentos para a criação da base teórica.

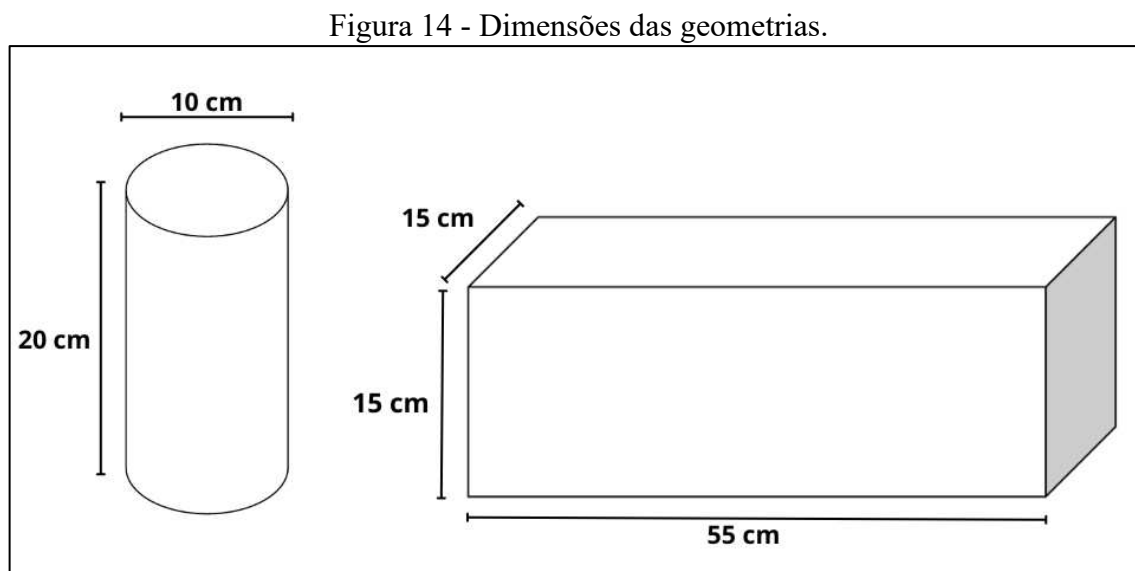
Em seguida, foi desenvolvida a etapa de treinamento para a utilização do software ABAQUS® na versão 2017. A partir do conhecimento adquirido na ferramenta, prosseguiu-se para a terceira etapa do projeto. Foram então criados dois modelos numéricos para reproduzir os protótipos experimentais ensaiados por Costa (2023).

Depois da modelagem numérica realizada foi feita a calibração e refinamento dos dados do modelo para validação. Nesta fase foram realizados ajustes dos parâmetros de interações entre as partes, com o intuito de reproduzir a situação real.

Por fim, com os modelos já validados foi realizada uma análise paramétrica, com o intuito de observar como a variação de determinados propriedades influenciam no comportamento dos corpos.

3.2 Bases de dados

Para realizar a calibração do modelo optou-se pela utilização do trabalho de Costa (2023) como mencionado anteriormente, que contém a resultados dos ensaios de compressão axial e tensão por flexão usando corpos de concreto convencional. O intuito da calibração é mostrar que a estrutura modelada no ABAQUS apresenta resultados próximos aos ensaios reais. A Figura 14 traz os modelos geométricos submetidos aos ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para os ajustes dos dados inseridos foi utilizado a modelo número de Guo (2014), transformando os dados de tensão e deformação em coordenadas numéricas, e posteriormente em tensões e deformações reais.

Aplicando o método numérico de Guo (2014), obteve-se os dados de tensão, deformação inelástica e dano para aplicação no software ABAQUS. Os dados de compressão do ensaio à compressão axial estão presentes na Tabela 2, sendo usados também para representar a compressão no ensaio de tração na flexão, uma vez que o ensaio não dispunha de dados de compressão, os dados de tração do ensaio de compressão axial estão expressos na Tabela 3, já os dados de tração do ensaio de tração na flexão podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 2 - Parâmetros de compressão do ensaio à compressão axial e à tração na flexão.

X	Y	σ_{nom} (Mpa)	ϵ_{nom}	σ_v (Mpa)	ϵ_v	ϵ_{inel}	dc
0.046	0.07729	1.25669	0.02000	1.28182	0.01980	0.01960	0.00000
0.713	0.89977	19.31250	0.31000	25.29937	0.27003	0.26600	0.00000
1.000	1.00000	23.12330	0.43500	33.18194	0.36116	0.35589	0.00000
2.000	0.50000	11.56165	0.87000	21.62029	0.62594	0.62250	0.06500
3.000	0.27273	6.30636	1.30500	14.53615	0.83508	0.83277	0.37136
4.000	0.18182	4.20424	1.74000	11.51961	1.00796	1.00613	0.50182
5.000	0.13514	3.12477	2.17500	9.92115	1.15531	1.15373	0.57095
6.000	0.10714	2.47750	2.61000	8.94376	1.28371	1.28229	0.61321

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 3 - Parâmetros de tração do ensaio à compressão axial.

X	Y	σ_{nom} (Mpa)	ϵ_{nom}	σ_v (Mpa)	ϵ_v	ϵ_{inel}	dt
1,00	1,00000	2,00000	0,00029	2,00059	0,00029	0,00000	0,00000
2,00	0,61576	1,23153	0,00059	1,23225	0,00059	0,00041	0,38387
3,00	0,42524	0,85049	0,00088	0,85124	0,00088	0,00076	0,57438
4,00	0,33117	0,66234	0,00118	0,66312	0,00118	0,00108	0,66844
5,00	0,27512	0,55024	0,00147	0,55105	0,00147	0,00139	0,72448
6,00	0,23761	0,47522	0,00176	0,47606	0,00176	0,00169	0,76197

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 4 - Parâmetros de tração do ensaio à tração na flexão.

X	Y	σ_{nom} (Mpa)	ϵ_{nom}	σ_v (Mpa)	ϵ_v	ϵ_{inel}	dt
1.00	1.00000	3.04530	0.00015	3.04576	0.00015	0.00000	0.00000
2.00	0.40871	1.24465	0.00030	1.24502	0.00030	0.00024	0.59117
3.00	0.24192	0.73672	0.00046	0.73705	0.00046	0.00042	0.75797
4.00	0.17598	0.53593	0.00061	0.53625	0.00061	0.00058	0.82391
5.00	0.14067	0.42839	0.00076	0.42872	0.00076	0.00074	0.85922
6.00	0.11850	0.36086	0.00091	0.36119	0.00091	0.00090	0.88139

Fonte: Autoria própria (2024).

3.3 Produção dos modelos tridimensionais no software ABAQUS

Para a construção dos modelos foi usado o software ABAQUS na versão de 2017. Para que a representação seja realista é necessário que os dados inseridos no programa sejam confiáveis e completos.

Esse software foi escolhido devido a ser amplamente utilizado atualmente para modelagem de estruturas de concreto, principalmente pelo seu modelo de CDP, se mostrando uma ótima alternativa para se conseguir resultados satisfatórios. O programa possui uma

interface interativa, dividida nas etapas que devem ser seguidas. Nos tópicos seguintes são descritas as etapas realizadas para a modelagem e avaliação numérica.

3.3.1 Criação da geometria

As geometrias foram criadas a partir dos protótipos experimentais analisados e ensaiados por Costa (2023) apresentado na Figura 14, com o corpo cilíndrico com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), e o prisma contendo dimensões de 15 cm x 15 cm x 55 cm (largura x altura x comprimento).

- **Compressão axial**

Foi realizado por Costa (2023) o ensaio de compressão axial no corpo cilíndrico, estabelecido de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2018), que consiste na aplicação de uma carga pontual até que ocorra a ruptura do corpo de prova. O ensaio foi realizado com o auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de 2000 kN. O corpo de prova foi posicionado de forma que o seu eixo coincidiu com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passasse pelo centro do corpo. Foi usado um suporte magnético e um relógio comparador para obter o deslocamento do corpo de prova (Figura 15).

Figura 15 - Montagem do ensaio a compressão axial



Fonte: Costa (2023).

- **Tração na flexão**

Foi realizado por Costa (2023) o ensaio de resistência à tração na flexão no corpo de prova prismático (Figura 16), tendo o seu procedimento descrito na NBR 12142 (ABNT, 2010). A referida norma determina que o corpo de prova deve ser posicionado com a sua maior dimensão paralela ao seu eixo longitudinal, sobre os apoios, de maneira centralizada. Sendo assim, é aplicado uma carga de forma gradual e uniforme. Assim como no ensaio a compressão axial, o de tração na flexão foi realizado usando uma presa elétrica hidráulica com capacidade de 2000kN. A norma sugere que seja realizada uma marcação no prisma para auxiliar no posicionamento na máquina, sendo realizada duas marcações a 5 cm das extremidades e mais duas a 15 cm das marcações externas.

Figura 16 - Montagem do ensaio a tração na flexão

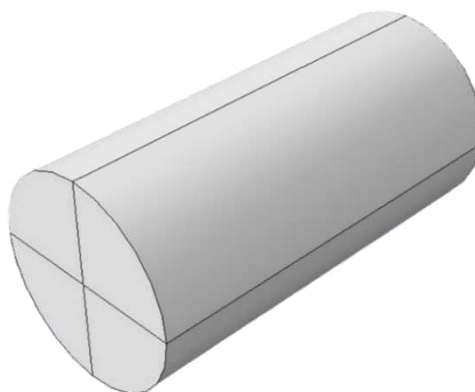


Fonte: Costa (2023).

Entender como ocorreu os procedimentos dos ensaios é de extrema importância para auxiliar a retratar de forma realista a modelagem numérica.

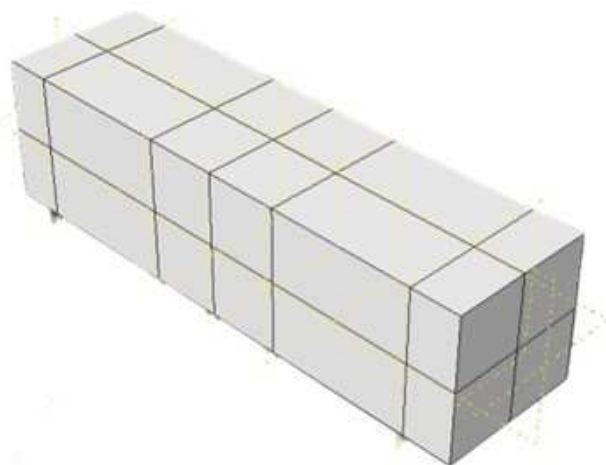
O primeiro passo da análise numérica no ABAQUS é desenhar a geometria dos corpos. Por meio do módulo *Part* ela é criada e pode ser modificada. Nas Figuras 17 e 18 são vistas as geometrias criadas para o corpo cilíndrico (compressão axial) e prismático (tração na flexão) respectivamente. As duas geometrias são divididas em partes para facilitar o posicionamento da condição de contorno e aplicação dos deslocamentos.

Figura 17 - Geometria compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 18 - Geometria tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.2 Propriedades do concreto

O concreto utilizado para a moldagem da estrutura foi dosado para apresentar um f_{ck} de 20 MPa, sendo ensaiado aos 28 dias para conferência do valor real obtido. Quando o corpo de prova cilíndrico foi submetido ao ensaio de compressão axial apresentou um valor médio de resistência a compressão axial de 22,58 MPa, já no ensaio de tração na flexão realizado com o corpo prismático o valor de resistência à tração na flexão média foi de 2,86 MPa.

Para determinar os dados de entrada no ABAQUS mais específicos são necessários os valores de resistência à tração e compressão, como não foi apresentado dados de ensaios a tração direta, foi usado o valor do ensaio por tração na flexão relacionados por meio da Equação 18 descrita na NBR 6118 (2023), sendo $f_{ct,f}$ de 2,86 MPa.

$$f_{ct} = 0,7 * f_{ct,f} \quad (18)$$

Vale ressaltar que os dois corpos de prova foram criados com o mesmo material e os ensaios foram realizados no mesmo dia. Nos ensaios experimentais foram ensaiados três corpos de prova para o ensaio a compressão axial e dois para a tração na flexão. Para os dados numéricos foi adotado os resultados que mais representaram o ensaio de modo geral.

3.3.3 Modelo constitutivo

O modelo utilizado dentro do ABAQUS foi o *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Segundo Silva (2023), é indicado para aplicação em situações em que o concreto está sujeito a carregamentos monotônicos, cíclicos e/ou dinâmicos com baixos níveis de confinamento.

Para a obtenção de dados a serem inseridos no software ABAQUS foi utilizado os dados dos ensaios experimentais, com a aplicação do modelo de Guo (2014).

Para a modelagem do concreto é necessário primeiramente determinar os dados para análise elástica. O ABAQUS pede os valores do modulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material. O valor do modulo de elasticidade do material foi determinado a partir do gráfico dos ensaios experimentais, e o coeficiente de Poisson foi adotado com base na literatura. Os dados adotados para o ensaio a compressão axial e tração na flexão são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 - Parâmetros elásticos usados no CDP.

Compressão axial		Tração na flexão	
E (MPa)	6290	E (MPa)	6290
ν	0,2	ν	0,2

Fonte: Autoria própria (2024).

Além dos dados elásticos no modelo CDP é necessário inserir também parâmetros plásticos, a sua maioria possui valores indicados pelo manual do usuário ABAQUS (Abaqus, 2014). São eles o ângulo de dilatação (ψ), excentricidade (e), razão entre tensões de ensaio uniaxial e biaxial (f_{b0}/f_{c0}), parâmetro K_c e a viscosidade (μ). Todos os valores adotados inicialmente para os dois ensaios trabalhados são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros plásticos usados para o CDP.

ψ	e	$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	K_c	μ
38°	0,1	1,16	0,6667	0,0

Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.4 Condições de contorno e carregamento

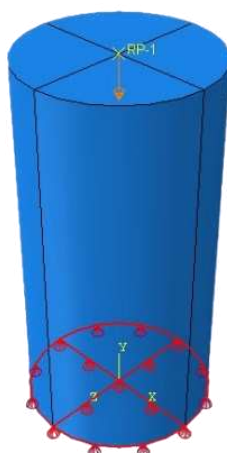
Nesta seção serão identificadas as condições de contorno e carregamento realizadas nos modelos números.

3.3.4.1 Condições de contorno

A Figura 19 mostra como os componentes foram posicionados para o ensaio de compressão axial. É possível identificar que o corpo fica preso por meio de duas bases metálicas da prensa, fazendo com que o corpo não se mova verticalmente, a na fase superior a base é pressionada sobre o corpo fazendo exercer uma força que percorre toda superfície e a sua resultante se encontra no centro.

Para replicar as condições vivenciadas nos ensaios, restringiu-se a movimentação do corpo de prova no eixo vertical. Observando a Figura 15, optou-se por usar restrição no eixo y em toda a base do corpo e no centro restringir nas três direções para impedir o deslizamento da peça, de modo a representar ao máximo a situação real.

Figura 19 - Condição de contorno no ensaio à compressão axial.

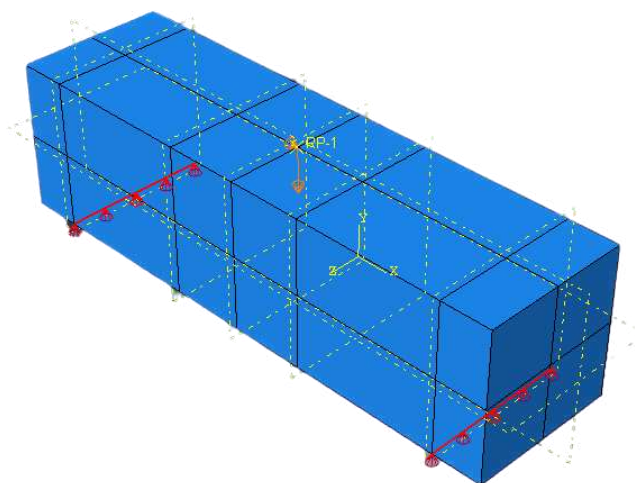


Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 16, pode-se observar o esquema para a realização do ensaio de tração na flexão por 4 pontos. O prisma fica preso pelas chapas da prensa e pelas bases metálicas. É possível observar que a força aplicada na prensa é repassada para o corpo pelos dois pontos de apoio superior, e a base do prisma se encontra mais dois pontos de apoio de modo a completarem o esquema.

Para replicar a condição do ensaio foi restringida na direção vertical na parte inferior do prisma, nos seus apoios da extremidade, como mostra a Figura 20, foi restringido também movimentação vertical na fase superior do corpo de modo a representar os apoios a base metálica superior.

Figura 20 - Condição de contorno inferiores no ensaio à tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.4.2 Carregamento

O carregamento foi aplicado de acordo com o ensaio de compressão axial base. Foi criado um ponto de referência para aplicação de deslocamento gradual, variando de 0 a 2 mm. Para o ponto de referência foi usado a restrição *Coupling*, de modo que a força aplicada fosse distribuída por todo o topo do corpo de prova. O esquema desenvolvido pode ser visto na Figura 21. O ponto no topo do modelo foi usado para obter a resposta numérica correspondendo a força e deslocamento.

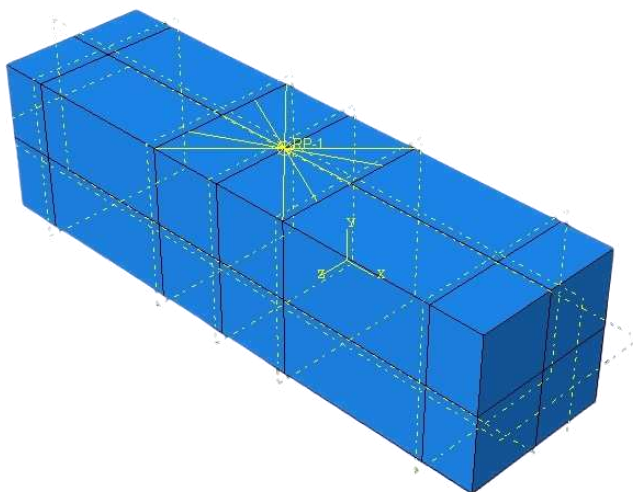
Figura 21 - Carregamento aplicado no ensaio à compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para o ensaio de tração na flexão foi adotado um ponto de referência no topo do prisma, de modo a concentrar a força nos pontos de apoio superior da base metálica para simular o ensaio de tração na flexão. Assim, como no ensaio anterior o deslocamento aplicado variou entre 0 e 2 mm (Figura 22).

Figura 22 - Carregamento aplicado no ensaio à tração na flexão.



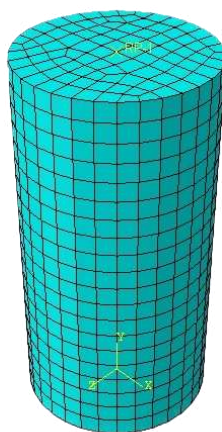
Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.5 Malha de elementos finitos

Para a geração da malha de elemento finitos o software solicita o tipo de elemento e o comprimento médio de arestas. Para os dois modelos foram usados o elemento do tipo C3D8R, com 8 nós por elemento e três graus de liberdade por nó, translações nas direções x, y e z, e

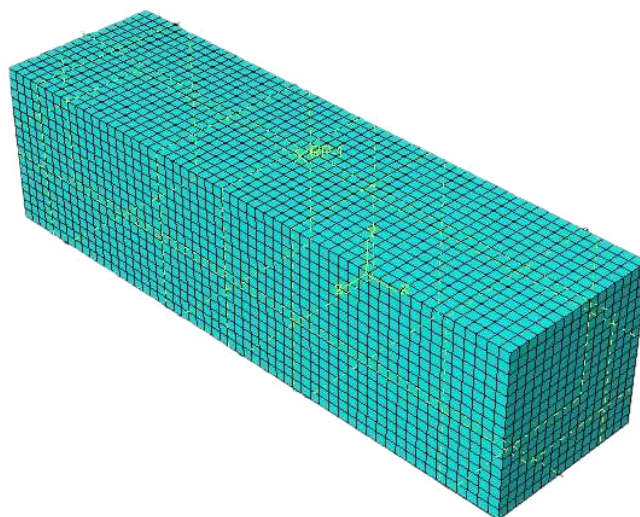
com integração reduzida, com comprimento das arestas de 10 mm. As Figuras 23 e 24 mostram a malha do corpo de prova cilindro e prismático respectivamente. Vale ressaltar que o tamanho dos elementos da malha influencia na precisão do modelo, mas devido ao custo computacional aumentar de forma significativa para malhas inferiores, se tornando inviável para a análise, foi utilizada somente malha com elementos de 10 mm.

Figura 23 - Malha para o ensaio à compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 24 - Malha para o ensaio à tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.6 Processamento

O processamento do modelo a compressão axial resultou em 4098 incrementos, com o tempo gasto de 18 horas e 13 minutos, já o modelo do ensaio de tração na flexão de 4 pontos foi de 2492 incremento com tempo gasto de 8 horas e 5 minutos. O processamento dos modelos se tornou um empecilho para obter os resultados, devido ao software necessitar de um custo computacional elevado, e a máquina utilizada não possuía suporte para agilizar o processamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas dos ensaios a compressão axial e tração na flexão. Também será realizada uma comparação desses resultados com os obtidos por meio dos ensaios experimentais por Costa (2023).

4.1 Ajuste dos parâmetros dos modelos constitutivos

Para ambos os modelos construtivos foram realizados ajustes dos parâmetros do CDP, de modo a verificar a influência de cada um deles. Para a verificação foi utilizado como base o gráfico de força-deslocamento experimental.

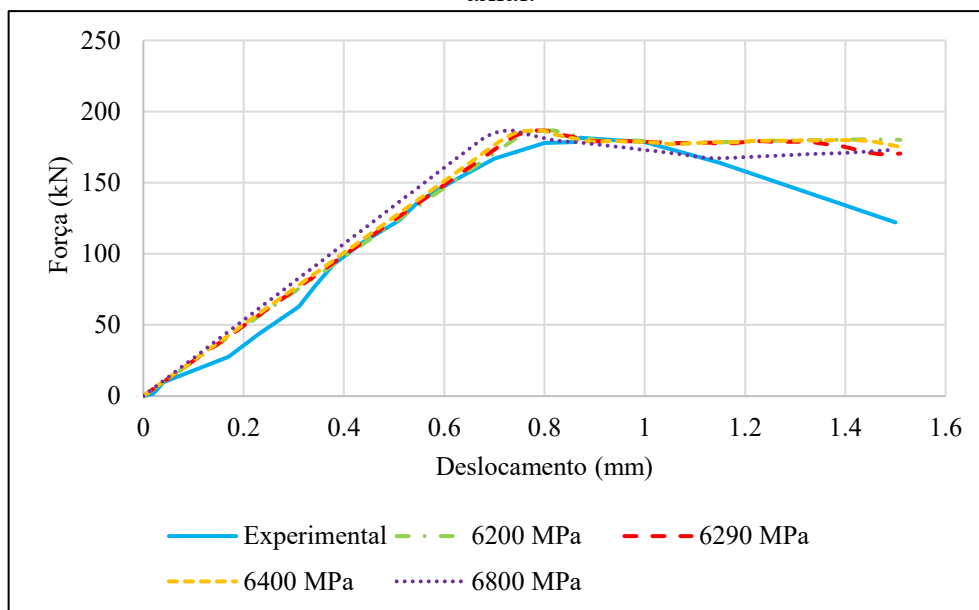
4.1.1 Compressão axial

Para os parâmetros plásticos f_{b0}/f_{c0} , K e a excentricidade (e) foram adotados os valores padrão de 1,16, 0,6667 e 0,1 respectivamente, sugerido pelo manual de usuário do ABAQUS, já a viscosidade foi adotada 0,0.

No modelo foi variado os valores para o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade base foi determinado realizando a aplicação da variação da tensão e deformação encontrada na fase elástica pela curva tensão-deformação, fase inicial do carregamento, sendo encontrado um valor de 6290 MPa. O Módulo de Elasticidade foi variado para analisar a inclinação da curva diante as modificações. Desse modo, foi adotado valores de 6200 MPa, 6400 MPa e 6800 MPa, além do módulo inicial. Essa variação provocou uma mudança na inclinação já prevista na fase elástica.

Diante dos resultados expressos no Gráfico 1 foi escolhido o valor de 6280 MPa como módulo de elasticidade utilizado no modelo para as demais análises.

Gráfico 1 - Influência do Módulo de Elasticidade na curva força-deslocamento à compressão axial.

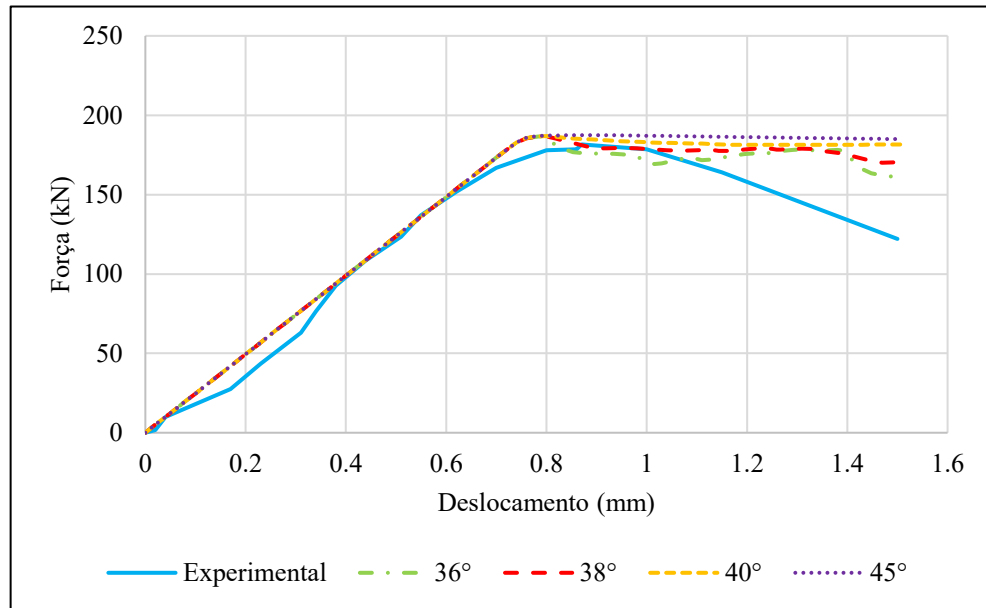


Fonte: Autoria própria (2024).

Para o ângulo de dilatância foram realizadas simulações com valores variando entre 36°, 38°, 40° e 45°, deixando fixos os valores do módulo de elasticidade em 6280 MPa, excentricidade de 0,1, a relação f_{b0}/f_{c0} de 1,16, o parâmetro k de 0,6667 e viscosidade 0,0.

Essa variação não provocou grandes mudanças entre as curvas de força-deslocamento. Como pode ser observado no Gráfico 2, quanto menor o ângulo de dilatância usado, menor foi a variação da curva em relação a experimental. Sendo assim, o ângulo foi definido com o valor de 38°, tendo em vista, que mais se aproximou da experimental e também é um valor amplamente utilizado na literatura para o concreto.

Gráfico 2 - Influência do ângulo de dilatância na curva força-deslocamento à compressão axial.



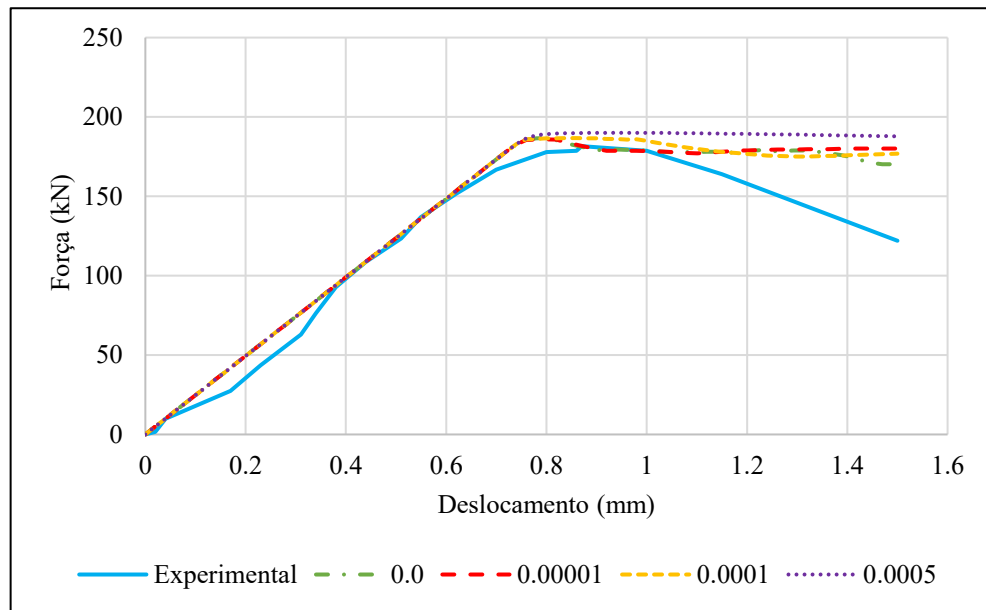
Fonte: Autoria própria (2024).

Para verificar o parâmetro de viscosidade foram realizados processamentos considerando quatro valores distintos, de modo a identificar o valor que mais se aproximava da curva experimental. Para a variação do parâmetro de viscosidade foram fixados os valores para o ângulo de dilatação de 38° , excentricidade de 0,1, a relação f_{b0}/f_{c0} de 1,16 e o parâmetro k de 0,6667.

A influência da viscosidade é analisada no Gráfico 3, as variações foram testadas com valores de $\mu = 0,0$, $\mu = 0,00001$, $\mu = 0,0001$ e $\mu = 0,0005$, escolhidos com base na literatura, sendo encontrados em vários trabalhos acadêmicos como o de Brackmann (2021).

Como é possível observar no Gráfico 3, para $\mu = 0,0$ o modelo apresentou uma variação considerável quando comparada a curva força-deslocamento experimental. Para os valores $\mu = 0,0001$ e $\mu = 0,0005$ a curva chegou a valores mais aproximados da curva experimental. Dessa forma, o parâmetro de viscosidade foi definido como 0,0001, visto que dos valores testados foi o que apresentou uma melhor aproximação com a curva experimental.

Gráfico 3 - Influência da viscosidade na curva força-deslocamento à compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

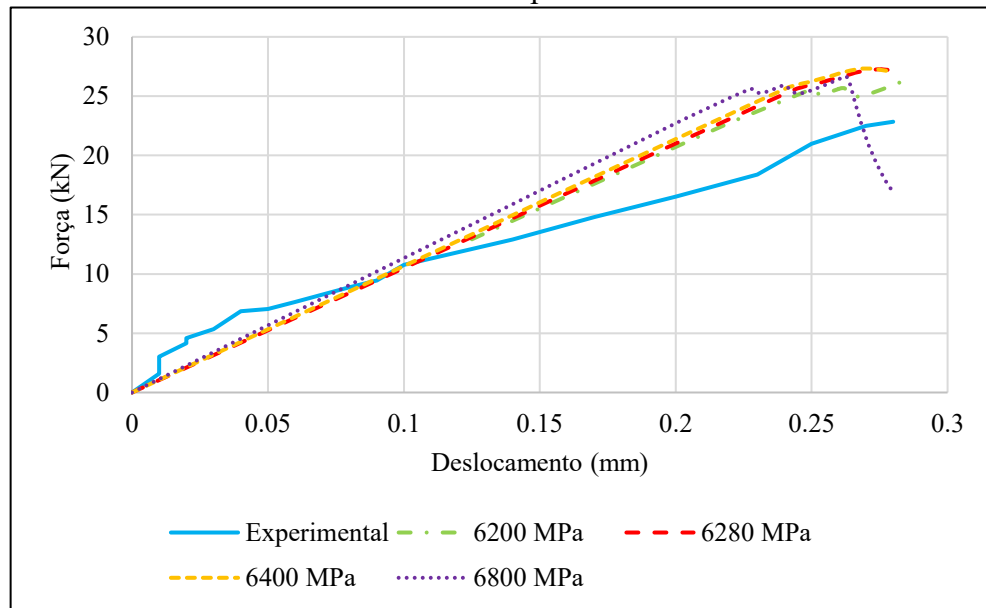
4.1.2 Tração na flexão

Para o modelo numérico à tração na flexão os valores iniciais dos parâmetros elásticos e plásticos foram determinados de acordo com o modelo à compressão axial, uma vez, que esses parâmetros já haviam sido calibrados. Sendo assim, para parâmetros elásticos foram adotados módulo de elasticidade de 6280 MPa, coeficiente de Poisson 0,2, e para os parâmetros plásticos o ângulo de dilatância de 38° , excentricidade de 0,1, a relação f_{b0}/f_{c0} de 1,16 e o parâmetro k de 0,6667, e viscosidade de 0,0001.

Na tentativa de uma calibração mais específica, foram variados os parâmetros de módulo de elasticidade, ângulo de dilatância e viscosidade.

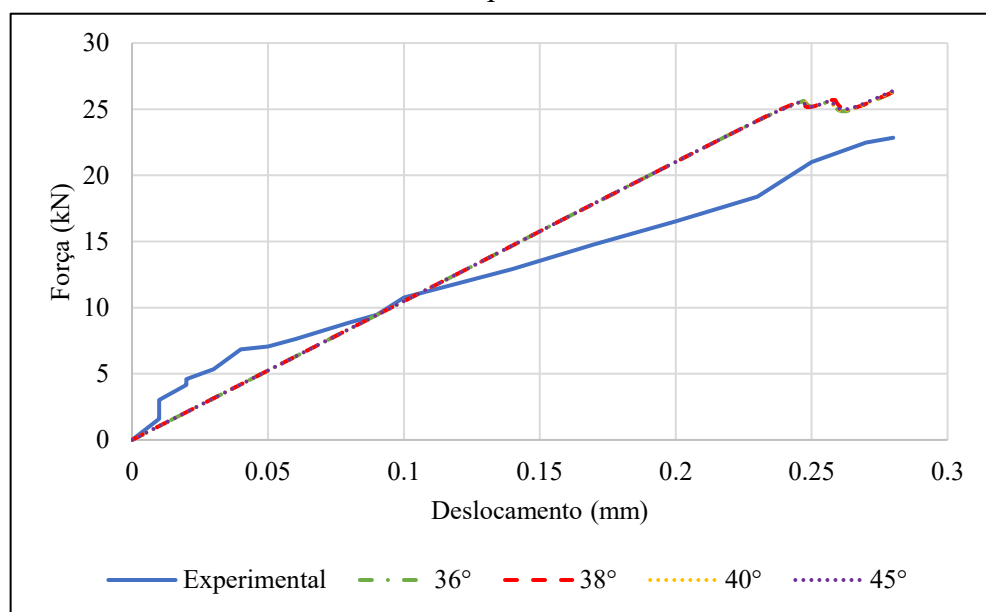
Para o ângulo de dilatância foram usados os valores de 6200 MPa, 6290 MPa, 6400 MPa e 6800 MPa. Com os valores aplicados percebeu-se uma variação considerável na inclinação da fase elástica, como é mostrado no Gráfico 4. Como o valor 6200 MPa se adequou melhor a curva experimental ele foi usado para identificar a variação dos demais parâmetros.

Gráfico 4 - Influência do Módulo de Elasticidade na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.



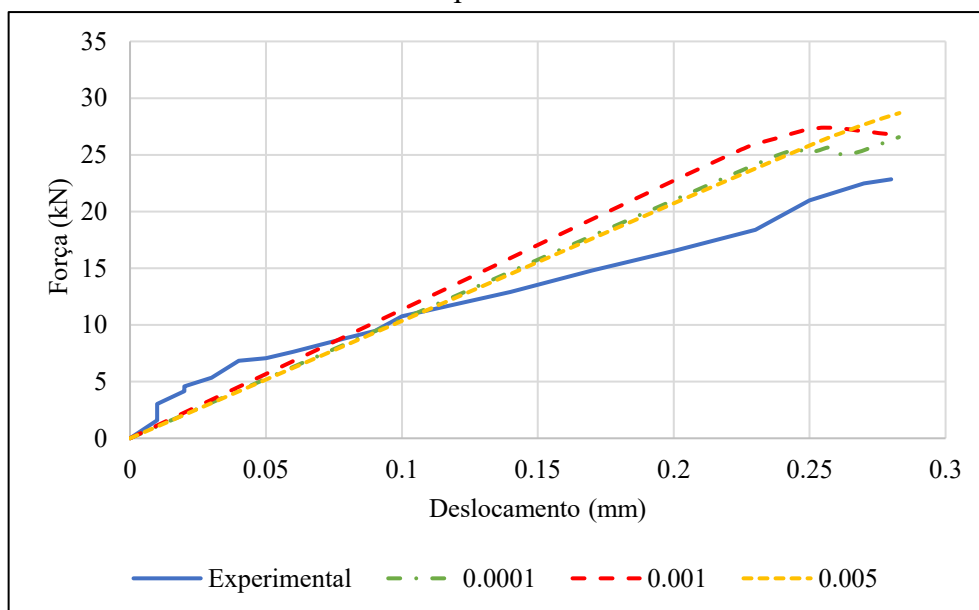
Foram adotados os valores do ângulo entre 36° e 45° , de forma que fosse identificado o melhor ângulo para representar o modelo. Por meio do Gráfico 5, é possível notar que o ângulo de dilatação não provocou grandes mudanças, apesar disso, devido a pequena variação o ângulo 38° foi o que mais se adequou ao ensaio experimental.

Gráfico 5 - Influência do ângulo de dilatação na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.



A influência da viscosidade é analisada no Gráfico 6, as variações foram testadas com valores de $\mu = 0,0001$, $\mu = 0,001$ e $\mu = 0,005$. A partir dos resultados expressos no gráfico é possível identificar que a viscosidade $\mu = 0,0001$ foi a que mais se aproximou da curva experimental base, mostrando convergência satisfatória.

Gráfico 6 - Influência da viscosidade na curva força-deslocamento à tração na flexão de 4 pontos.



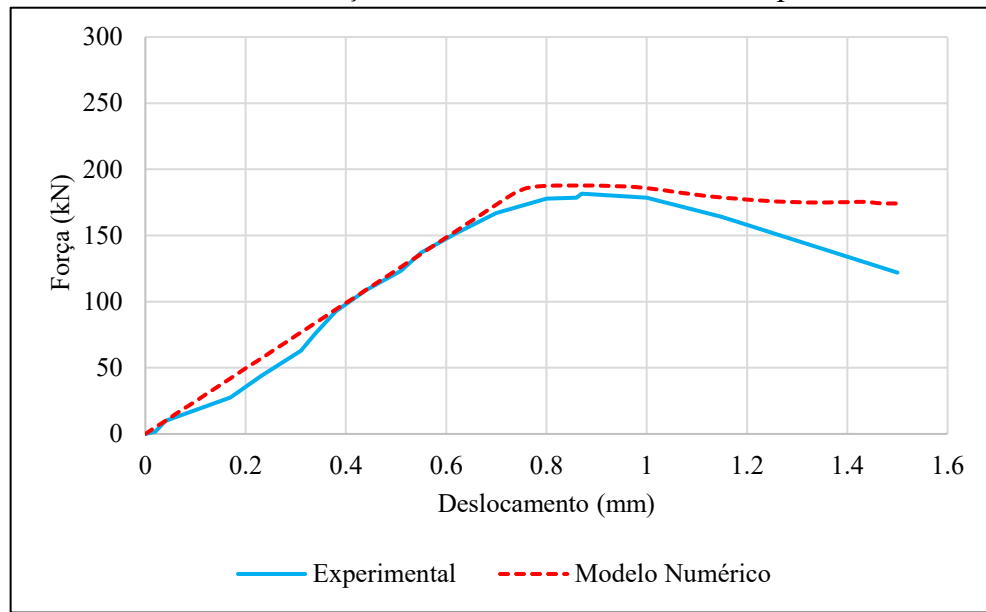
Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Validação dos modelos constitutivos

4.2.1 Compressão axial

As curvas experimental e numérica de força-deslocamento são apresentadas no Gráfico 7. Realizando uma média da resistência compressão das duas curvas é possível verificar que a modelagem numérica conseguiu representar de forma satisfatória os ensaios experimentais a compressão axial. A resistência à compressão axial do ensaio experimental apresentou valor de 181,61 MPa, já a resistência a compressão axial do modelo numérico chegou ao valor de 187,76 MPa, apresentando um erro de 3,4%. Ou seja, de modo geral o modelo está ajustado adequadamente, não convergindo somente após a ruptura, pois não apresenta um patamar de amolecimento significativo após o deslocamento de 1 mm, chegando somente ao valor de 174 MPa, onde a resposta do ensaio experimental alcançou o valor de resistência de 122 MPa.

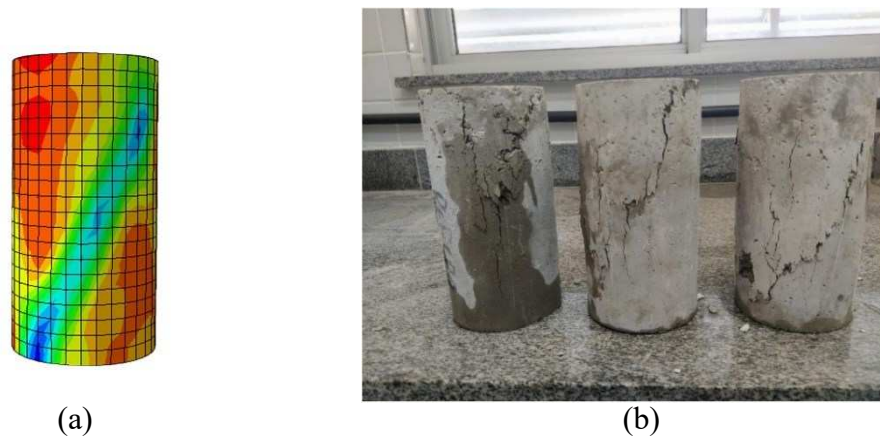
Gráfico 7 - Curvas força-deslocamento do ensaio à compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

Por meio do modelo CDP o ambiente ABAQUS possibilita a verificação do padrão de fissuração na peça e assim mostra o modo de falha do concreto. Esses dados são possíveis uma vez que a ferramenta possui um parâmetro de dano, que indica a degradação do material ao longo de cada nível de tensão-degradação. Esse resultado está ilustrado na Figura 25, a imagem (a) traz o padrão das trincas na ruptura no modelo da simulação numérica, que se assemelhando as trincas que surgem quando o corpo de prova é submetido ao ensaio experimental representado na imagem (b), ambas características de esforços compressivos.

Figura 25 - Modo de falha por compressão: (a) trinca de cisalhamento, (b) corpo de prova rompido.

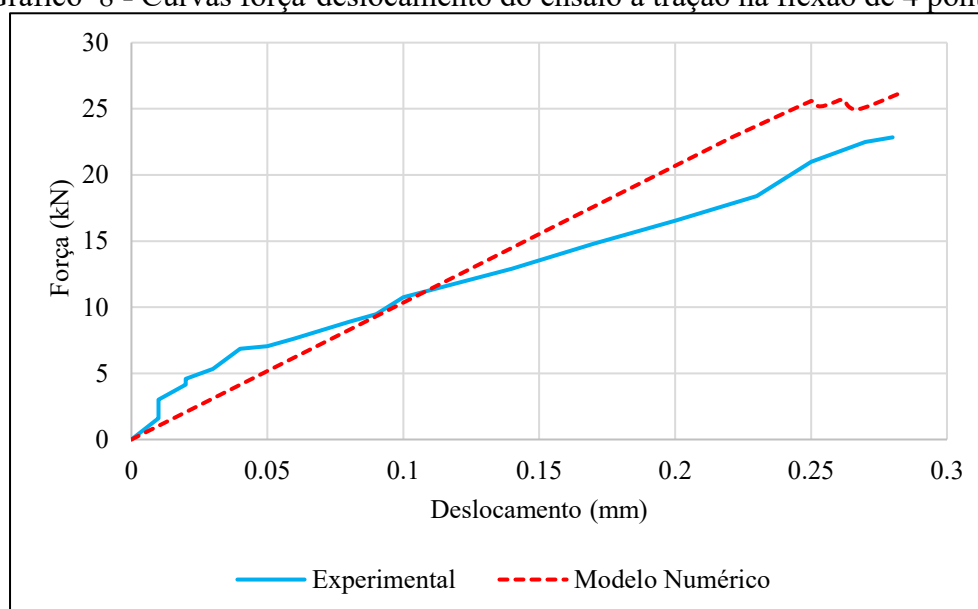


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Tração na flexão

Por meio dos parâmetros calibrados foi realizada a avaliação geral do modelo numérico, para de analisar a eficiência do modelo ao representar o ensaio de tração na flexão de 4 pontos. O Gráfico 8, traz o modelo numérico e o experimental, se mostrando eficiente na sua reprodução. No ensaio experimental a ruptura ocorreu com valor de resistência de 22,84 MPa, já o modelo numérico a ruptura ocorreu em uma resistência de 26,6 MPa, apresentando um erro entre os modelos de 16,5%. Sendo assim, o modelo numérico conseguiu de maneira significativa reproduzir o ensaio experimental.

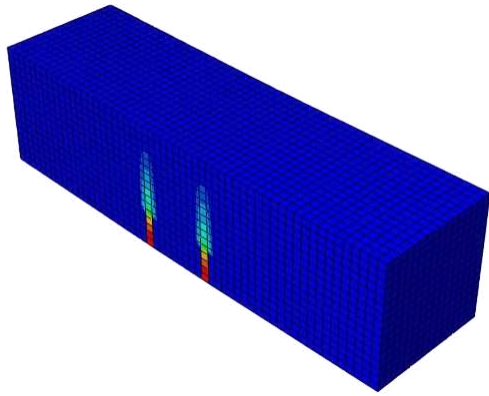
Gráfico 8 - Curvas força-deslocamento do ensaio à tração na flexão de 4 pontos.



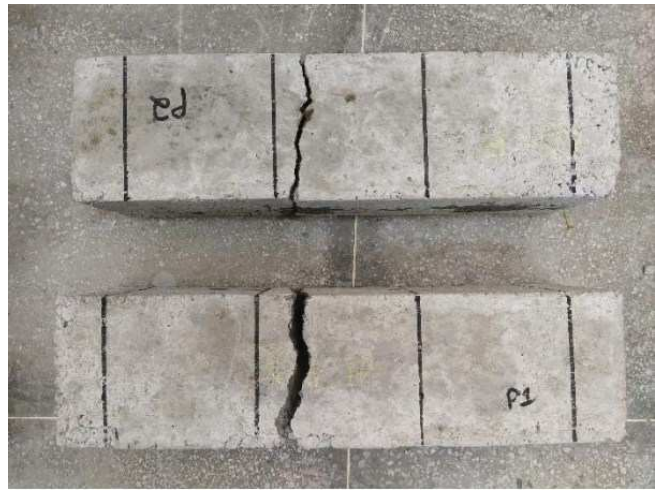
Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 26, apresenta o modo de ruptura do ensaio de flexão de 4 pontos, pode ser visto na Figura 26(a) que a ruptura ocorreu no terço médio, assim como no ensaio experimental visto na Figura 26(b), mostrando a consistência da resposta numérica.

Figura 26 - Modo de ruptura à tração por flexão de 4 pontos: (a) resposta numérica e (b) amostra experimental.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentada a aplicação do Método dos Elementos Finitos para ensaio de resistência à compressão axial e tração na flexão do concreto utilizando o modelo construtivo CDP na interface ABAQUS. Buscou-se verificar os resultados encontrados anteriormente nos ensaios experimentais realizados por Costa (2023), mostrando a capacidade de reproduzir esses ensaios por meio de ferramentas numéricas. Os parâmetros foram avaliados utilizando como base na curva força – deslocamento.

Avaliou-se a influência dos parâmetros do CDP em cada um dos modelos desenvolvidos, ajustados separadamente a fim de se aproximar aos dados do ensaio experimental. O parâmetro f_{b0}/f_{c0} não apresentou mudança significativa. Os dados disponíveis dos ensaios experimentais foram somente a força e deslocamento, necessitando da adoção e estimativa de parâmetros mais específicos do material. A utilização do método numérico de Guo (2014) contribuiu para uma melhor aproximação dos resultados, se mostrando uma opção considerável na aplicação da construção do modelo numérico.

Na reprodução do ensaio à compressão axial percebeu-se que o módulo de elasticidade influenciou consideravelmente a elasticidade do modelo. Além disso, outro parâmetro que influenciou de forma considerável foi a viscosidade aplicada, apresentando uma variação significativa. Após a calibração dos parâmetros, a curva força – deslocamento do ensaio à compressão axial apresentou uma variação na etapa plástica do material, onde o modelo numérico não apresentou amolecimento depois da deformação em 1 mm como era previsto baseando-se no ensaio experimental. A curva força – deslocamento à compressão axial experimental comparada a numérica apresentou um erro de 3,4%, sendo assim, o modelo numérico foi considerado satisfatório.

Assim como no modelo de compressão axial, o de tração na flexão de 4 pontos também sofreu influência considerável do módulo de elasticidade e viscosidade, já os outros parâmetros plásticos não foram identificados influência significativa sobre o comportamento do modelo. A curva força – deslocamento à tração na flexão experimental comparada a numérica apresentou um erro de 16,5%, sendo assim, o modelo numérico consegue representar o ensaio experimental. Já no modo de ruptura apresentou padrão encontrado no ensaio experimental, ocorrido no terço médio do modelo.

Diante do exposto, é notável a resposta da análise em elementos finitos, o CDP mesmo com a adoção subjetiva de dados para a elaboração do modelo, conseguiu reproduzir o

comportamento real do ensaio à compressão axial e ensaio à tração na flexão de forma significativa.

Para trabalhos futuros na área da modelagem numérica, sugere-se que se utilize um conjunto de dados mais amplos, a fim empregar no software o máximo de dados possíveis, considerando comportamentos mais reais. Por exemplo, recomenda-se obter experimentalmente o dado de deformação no ensaio de tração na flexão, onde para esse trabalho foi utilizado a lei de Hooke, considerando o material elástico perfeito, esse tipo de interação contribui para a divergência dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL. Providence, RI, USA. Dassault Systems Simulia Corp, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 29. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2018.
- ARAÚJO, I. N. de. **Modelagem Elastoplástica de Colunas de Concreto Confinadas por Polímeros Reforçados com Fibra**. Orientador: Severiano Pereira Cavalcanti. 2017. 149 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/2419>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- BABUŠKA, Ivo; BANERJEE, Uday; OSBORN, John E. Generalized finite element methods—main ideas, results and perspective. **International Journal of Computational Methods**, v. 1, n. 01, p. 67-103, 2004.
- BARRIOS, S. K. M. **Guia Prático de Uso: Abaqus CAE**. Foz do Iguaçu: Edunila, 2022.
- BRACKMANN, G. D. *et al.* Calibração dos parâmetros do modelo de plasticidade do dano no programa ABAQUS para análise em elementos finitos de lajes lisas protendidas. **XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, [s. l.], p. 1-10, 11 jun. 2021.
- BEER, F. P. **Mecânica dos materiais**. Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786558040095. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786558040095/>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- BIAGI, F. D.; VENTURA, B. P. J. **Análise de Erros de Discretização em Problemas Unidimensionais de Vibrações Livres Utilizando o Método dos Elementos Finitos**, 2023.
- BORGES, L. R. P. **Simulação numérica de corpos de prova confinados constituídos de concreto de agregado reciclado**. 2022. 56 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.
- CANDIAN, A. L. **Metodologia para Avaliação de Estruturas de Concreto Armado Degradadas Utilizando Ensaio Dinâmico**. 2017. 144 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

COSTA, L. D. M. **Análise da Utilização de Fibras poliméricas em estruturas De Concreto**. 2023. 79 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas - RN, 2023.

CHAVES, R. J. S. **Análise numérica da contribuição da chave de cisalhamento em ligações pilar-viga com consolo e utilizando almofada elastomérica no apoio da viga**. 2021. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 171p.

CHEN, W. F.; HAN, D. J. **Plasticity for Structural Engineers**. New York: Springer-Verlag. 1988. 606 p.

DA CUNHA MASTELA, L. *et al.* Aplicação do método dos elementos finitos (MEF) em madeira lamelada colada cruzada (CLT). **Seven Editora**, 2023.

DE MORAIS, J. M. P. *et al.* Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e759974964-e759974964, 2020.

DE MESQUITA ROEHL, D. **Análise termomecânica do dano em materiais quase-frágeis**. 2021. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

DIAS, M. de S. F.; KARAM, V. J. Análise térmica de seções transversais de vigas mistas de aço e concreto submetidas a situação de incêndio. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, p. e14509, 2021.

GASPARETTO, A.; DA COSTA PANTOJA, J.; RAMIRES, F. B. Metodologia para inspeção e avaliação da segurança e durabilidade de estruturas de concreto armado. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 4942-4960, 2021.

GUO, Z. Principles of reinforced concrete. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-800859-1.

JANKWOIAK, T.; LODYGOWSKI, T. **Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model**. Foundations of Civil and Environmental Engineering, Poznan, v. 6, p.53-69, 2005.

LUU, X.-B.; KIM, S.-K.; KIM, W. Investigation of Load–Displacement Characteristics and Crack Behavior of RC Beam Based on Nonlinear Finite Element Analysis Using Concrete Damage Plasticity. *Appl. Sci.* 2023, 13, 11798. <https://doi.org/10.3390/app132111798>.

MADENCI, e.; GUVEN, i. The finite element method and applications in engineering using ansys®. Springer, 2015.

MATOS, C. C. D. **Análise numérica de vigas em concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. 2021.

MEDEIROS, W. A. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante**. 2018. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 164p.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 31 mar. 2024.

MENON, N. V.; RISSON, A. V.; ARCINE, M. F. **Sistema de ancoragem por cordão de fibras de carbono em vigas reforçadas à flexão com PRFC -estudo experimental**. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 4303–4308, 2020.

MIRANDA, C. M. **Abordagem conceitual da evolução da degradação mecânica induzida pelo método sublevel caving**. 2022.

MONTEIRO, Renan Araujo. **Estratégias de Modelagem Numérica de Vigas Mistas Via ABAQUS**. 2021. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Deca, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

NONATO, R. B. P. **Capacidade de flexão elástica versus plástica de vigas Timoshenko-Ehrenfest**. 2024.

NUNES, S. L. S.; ARAÚJO, T. D. P. de. **Discussão sobre as metodologias de modelagem de pilares de concreto armado revestidos com PRFC e solicitados por carga excêntrica**. 2020.

ONUKI, M. A. F.; GASPARETTO, P. A. **Comparativo das Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido com Adição de Fibras de Aço e Polipropileno**. 2013.

PARIZOTTO, L. **Concreto armado**. Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788595020917. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020917/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

PENIDO, Rúben El-Katib. **Aprendizado de máquina aplicado à construção civil: estimativa da resistência à compressão de concretos de escória de aciaria**. 2022.

PIMENTEL, T. M. **Análise comparativa do aumento de resistência à tração em concreto reforçado com fibra de vidro**. 2020.

PITUBA, J. J. C., 1998. **Estudo e aplicação de modelos constitutivos para o concreto fundamentados na mecânica do dano contínuo**. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

SANTOS, M. de S. **Modelagem numérica de pilares curtos de concreto confinados com PRFC solicitados por força de compressão concêntrica e excêntrica**. Orientador: Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo. 2022. 118 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, R. C. dos S. **Análise tridimensional multifísica da difusão de cloretos em estruturas de concreto armado: uma abordagem pelo método dos elementos finitos**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Apostila da Universidade Federal do Pará do Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Civil-Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada a Engenharia. Belém, Maio, 2003.