

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRAZIELLE GOMES BARBANTE

**ESTUDO DA FLEXÃO EM UHPC VISANDO SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA
OS DESAFIOS DA INFRAESTRUTURA URBANA**

CAMPINAS

2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA

GRAZIELLE GOMES BARBANTE

ESTUDO DA FLEXÃO EM UHPC VISANDO SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA
OS DESAFIOS DA INFRAESTRUTURA URBANA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana

Orientadora: Profa. Dra. Ana Elisabete P. G. A. Jacintho

Co-Orientadora: Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti

CAMPINAS

2025

GRAZIELLE GOMES BARBANTE

**ESTUDO DA FLEXÃO EM UHPC VISANDO SOLUÇÕES
ESTRUTURAIS PARA OS DESAFIOS DA INFRAESTRUTURA
URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Ana Elisabete Paganelli G. de Ávila Jacintho

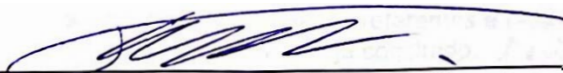
Dissertação defendida e aprovada em 26 de junho de 2025 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli G. de Ávila Jacintho
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Thomáz Eduardo Teixeira Buttignol
UNICAMP - FEC

Dedico este trabalho aos meus pais,

Emerson e Edilene.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B228	<p>Barbante, Grazielle</p> <p>Estudo Da Flexão Em Uhpc Visando Soluções Estruturais Para Os Desafios Da Infraestrutura Urbana / Grazielle Barbante. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.</p> <p>118 f.il.</p> <p>Orientador: Ana Elisabete Jacintho. Coorientador: Nádia Forti</p> <p>Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025. Inclui bibliografia.</p> <p>1. UHPC. 2. Resistência à Compressão. 3. Resistência à Tração. I. Jacintho, Ana Elisabete. II. Forti, Nádia III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.</p>
------	---

RESUMO

O UHPC é um material de elevada resistência, superando os 130 MPa de resistência à compressão, mas que carece de normalização nacional para seu uso em projetos estruturais no Brasil. Esta pesquisa propõe que, a partir de resultados experimentais de caracterização mecânica de um UHPC, é possível modelar numericamente vigas armadas e não armadas para analisar seu comportamento à flexão, visando subsidiar uma futura norma brasileira. A metodologia envolveu a utilização de dados experimentais de um traço de UHPC, que incluiu cimento, areia, pó de quartzo, sílica, e aditivo, além de fibras de aço e PVA. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à flexão em ensaio de 4 pontos e 3 pontos com controle de abertura de fissura. Esses dados foram empregados na calibração do modelo numérico no software ABAQUS, utilizando o modelo Concrete Damage Plasticity (CDP). Foi realizado um estudo paramétrico de um prisma para calibração do modelo e, posteriormente, essa calibragem foi utilizada na modelagem de vigas em UHPC com e sem armadura passiva. Os resultados para as vigas armadas demonstraram um comportamento numérico muito semelhante ao experimental disponível na literatura científica. A simulação das vigas sem armadura também forneceu dados importantes para a compreensão de seu desempenho. A comparação entre as configurações armada e não armada evidenciou que a presença da armadura passiva contribui significativamente para o aumento da capacidade de carga última e para a melhoria da ductilidade do elemento estrutural. Conclui-se que a modelagem numérica, embasada em dados experimentais e em diretrizes internacionais, é uma ferramenta viável e eficaz para prever o comportamento de vigas em UHPC sob flexão.

Palavras-chave: UHPC, Flexão, Resistência a Compressão, Resistência a Tração, Vigas

ABSTRACT

UHPC is a high-strength material, exceeding 130 MPa of compressive strength, but it lacks national standardization for its use in structural projects in Brazil. This research proposes that, based on experimental results of mechanical characterization of UHPC, it is possible to numerically model reinforced and non-reinforced beams to analyze their bending behavior, with the goal of supporting the development of a future Brazilian standard. The methodology involved the use of experimental data from a UHPC mix, which included cement, sand, quartz powder, silica, and additives, in addition to steel and PVA fibers. Axial compressive strength tests, elasticity modulus, and flexural strength tests (four-point and three-point bending with crack opening control) were conducted. These data were used to calibrate the numerical model in the ABAQUS software, using the Concrete Damage Plasticity (CDP) model. A parametric study of a prism was performed for model calibration, and this calibration was later used in the modeling of UHPC beams with and without passive reinforcement. The results for the reinforced beams showed a numerical behavior very similar to the experimental data available in the scientific literature. The simulation of the non-reinforced beams also provided important data for understanding their performance. The comparison between the reinforced and non-reinforced configurations highlighted that the presence of passive reinforcement significantly contributes to the increase in ultimate load capacity and to the improvement of the structural element's ductility. It is concluded that numerical modeling, based on experimental data and international guidelines, is a viable and effective tool for predicting the bending behavior of UHPC beams.

Keywords: UHPC, Flexure, Compressive Strength, Tensile Strength, Beams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ponte Pulaski Skyway, conectando Jersey City e Newark, em Nova Jersey, EUA.....	14
Figura 2: Etapas da revisão de literatura	20
Figura 3: Distribuição temporal dos últimos 5 anos dos documentos selecionados	23
Figura 4. Viadutos Chillan.	37
Figura 5. Ponte Suspensa de Honghe.	37
Figura 6. Banco Central do Iraque.	38
Figura 7. Torre Zeena.....	38
Figura 8. Escritório Nacional de Aeroportos de Marrocos.	38
Figura 9. Casa Japão, em São Paulo.	38
Figura 10: Representação da relação tensão-deformação do UHPC na compressão para projetos	41
Figura 11: Definição do f_{ctf} em pico máximo	45
Figura 12: Definição do f_{ctf} em que não há pico máximo da curva	45
Figura 13: Ensaio de três pontos.	53
Figura 14: Ensaio de resistência a tração.....	54
Figura 15: Ensaio de resistência a tração	55
Figura 16: – Curvas experimentais e curva média obtidas no ensaio de flexão à 4 pontos dos prismas	56
Figura 17: – Modelo de rigidez à flexão (<i>Tension Stiffening Effect</i>)	58
Figura 18: – Concreto com fissuras frágeis.....	59
Figura 19: Modelo Drucker-Prager.....	60
Figura 20: Tensões de compressão uniaxial e biaxial.	62
Figura 21: $K=2/3$ correspondendo à formulação de Rankine e $K=1$ correspondendo ao critério de Drucker-Prager	62
Figura 22: Ângulo de dilatação e excentricidade a partir do plano meridiano.	64
Figura 23: Modelo de tração do concreto.....	65
Figura 24: Resposta do concreto à carga uniaxial em compressão.....	66
Figura 25: Diagrama de deformações admissíveis no Estado Limite Último para UHPC não armados.	69

Figura 26: Diagrama de deformações admissíveis no Estado Limite Último para UHPC armado e/ou protendido	70
Figura 27: Geometria, dimensões e detalhamento das vigas (Oliveira, 2019)	72
Figura 28: Modelagem da armação de reforço.	75
Figura 29: Condições de contorno e aplicação de carga na viga modelada. .	75
Figura 30: Deslocamento por Hordjik (1991).	81
Figura 31: Compressão por Carreira (1985)	81
Figura 32: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa1	82
Figura 33: Compressão pela NF P18 710.....	83
Figura 34: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 2.	84
Figura 35: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 3.	85
Figura 36: Compressão pela NF P18 710 - Seção 3.7.1	86
Figura 37: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 4.	87
Figura 38: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 5.	88
Figura 39: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 6.	89
Figura 40: Análise Inversa.....	90
Figura 41: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 7.	91
Figura 42: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 8.	92
Figura 43: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 9.	93
Figura 44: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 10.	94
Figura 45: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 11.....	95
Figura 46: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 12.	96
Figura 47: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 12.	97
Figura 48: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 13.	99
Figura 49: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 14.	100
Figura 50: Força x Deslocamento	102
Figura 51: Início do escoamento da armação	103
Figura 52: Final do escoamento da armação	104
Figura 53: Curva Força x Deslocamento Vertical no Meio do Vão para Viga de UHPC Sem Armadura	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Questões e Diretrizes da Revisão Sistemática.....	17
Tabela 2: Características da Revisão Sistemática – Preenchimento do Protocolo.....	18
Tabela 3: Extração de dados.....	19
Tabela 4: Revisão sistemática com resultados	22
Tabela 5. Valores indicativos para característica do UHPC.....	26
Tabela 6. Traços de UHPC e seus materiais constituintes mais comuns.	28
Tabela 7. Algumas normas e instruções técnicas sobre o UHPC.....	30
Tabela 8. Coeficientes para o UHPC.....	39
Tabela 9. Tabela de Classificação das Classes T1, T2 e T3	44
Tabela 10 – Medidas reais dos corpos de prova prismáticos do ensaio de flexão com 3 pontos.....	56
Tabela 11. Parâmetros do modelo CDP utilizado.	67
Tabela 12: Características das armaduras de aço utilizadas nas vigas (Oliveira, 2019).....	72
Tabela 13. Parâmetros tentativa 1.....	80
Tabela 14. Parâmetros tentativa 2.....	83
Tabela 15. Parâmetros tentativa 3.....	85
Tabela 16. Parâmetros tentativa 4.....	86
Tabela 17. Parâmetros tentativa 5.....	88
Tabela 18. Parâmetros tentativa 6.....	89
Tabela 19. Parâmetros tentativa 7.....	90
Tabela 20. Parâmetros tentativa 8.....	92
Tabela 21. Parâmetros tentativa 9.....	93
Tabela 22. Parâmetros tentativa 10.....	94
Tabela 23. Parâmetros tentativa 11.....	95
Tabela 24. Parâmetros tentativa 12.....	96
Tabela 25. Parâmetros tentativa 13.....	97
Tabela 26. Parâmetros tentativa 14.....	98
Tabela 27. Parâmetros tentativa 15.....	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	17
2.1 Desenvolvimento	17
2.1.1 Planejamento	17
2.1.2 Execução	19
2.1.3 Sumarização	19
2.2 Resultados	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Resistência do UHPC.....	24
3.2 Constituição do UHPC	27
3.3 Materiais Incorporados Na Composição Do UHPC.....	29
3.3.2 – Areia	29
3.3.3 – Nanomateriais	29
3.4 Normalização	30
3.5 Importância Das Fibras No UHPC.....	31
3.6 Aplicação Do UHPC Em Estruturas Existentes	33
3.6.1. Reforço Viaduto Chillon.....	34
3.6.2. Ponte Suspensa de Honghe	35
3.6.3. Edifício do Banco Central do Iraque.....	36
3.6.4. Torre Zeena	36
3.6.5. Escritório Nacional de Aeroportos de Marrocos.	36
3.6.6. Casa Japão – São Paulo.....	37
3.7 Características Mecânicas	38
3.7.1 Compressão.....	39

3.7.2 Tração	42
3.8 Resumo do Panorama das pesquisas de elementos estruturais em UHPC sob flexão	46
3.9 Métodos dos Elementos Finitos (MEF)	47
3.10 Métodos Numéricos para Análise do Comportamento Não Linear ...	50
4. METODOLOGIA	52
4.1 Trabalho Experimental de Apoio para Análise Numérica.....	52
4.2 Descrição da Análise Numérica.....	55
4.3 ABAQUS	57
4.3.1 Análise Numérica do Concreto	58
4.3.2 <i>Concrete Damage Plasticity</i> (CDP)	59
4.3.3 Comportamento Não Linear à Tração	64
4.3.4 Comportamento Não Linear à Compressão	65
4.3.5 Análise de Fissuração no Concreto.....	66
4.4 Dados Experimentais Incorporados na Análise Numérica.....	67
4.5 Verificação da Flexão em Vigas de UHPC	67
4.5.1 Modelagem Numérica das Vigas.....	73
4.6 Simulação do Comportamento Uniaxial na Compressão	76
4.7 Simulação do Comportamento Uniaxial na Tração	77
5. RESULTADOS	78
5.1 – Análise Paramétrica Do Prisma.....	78
5.2 – Análise De Vigas De UHPC Submetidas À Flexão.....	100
5.2.1 – Vigas Com Armadura	100
6. CONCLUSÕES	107
7. BIBLIOGRAFIA	110

1. INTRODUÇÃO

O Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete – UHPC na Europa e simplesmente UHPC nos EUA e Brasil) se destaca por uma elevada concentração de cimento, excedendo os 600 kg/m³ e dosado por empacotamento de partículas e com relação água/cimento muito baixa (Buttignol, et al., 2017).

Inicialmente, reconhecido como uma mistura de pós reativos, o UHPC foi desenvolvido por Richard e Cheyrezy (1995), com o objetivo de produzir concretos extremamente resistentes e flexíveis, alcançando resistências que variam entre 200 MPa e 800 MPa, e uma energia de fratura de até 40 KJ/mm².

Isso exigiu a definição de princípios fundamentais, incluindo a eliminação de agregados graúdos, limitando o tamanho do agregado miúdo (com tamanho máximo de 600 µm), aumento da densidade por meio da otimização da mistura granular e aplicação de pressão antes e durante o processo de endurecimento, melhoria da microestrutura por meio de tratamento térmico, aumento da ductilidade com a incorporação de fibras de aço de pequenas dimensões (13 mm de comprimento e 0,15 mm de diâmetro), e a manutenção dos procedimentos de mistura e moldagem próximos à prática existente.

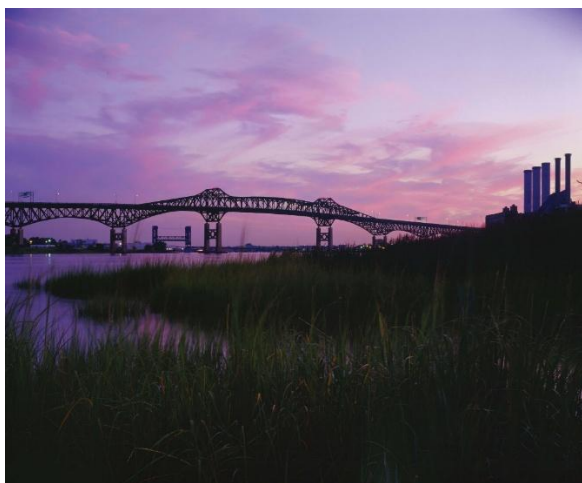
O UHPC demonstra um potencial significativo em diversas aplicações na construção civil, incluindo ligações estruturais, reparos, retrofits e suporte para cargas elevadas. Seu uso na modernização e reparo de elementos estruturais, como lajes, vigas e pilares, tem mostrado eficácia ao melhorar o desempenho estrutural e simplificar projetos ao reduzir a necessidade de armaduras de aço (Hung, et al., 2021).

O UHPC, patenteado como Ductal pela Lafarge-Holcim na França, é um material que oferece propriedades mecânicas superiores, incluindo resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade. Sua relevância é destacada em projetos de grande porte, como a reabilitação da Ponte Pulaski Skyway nos Estados Unidos, ilustrando o potencial do UHPC na preservação e reforço de estruturas existentes (Graybeal, 2008).

Como exemplo a Ponte Pulaski Skyway, vista na Figura 1, conhecida por ser destaque na série "The Sopranos", é uma estrutura icônica de quatro pistas que

conecta Jersey City e Newark, em Nova Jersey. Com mais de 5,5 km de extensão, a ponte, construída na década de 1930, passou por uma reabilitação significativa, a maior de sua história. Foi utilizado o material Ductal ao longo da ponte de 5,5 km, do aeroporto de Newark a cidade de Nova Jersey. Essa reabilitação é de extrema importância nos Estados Unidos, considerando que mais de 70.000 pontes são consideradas estruturalmente obsoletas (Ductal, 2023).

Figura 1. Ponte Pulaski Skyway, conectando Jersey City e Newark, em Nova Jersey, EUA.



Fonte: DUCTAL (2023).

Embora pesquisas experimentais tenham indicado melhorias substanciais nas propriedades mecânicas do concreto e do aço sob cargas dinâmicas, o comportamento do UHPC permanece pouco explorado.

A norma francesa recomenda valores específicos para resistência à compressão e tração em UHPC, bem como a possibilidade de dimensionamento de elementos em flexão sem armadura, com base na deformação de compressão associada à resistência à tração (NF P 18-710 (AFNOR, 2016)).

Busca-se compreender como o UHPC, por meio de sua composição e características avançadas, pode revolucionar a abordagem da construção civil em direção a estruturas mais robustas, eficientes e sustentáveis, pois a demanda por essas estruturas está cada vez mais evidente. Além disso, é importante ressaltar a

importância dessas inovações para o desenvolvimento sustentável e a redução dos custos de manutenção a longo prazo.

Esta pesquisa sugere que, com base em resultados experimentais das propriedades mecânicas do UHPC, é possível modelar numericamente vigas, sejam elas armadas ou não, para investigar seu comportamento sob flexão, utilizando modelos constitutivos normalizados e da literatura científica, para o comportamento do UHPC à tração e à compressão. Isso possibilita uma comparação com estudos analíticos dessas vigas, que podem influenciar o desenvolvimento futuro de normas brasileiras específicas para elementos estruturais em UHPC.

1.1 Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi o de analisar vigas de UHPC submetidas a esforços de flexão, com uma modelagem em elementos finitos, tendo as vigas reforço de armadura de aço ou não, utilizando a caracterização mecânica experimental do UHPC.

Para a modelagem em elementos finitos dessas vigas foi utilizado o programa ABAQUS, a partir dos resultados experimentais obtidos em Jacintho et al. (2024) e Santos (2023). que caracterizou um UHPC com fibras de aço e PVA, à compressão e à tração na flexão.

A modelagem das vigas terá como referência a pesquisa de Oliveira, 2019.

1.1.1 - Objetivos Específicos

- Testar os parâmetros experimentais de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração, no modelo CDP do programa ABAQUS para modelar um prisma de 10 cm x 10 cm x 40 cm submetido à flexão, que foi usado como corpo de prova nos ensaios experimentais físicos de resistência à flexão do UHPC e comparar a curva experimental com a curva numérica;
- Modelar uma viga de UHPC submetida à flexão, sem armadura e com armadura, em elementos finitos no programa ABAQUS tendo como referência a pesquisa de Oliveira, 2019;

- Modelar as mesmas vigas de Oliveira, 2019 submetidas à flexão mas com os parâmetros de resistência mecânica do UHPC obtidos experimentalmente em Santos (2023) e Jacintho et al. (2024).

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Para desenvolver o estado da arte sobre vigas de Ultra-High Performance Concrete (UHPC), realizamos uma revisão sistemática da literatura. O software Start, desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), foi utilizado para estruturar e gerenciar todo o processo de revisão. Dentro do software, elaboramos um protocolo específico para a revisão. As etapas principais deste processo incluíram o planejamento, a execução e a síntese dos dados coletados, garantindo uma compreensão abrangente e atualizada do tema.

2.1 Desenvolvimento

2.1.1 Planejamento

Para o planejamento da revisão sistemática sobre vigas de Ultra-High Performance Concrete (UHPC), estabelecemos as variáveis fundamentais que compõem nosso protocolo de pesquisa. Essas variáveis foram definidas para guiar o processo de revisão de maneira eficiente e direcionada. A Tabela 1 apresenta as questões-chave que orientam nossa investigação.

Tabela 1: Questões e Diretrizes da Revisão Sistemática

Questão Principal	Qual o comportamento das vigas de UHPC sob condições de flexão?
Documentos	Artigos que analisam vigas de UHPC em testes de flexão com análise numérica.
Avaliação	Qual foi o impacto do UHPC no desempenho estrutural das vigas?
Resultado	Quais foram os resultados a tração e compressão da viga em flexão?
Aplicação	Identificar lacunas no conhecimento sobre o uso de UHPC em vigas estruturais.

Fonte: Autoria Própria, 2025

Primeiramente, combinamos as palavras-chave identificadas para maximizar a eficácia das nossas buscas, utilizando critérios claros de inclusão e exclusão conforme definidos na Tabela 2, que apresenta as principais características das buscas. Em

seguida, realizamos as buscas nas bases de dados selecionadas, sendo essas, Google Acadêmico, Science Direct e Scopus. Durante a análise, lemos o título, resumo e palavras-chave dos estudos recuperados para classificá-los como incluídos ou excluídos, aplicando os critérios definidos. Um estudo é incluído se satisfizer pelo menos um critério de inclusão e excluído se atender a qualquer critério de exclusão. Caso um estudo atenda tanto a um critério de inclusão quanto a um de exclusão, ele é excluído. Após essa etapa, exportamos os metadados dos estudos identificados nos formatos BibTex, RIS ou Medline, que foram carregados na ferramenta StArt para facilitar a organização e análise subsequente.

Tabela 2: Características da Revisão Sistemática – Preenchimento do Protocolo.

Palavras-chaves e sinonimos para base de dados Start.	Compressive Strength, Compressão, Flexure, Flexão, Tensile Strength, Tração, UHPC, Viga, Beam e ABAQUS.
Bases de busca	Google Academic, Science Direct e Scopus.
Pesquisa na base Google Acadêmico	Abaqus Uhpc Beams -Shear -Fire
Pesquisa na base Science Direct	Uhpc AND Beams AND ABAQUS NOT fire NOT shear
Pesquisa na base Scopus	(TITLE-ABS-KEY (uhpc) E TITLE-ABS-KEY (beams) E TITLE-ABS-KEY (abaqus) E NÃO TITLE-ABS-KEY (fire) E NÃO TITLE-ABS-KEY (shear))
Critérios de seleção das bases	Compatíveis com o software Start Exportem arquivos no formato BibTex Encontrem artigos relacionados a engenharia civil
Idioma	Inglês e Português.
Período	Artigos de 2017 em diante.
Critérios de inclusão	Qualquer uma das palavras contidas no resumo que incluíssem e esses critérios: Vigas de UHPC, ABAQUS, Compressão na flexão, Tração na flexão e CDP.
Critérios de exclusão	Foram excluídos textos que, em seus resumos, continham as palavras: cisalhamento, fogo e deflexão. Além disso, foram excluídos artigos que não se alinharam ao foco da pesquisa, como aqueles que discutem o uso de UHPC reforçado com barras de GFRP, substituição de fibras metálicas por outras fibras, ou a aplicação de UHPC para reforçar concreto convencional. Estudos que não envolveram análises numéricas ou testes de vigas de UHPC em flexão também foram excluídos, e enquadrados no critério “não se aplica”.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

2.1.2 Execução

Nesta fase, ao invés de continuar com buscas em cada base de dados isoladamente, reunimos todos os artigos identificados e os importamos para o software Start. Esse software remove automaticamente os artigos duplicados. Inicialmente, foi analisado cada artigo, relendo os títulos, resumos e palavras-chave. Documentos que não estavam alinhados com a proposta desta pesquisa foram descartados. Apenas aqueles que cumpriam todos os critérios de inclusão foram aceitos, enquanto qualquer documento que atendesse a algum critério de exclusão era eliminado.

A seleção segue com uma análise completa de cada artigo. Se aceito, o documento avança para a etapa de sumarização. No software Start, é atribuído uma pontuação com base nas palavras-chave da revisão definidos na etapa de planejamento, que aparecem no título, resumo ou palavras-chave dos documentos. Isso ajuda a determinar a relevância do artigo em que pontuações mais altas indicam maior alinhamento com o tema da pesquisa.

2.1.3 Sumarização

Nesta etapa de sumarização, avaliou-se cada documento para destacar e extrair as informações que mais agrega informações para a pesquisa. O software Start ajuda oferecendo diversas formas de extração de dados. Dentre essas, utilizou-se uma que permite indicar quais variáveis o documento corresponde. A seguir, na Tabela 3, estão listados os dados que foram extraídos dos documentos selecionados.

Tabela 3: Extração de dados

Extração	Variáveis
O estudo é numérico, experimental ou teórico?	{Numérico} / {Experimental} / {Teórico}
Foi utilizado CDP para análise numérica?	{Sim} / {Não}
Por meio de um estudo numérico fundamentado em experimentos realizados, foi possível confirmar a validade da abordagem numérica utilizada?	{Sim} / {Não}

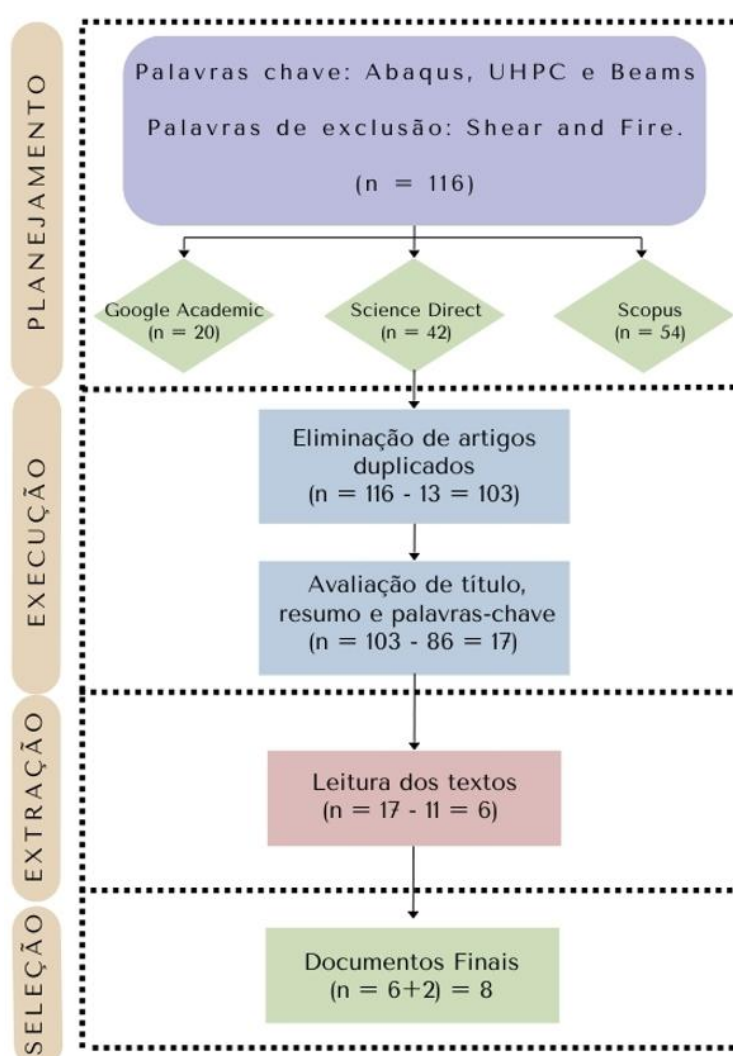
Se o estudo for numérico, forneça uma descrição que inclua: o modelo constitutivo do concreto, os coeficientes, e os parâmetros relacionados.	(Extração manual)
---	-------------------

Fonte: Autoria Própria, 2025.

2.2 Resultados

A partir da revisão sistemática, construiu-se o estado da arte sobre vigas de UHPC sob flexão. A Figura 2 detalha as etapas do processo de revisão, incluindo o número de documentos selecionados em cada fase de filtragem.

Figura 2: Etapas da revisão de literatura



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Inicialmente, foram encontrados 116 artigos ao utilizar as palavras-chave "Abaqus", "UHPC" e "Beams", com as exclusões "Shear" e "Fire", em bases de dados como Google Acadêmico, ScienceDirect e Scopus. Após a leitura dos resumos e palavras-chave, definiu-se os parâmetros específicos de aceitação para os artigos.

Após isso foram selecionados 6 artigos para uma análise detalhada. A Tabela 4 apresenta uma síntese de cada um deles, juntamente com alguns questionamentos sobre os resultados. Por fim, foram adicionadas mais duas teses para análise.

- a) O concreto ensaiado tem resistência a compressão entre 100MPa e 150MPa.
 - b) Houve ensaio experimental de prismas para resistência a tração na flexão?
 - c) Descrição do modelo constitutivo do concreto.
 - d) Para os ensaios de resistência a tração na flexão foram usados os procedimentos da norma francesa?
 - e) No UHPC havia fibra de aço?
 - f) Para o ensaio de flexão de em vigas ela tinha armadura longitudinal e estribo?

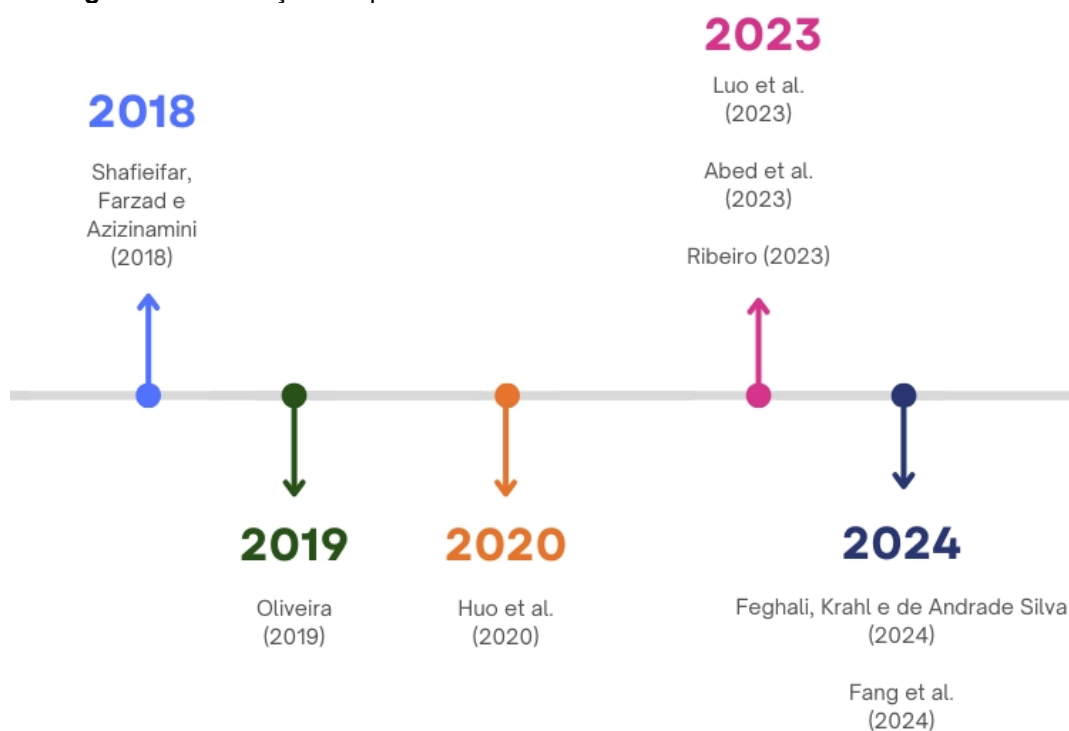
Tabela 4: Revisão sistemática com resultados

Autores	Estudo	Síntese	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Abed et al. (2023)	Experimental / numérico	13 vigas de UHPC reforçadas com GFRP e	Sim	Não	Ângulo de dilatação: 56° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,1; \kappa : 0,67$ Viscosidade: 0,000001	Não	Sim	Sim, de GFRP e barras de aço
Luo et al. (2023)	Experimental / numérico	Estudo de parâmetros de projeto, como espessura do UHPC e espaçamento dos pinos, afetam o desempenho de flexão de estruturas compostas de aço-UHPC	Não, foi de 165MPa	Sim	Ângulo de dilatação: 36° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,16; \kappa : 0,6667$ Viscosidade: 0,003	Sim	Sim	Sim
Huo et al. (2020)	Experimental / numérico	17 prismas de UHPC foram projetados para investigar o comportamento de retração e fluência do material UHPC	Sim	Sim	-	-	Sim	Sim
Feghali, Krahl e de Andrade Silva (2024)	Experimental / numérico	4 vigas com diferentes seções transversais em ensaios de flexão em quatro ponto.	Sim	Sim	Ângulo de dilatação: 54° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,16; \kappa : 0,6667$ Viscosidade: 0,0001	Sim	Sim	Sim
Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2018)	Experimental / numérico	12 vigas em ensaios de flexão com carregamento em três pontos.	Sim	Sim	Ângulo de dilatação: 56° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,1; \kappa : 0,66$ Viscosidade: 0	-	Sim	Somente longitudinal
Fang et al. (2024)	Experimental / numérico	flexão de vigas compostas de aço-UHPC sob momentos negativos.	Sim	Não	-	Sim	Sim	Somente longitudinal
Oliveira (2019)	Experimental / numérico	Distribuição de fibras de aço em vigas de UHPC. Ensaio de flexão de vigas a quatro pontos	Sim	Sim	Ângulo de dilatação: 36° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,16; \kappa : 0,6667$ Viscosidade: 0,000001	Não	Sim	Sim
Ribeiro (2023)	Experimental / numérico		Sim	Sim	Ângulo de dilatação: 30° Exentricidade: 0,1 $\frac{f_{b0}}{f_{c0}} : 1,16; \kappa : 0,67$ Viscosidade: 0	Sim	Sim	Não

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Na análise da distribuição temporal, foi observado um aumento nas publicações nos últimos dois anos, conforme ilustrado na Figura 3, relacionadas ao uso para restaurações estruturais. A Figura 3 também exibe a distribuição dos seis documentos de acordo com a metodologia empregada nos ensaios de vigas de UHPC submetidas a esforços de flexão, sendo todos estudos experimentais e numéricos.

Figura 3: Distribuição temporal dos últimos 5 anos dos documentos selecionados



Fonte: Aatoria Própria, 2025.

Nota-se que este é um campo de estudo novo devido à grande quantidade de pesquisas tanto experimentais e numéricas. A importância é maior no desenvolvimento de estudos numéricos para resolver problemas mais complexos, dado o alto custo do material e a complexidade das estruturas em UHPC, que atualmente é utilizado predominantemente em pontes. A abordagem numérica possibilita a determinação de soluções mais econômicas, desde que os parâmetros sejam testados e validados para aplicação em softwares de elementos finitos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resistência do UHPC

Equivalente a quase duas toneladas por pessoa, o consumo de concreto no mundo é o segundo maior, perdendo apenas para a água, sendo o material mais empregado na construção civil. Sua taxa de utilização aumentou significativamente nas últimas décadas, chegando a cerca de 33 bilhões de toneladas métricas anualmente (IBRACON, 2014). Embora não seja tão resistente quanto o aço, o concreto é amplamente utilizado devido a três razões principais: resistência à água, moldabilidade e acessibilidade (Mehta e Monteiro, 2014).

Primeiramente, sua excelente resistência à água o torna ideal para estruturas de controle, armazenamento e transporte de água, sendo utilizado pelos romanos em aquedutos e paredes de contenção. Atualmente, é comum encontrá-lo em barragens, canais e pavimentos. Além disso, o concreto é versátil e pode ser moldado em diferentes formas e tamanhos, possibilitando diversas aplicações na construção. Por fim, os materiais que compõem o concreto são abundantes e acessíveis, o que torna o concreto viável economicamente para a maioria dos projetos. Com todas essas características, é compreensível que o concreto continue sendo o material mais usado na construção civil em todo o mundo (Mehta e Monteiro, 2014).

Rompa e Gidrão (2020) escreveram acerca da importância da segurança e a durabilidade de estruturas civis, como pontes, viadutos e edifícios, que requerem a utilização de materiais de construção com resistência mecânica elevada. Nos últimos anos, o concreto de ultra alto desempenho reforçado por fibras (Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete – UHPC) na Europa e simplesmente UHPC nos EUA e Brasil) tem se destacado como opção.

A tecnologia dos materiais, mais especificamente do concreto, avançou nos últimos tempos, especialmente com o desenvolvimento do UHPC. Segundo Santos (2021) o UHPC, é um tipo de concreto de alta resistência, durabilidade e tenacidade, obtido pela combinação de diversos materiais como cimento, água, areia, aditivos e fibras de aço. Devido à sua baixa relação água/cimento, o UHPC possui características superiores em relação aos concretos convencionais.

O UHPC, ou concreto de ultra alta resistência com fibras, é caracterizado por uma resistência à compressão de pelo menos 150 MPa para aplicações estruturais e 130 MPa para outros usos, segundo Jacintho et al. (2022). Ele possui alta resistência à tração pós fissuração, comportamento dúctil, permite a produção de elementos com ou sem armaduras, oferece durabilidade em ambientes adversos. Normas internacionais apontam que o UHPC precisa ter uma resistência à compressão mínima de 120MPa NF P18 710 (AFNOR, 2016).

Já Graybeal (2014) sugere que para aplicações estruturais, a resistência mínima do UHPC deve ser de 14 ksi (96,5 MPa), o que não está de acordo com algumas normas internacionais, como a norma francesa NF P18 710 (AFNOR, 2016), que indica o mínimo de 150MPa para aplicação estrutural.

O UHPC deve atender aos seguintes critérios mínimos: resistência característica à tração no limite de elasticidade igual ou superior a 6,0 MPa, módulo de elasticidade igual ou superior a 45 GPa e classes de comportamento pós fissuração à tração T1, T2 ou T3. A classificação T1, T2 e T3 categoriza os materiais segundo seu desempenho à tração direta, com base na comparação entre suas resistências média e característica com valores elásticos de referência.

T1 Softening, são materiais que apresentam amolecimento sob tração direta.

T2: Hardening limitado, são materiais que a tração média é maior ou igual ao valor elástico médio, porém ainda se mantém abaixo do limite elástico característico.

T3 Hardening significativo, são materiais que tanto a resistência à tração média quanto a resistência à tração característica superam o limite elástico.

Essa classificação auxilia na identificação do grau de ductilidade e desempenho do material sob esforço de tração (Jacintho et al., 2022).

Hung et al. (2019) explica que, o softening (amolecimento) e hardening (endurecimento) se referem a diferentes estágios no comportamento de deformação de materiais. O softening é o comportamento do material após atingir o pico de tensão, onde um aumento na deformação é acompanhado por uma redução na tensão. O softening é observado em UHPC reforçado com fibras quando, sob tensão crescente, uma fissura localizada se forma e a curva de tensão-deformação entra em um estágio de amolecimento. Já o hardening descreve o comportamento do material onde um

aumento na deformação leva a um aumento na tensão. O artigo destaca a capacidade do UHPC reforçado com fibras de apresentar um comportamento de endurecimento por deformação sob tração uniaxial. Isso significa que, mesmo após o início da fissuração, o material continua a suportar cargas crescentes, exibindo um comportamento dúctil.

Figueiredo (2011) destaca que a ocorrência de um ou outro comportamento depende da capacidade de reforço pós-fissuração do material, que é diretamente influenciada pelo volume de fibras presente na matriz.

Por ter uma resistência mecânica elevada, longa vida útil, excelente capacidade de resistência a tração na flexão, além da baixa permeabilidade, é o material ideal para ser utilizado em grandes empreendimentos de construção. Quando empregado nas construções de grande porte, o UHPC tem o potencial de reduzir os custos e o tempo de construção, além de aprimorar a segurança e a durabilidade da estrutura (Da e Barbosa, 2021).

Rompa e Gidrão (2020) citam que a importância da segurança e a durabilidade de estruturas civis, como pontes, viadutos e edifícios, requer a utilização de materiais de construção com resistências mecânicas elevadas. Nos últimos anos, o UHPC tem se destacado como opção. A Tabela 5 apresenta as características recomendadas pela norma francesa NF P18 710 (AFNOR, 2016) para projetos estruturais, na falta de resultados experimentais.

O UHPC possui propriedades que o tornam capaz de substituir metais em algumas aplicações específicas, proporcionando uma opção mais leve e resistente (El-Helou et al., 2022).

Tabela 5. Valores indicativos para característica do UHPC.

E_{cm} módulo de deformação longitudinal	45 – 65 GPa
f_{ck} Resistência característica a compressão	150 – 200 MPa
f_{cm} Resistência média à compressão	160 – 230 MPa
$f_{ctk,el}$ Resistência característica à tração no limite de elasticidade	7,0 – 10,0 MPa
$f_{ctn,el}$ Resistência média à tração no limite de elasticidade	8,0 – 12,0 MPa

$f_{ctf,k}$	Resistência característica à tração pós fissuração	6,0 – 10,0 MPa
$f_{ctm,k}$	Resistência média à tração pós fissuração	7,0 – 12,0 MPa
K_{global}	Fator de orientação global das fibras	1,25
K_{local}	Fator de orientação local das fibras	1,75
	Coeficiente de dilatação linear térmica	$1,1 \times \frac{10^{-5}m}{^{\circ}C}$
L_f	Comprimento das fibras	12 – 20 mm

Fonte: Tabela anexo T, NF P 18 710 (AFNOR, 2016).

3.2 Constituição do UHPC

O concreto convencional é constituído de cimento, areia, brita, água e/ou aditivos químicos, dependendo da sua aplicabilidade. Por sua vez, o UHPC é constituído de cimento, areia de quartzo, materiais finos de preenchimento (pó de quartzo, sílica ativa, *fillers*, pozolanas etc.), aditivos químicos, pequena quantidade de água e fibras metálicas e/ou poliméricas (principalmente, quando aplicado à elementos estruturais).

As principais metodologias de projeto de misturas para UHPC envolvem o método de empacotamento de partículas secas e o método de empacotamento de partículas úmidas, visando maximizar a densidade de empacotamento inicial. É crucial controlar a trabalhabilidade do UHPC para garantir sua moldagem, recorrendo ao controle físico e químico para melhorar a fluidez e prevenir segregação de fibras e flutuação de materiais brutos leves por meio do ajuste do agente modificador de viscosidade. O peso unitário elevado do UHPC, devido ao uso de componentes de aço, sugere a necessidade de futuros estudos visando a redução desse peso para aplicações de estruturas leves e reparo (Du et al., 2021).

Segundo Lijian Li et al., 2023, em um estudo feito sobre o comportamento à fadiga de concretos de ultra-alto desempenho contendo agregado graúdo, ao contrário do concreto tradicional, o UHPC elimina o uso de agregado graúdo para promover uma microestrutura mais densa. Essa abordagem resulta em um maior consumo de materiais cimentícios e areia de granulometria fina. No entanto, essa otimização avançada levanta preocupações sobre o aumento da retração autógena, que é a

diminuição de volume do concreto sem perda de umidade para o ambiente, resultante do processo de hidratação do cimento. Ela pode causar fissuras internas e comprometer a durabilidade. Além disso, há preocupações com rigidez inadequada, custos elevados de construção e impacto ambiental. O UHPC sem agregado graúdo melhora a resistência à compressão. Especificamente, com a adição de agregado graúdo, a resistência à compressão alcançou 93,51 MPa, enquanto a resistência à tração foi de 7,50 MPa. No caso do UHPC sem agregado graúdo, os valores de resistência à compressão alcançaram 127,1 MPa, enquanto a resistência à tração foi de 10,48 MPa.

Conforme detalhado na Tabela 6, as composições típicas de UHPC destacam a ausência de agregado graúdo.

Tabela 6. Traços de UHPC e seus materiais constituintes mais comuns.

UHPC	200MPa		800MPa
	Sem Fibras	Com fibras	Com fibras
Cimento Portland	1	1	1
Sílica Ativa	0,23–0,25	0,23–0,25	0,23
Areia (150-600µm)	1,1	1,1	0,5
Quartzo (d50 = 10 µm)	0 – 0,39	0 – 0,39	0,39
Aditivo Super	0,016–0,019	0,016–0,019	0,019
Fibra Metálica (L=12mm)	-	0,175	-
Fibra Metálica (L=3mm)	-	-	0,630
Água	0,15–0,17	0,17–0,19	0,19
Pressão de Compactação			50MPa
Temp. Tratamento Térmico	20°C–90°C	20°C–90°C	250°C–400°C

Fonte: Adaptado de ISAIA, 2011 (Cap. 36 pg.1318).

3.3 Materiais Incorporados Na Composição Do UHPC

3.3.2 – Areia

Recomenda-se o uso de agregados de granito, aplite, basalto, riólito ou quartzito com valor de esmagamento abaixo de 17% e tamanho máximo entre 0,15 mm e 4,8 mm para maior resistência à compressão. Um módulo de finura de 3,0 é desejável, pois aumentar a finura da areia reduz a resistência à compressão (Ullah et al., 2022).

3.3.3 – Nanomateriais

Liu et al., 2020 analisaram o impacto de alguns nanomateriais na composição do UHPC, considerando a substituição parcial do cimento. A adição de nanomateriais afetou a fluidez do UHPC, sendo que a adição de alguns tipos resultou no aumento da resistência à compressão do compósito.

Com a incorporação de nanotubo de carbono e nanoplaqueta de grafite, o aumento da resistência à tração na flexão do UHPC foi de aproximadamente 70% (Yoo et al., 2022).

O módulo de elasticidade das fases de Silicato de Cálcio Hidratado no UHPC é de 28 GPa, o que pode ser aumentado para 36 GPa com a adição de 0,3% em peso de nanotubo de carbono e nanoplaqueta de grafite (Yoo et al., 2022).

Em resumo, a incorporação de nanomateriais no UHPC promete melhorias estruturais, mas questões de custo e escalabilidade persistem, com pesquisas contínuas buscando soluções para tornar o UHPC mais acessível e ecologicamente sustentável.

Resultados indicaram que a adição de 4% de nano-sílica aumenta a resistência à compressão em 17%, devido à reação pozolânica com hidróxido de cálcio que promove a formação de silicato de cálcio hidratado, essencial para a resistência do concreto. Concretos sem nano-sílica têm menor resistência à compressão (Ullah et al., 2022).

3.4 Normalização

Algumas normas, instruções técnicas e artigos já foram publicadas e estão em vigência para o uso e aplicação estrutural do UHPC, e tratam de vários aspectos e propriedades do material, assim como procedimentos de projeto. A Tabela 7 mostra algumas dessas publicações.

Tabela 7. Algumas normas e instruções técnicas sobre o UHPC.

Ano	Publicação	Orgão	País	Objetivo
Since 2006	FHWA	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2008	Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)	JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING – JSCE	Japão	UHPC Material Characterization and Behavior
2014	Design Guidelines for K-UHPC	Korea Institute of Construction Technology (KICT)	Coreia do Sul	UHPC Material Characterization and Behavior
2016	NF P18 470	Association Française de Normalisation	França	Materials
2016	NF P18 710	Association Française de Normalisation	França	Structural Project
2016	Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) – Materials, design and execution	Swiss Society of Engineers and Architects	Suíça	Materials and Structural Project
2017	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	AASHTO	E.U.A	UHPC for Bridge
2017	C1856 Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra High Performance Concrete	ASTM	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2018	PRC-239-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report	American Concrete Institute (ACI)	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2019	CSA A23.1:19/CSA A23.2:19 Concrete materials and methods of concrete	Canadian Standards Association	Canadá	UHPC Material Characterization and Behavior

Ano	Publicação	Orgão	País	Objetivo
	construction/Test methods and standard practices for concrete			
2022	Prática Recomendada: Concreto De Ultra Alto Desempenho Reforçado Com Fibras (UHPC)	ABECE/IBRACON – Texto Base para ABNT	Brasil	UHPC Material Characterization and Behavior
2022	Fiber Reinforced Concrete – State of the Art	FIB CEB-FIP Bulletin 105	Suíça	UHPC Material Characterization and Behavior
2024 (em andamento)	Normas sobre UHPC – NBR	ABNT	Brasil	UHPC Material Characterization and Behavior

Fonte: Jacintho et al., 2022

Neste trabalho serão usadas a norma francesa NF P18 710 (AFNOR, 2016) e a prática recomendada brasileira por Jacintho, et.al. (2022)

3.5 Importância Das Fibras No UHPC

A incorporação de fibras é essencial para o desempenho do UHPC em aplicações estruturais. Elas promovem ganho de resistência à tração, maior ductilidade e capacidade de absorção de energia, além de prevenir microfissuras (Daré, 2022). A combinação entre sua resistência mecânica, estabilidade em meio alcalino e alto módulo de elasticidade justifica o uso das fibras de aço torcidas, com gancho nas extremidades, e das fibras longas e curtas retas.

Buttignol et al. (2017) ressaltam o uso de fibras poliméricas, como as de polipropileno (PP), que derretem em torno de 180 °C e agem no alívio da pressão interna em situações de incêndio, reduzindo o risco de lascamento explosivo. Em contrapartida, Sumitomo (2022) observou que fibras PVA podem intensificar esse efeito quando expostas a temperaturas superiores a 300 °C, evidenciando a necessidade de avaliar o tipo de fibra de acordo com a exposição térmica esperada.

As propriedades elásticas do UHPC com e sem fibras são semelhantes, mas o reforço com fibras confere ao material características superiores em resistência à tração e comportamento pós-fissuração. Por esse motivo, os termos UHPC e UHPFRC são considerados corretos, uma vez que o reforço com fibras é essencial para aplicação estrutural do material. (Daré, 2022).

Richter (2018) analisou cinco misturas de UHPC com diferentes tipos de fibras metálicas em 2% de volume, identificando a resistência à compressão como o pico de tensão antes da perda de capacidade de carga. O envelhecimento do material tende a aumentar sua rigidez e resistência, favorecendo uma resposta estrutural mais linear até a ruptura.

Nas aplicações arquitetônicas, apesar do bom desempenho mecânico, a presença de fibras de aço pode afetar a estética (Da e Barbosa, 2021). Já em aplicações estruturais, como na primeira ponte rodoviária construída em UHPC na França, foi comprovada a integridade das fibras no interior dos elementos mesmo após mais de uma década em serviço.

A resistência à tração do UHPC está diretamente relacionada à fração volumétrica de fibras. Wille et al. (2014) observaram que diferentes geometrias (lisas, curvas e torcidas) apresentaram desempenho semelhante, devido à alta aderência entre as fibras lisas e a matriz cimentícia, reduzindo a necessidade de ancoragens mecânicas adicionais.

Oliveira (2019) destaca que o posicionamento e a distribuição das fibras de aço influenciam diretamente a ductilidade e a resistência à flexão. A orientação pode ocorrer de forma alinhada ou aleatória, e a dispersão pode ser homogênea ou concentrada. Figueiredo (2011) complementa que fibras orientadas perpendicularmente à direção das tensões de tração proporcionam os maiores ganhos mecânicos. Coeficientes elevados de orientação e dispersão indicam uma distribuição mais eficiente, o que favorece o desempenho em tração e flexão.

Yoo et al. (2016) comprovaram que o UHPC sem fibras apresenta comportamento frágil. Com a adição de fibras, há melhora na curva carga-deslocamento, especialmente após o pico de carga, quando as fibras ponteam fissuras e absorvem tensões residuais, promovendo uma ruptura mais gradual. Vanderlei (2004) reforça que essa redistribuição de cargas torna o material mais dúctil. Embora o aumento da quantidade de fibras otimize propriedades mecânicas, recomenda-se um limite de 3% em volume para não comprometer a resistência à compressão.

Ensaio indicam que taxas de fibras a partir de 2% elevam a ductilidade sem perda significativa de resistência, e taxas a partir de 1% já resultam em incremento na

resistência à tração na flexão. Por outro lado, o módulo de elasticidade permanece praticamente inalterado, variando entre 46,3 GPa e 54,6 GPa (Vanderlei, 2004).

No cisalhamento, a incorporação de 2,5% de fibras de aço pode aumentar a resistência em até 250%, sobretudo em elementos com menor relação vão/altura (Yoo e Yoon, 2016). Esse aumento está associado à atuação das fibras nas superfícies fissuradas, proporcionando falhas menos abruptas, embora não alterem significativamente o ângulo de fissuração diagonal. Além disso, o uso de fibras mais longas, associado ao aumento de barras longitudinais, melhora o desempenho estrutural sob impacto.

3.6 Aplicação Do UHPC Em Estruturas Existentes

Não há como construir sem causar um impacto ambiental. O que se procura em pesquisas é minimizar este impacto, pois está mais do que comprovado que o concreto é um excelente material para ser usado nas edificações, pela sua mobilidade nas formas, pela sua durabilidade e baixo custo de fabricação e manutenção, e o UHPC possibilita uma vida útil muito prolongada, diminuindo sobremaneira os custos de manutenção das estruturas.

Nos primeiros anos de seu desenvolvimento, o UHPC foi amplamente utilizado em obras de reforço e recuperação estrutural, sendo aplicado em tabuleiros de pontes e fundações. Com o progresso das pesquisas e a comprovação de seu desempenho, seu uso foi expandido para mais projetos, como rodovias, pontes, metrô e estruturas de proteção civil (Buitelaar, 2004). Entretanto, a maioria das misturas de UHPC requer cura a vapor, o que limita sua aplicação em algumas situações. O UHPC sem necessidade de cura a vapor surge como uma alternativa promissora, possibilitando um uso mais amplo em diferentes projetos de engenharia (Liu et al., 2024).

Entretanto após ser submetido a um processo de cura térmica, o UHPC apresenta melhorias em suas propriedades, incluindo um coeficiente reduzido de fluência e menor retração após a cura (Garas; Kurtis; Kahn, 2012).

A empresa Lafarge-Holcim patenteou o UHPC produzido por ela com o nome de Ductal, como já mencionado anteriormente, e há vários projetos de grandes obras com esse material, com propostas de uso em impressoras 3D para a construção civil.

Com suas características mecânicas o UHPC permite a construção de estruturas esbeltas e impressionantes do ponto de vista arquitetônico.

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto é uma das principais causas da redução da capacidade de carga, comprometendo a durabilidade dos elementos de concreto armado. Quando ocorre corrosão, surgem diversos problemas, como fissuras e desintegração da camada protetora de concreto, redução no diâmetro e na resistência das barras de aço, além da diminuição da aderência entre as barras e o concreto, o que prejudica a integridade estrutural e a capacidade de manutenção, podendo levar a falhas inesperadas.

Recentemente, pesquisadores têm investigado o uso do UHPC como uma alternativa para reforçar elementos de concreto armado (Mikuroya et al., 2020 e Bastien-Masse et al., 2014). Estudos foram realizados para avaliar o desempenho estrutural do UHPC no reforço de vigas e lajes de concreto armado (Shu et al., 2019) Foi analisado o comportamento em flexão de vigas de concreto danificadas que foram reforçadas com uma camada de UHPC, destacando-se a melhoria na tenacidade dessas estruturas.

3.6.1. Reforço Viaduto Chillon

O projeto dos viadutos Chillon (Figura 4) é um dos maiores do mundo em relação ao revestimento estrutural. Com o propósito de fortalecer um viaduto rodoviário com extensão de 2,1 km e uma área total do tabuleiro correspondente a 53.000 m² (Ductal, 2023).

O Ductal foi usado para reforçar os dois tabuleiros (2,2 km de comprimento por 12 m de largura cada). A aplicação de uma fina camada de Ductal (4 cm de espessura) com vergalhões permitiu o reforço dos tabuleiros da ponte para suportar cargas de cisalhamento, flexão e fadiga, além de garantir a impermeabilização da superfície (Ductal, 2023).

Estudos estruturais revelaram que o principal modo de falha, no estado limite último (ELU), é a perfuração causada pelas cargas dos pneus de caminhões pesados através da laje de tabuleiro de 18 cm de espessura, embora os requisitos de segurança estrutural sejam atualmente atendidos. Investigações adicionais revelaram

que o concreto está sujeito a uma reação de agregado alcalino devido à sua proximidade com o Lago de Genebra (Ductal, 2023).

Essas avaliações levaram à conclusão de que a laje do tabuleiro sofreria uma redução significativa de resistência no futuro, resultando em uma diminuição correspondente na resistência à perfuração. Considerando que a substituição da impermeabilização das lajes estava prevista para 2014-2015, decidiu-se combinar essa intervenção com um reforço (Ductal, 2023).

Várias opções foram estudadas, mas nenhuma atendia a todas as restrições da estrutura. A solução final foi consolidar o viaduto adicionando uma camada de 40 a 50 mm de espessura de Concreto Reforçado com Fibra de Ultra Alto Desempenho (UHPC) nas superfícies superiores previamente hidrojateadas das lajes do tabuleiro, reforçadas adicionalmente com vergalhões de aço (Ductal, 2023).

Os métodos desenvolvidos para este projeto demonstraram a eficiência do UHPC reforçado como solução de reforço. A combinação do UHPC com vergalhões proporcionou uma maneira eficiente de criar membranas de tração altamente duráveis para reforçar estruturas existentes (Ductal, 2023).

Essa intervenção também melhorou a capacidade estrutural geral da ponte, permitindo um aumento de 10% no tráfego em três anos, atingindo mais de 50.000 veículos por dia. Devido às propriedades mecânicas e durabilidade do UHPC foi possível preservar a capacidade de carga da ponte, reduzindo os custos de manutenção e possibilitando um rápido retorno do importante eixo da rede rodoviária suíça (Ductal, 2023).

3.6.2. Ponte Suspensa de Honghe

A Ponte Suspensa de Honghe, Figura 5, localizada na província de Yunnan, China, foi concluída em apenas 35 dias. Essa ponte suspensa por cabo é um projeto crucial para fortalecer a infraestrutura de transporte e impulsionar o desenvolvimento econômico no sul da província. Com 700m de comprimento e 30m de largura, foi uma das maiores pontes suspensas por cabo com plataforma de aço feita de UHPC no mundo. A solução escolhida foi o Ductal devido à sua capacidade de aumentar a durabilidade e segurança, reduzir os custos de manutenção ao longo da vida útil da

ponte e permitir uma implementação rápida para cumprir o cronograma apertado (Ductal, 2023).

3.6.3. Edifício do Banco Central do Iraque

O edifício do Banco Central do Iraque, mostrado na Figura 6, projetado por Zaha Hadid Architects, é um dos maiores projetos de UHPC do mundo. Com uma altura de 170 metros, o exoesqueleto em UHPC oferece força e proteção, mantendo a leveza e a penetração de luz. A fachada única, composta por 61.000 m² e 12.000 painéis complexos (Ductal, 2023).

3.6.4. Torre Zeena

A torre Zeena, mostrada na Figura 7, localizada no Al Nahr corniche de Beirute, Líbano, tem a primeira fachada UHPC (concreto de alto desempenho ultrafino) do país, com 100 metros de altura. O edifício abriga unidades de varejo, escritórios, espaços residenciais e níveis de estacionamento. O uso do Ductal Envelope foi escolhido devido às suas propriedades mecânicas, permitindo espessuras reduzidas e 20 a 50% de aberturas. Foram produzidos 1.150 painéis Ductal de até 2,75 m x 6 m para este projeto, os quais foram fixados diretamente na laje da edificação com fixações de aço inox em quatro pontos, sem a necessidade de uma estrutura secundária de aço, o que reduziu o tempo de instalação (Ductal, 2023).

3.6.5. Escritório Nacional de Aeroportos de Marrocos.

O Escritório Nacional de Aeroportos de Marrocos, indicado na Figura 8, executou a reforma do aeroporto de Rabat-Salé, incluindo o projeto de uma fachada mashrabiya de 1.600m². Essa fachada, que funciona como um envelope e um brise soleil, é baseada em um padrão tradicional e cultural: a estrela marroquina (Ductal, 2023). Pela primeira vez na África, o Ductal foi utilizado neste projeto, ecoando as tradições arquitetônicas do mundo árabe.

3.6.6. Casa Japão – São Paulo

No Brasil ainda não há muitos registros do UHPC em aplicações arquitetônicas, entretanto, um exemplo a ser citado é a Casa Japão, na cidade de São Paulo, que foi construída com o objetivo de se tornar o centro cultural da cultura nipônica no país (Figura 9). Um dos grandes destaques da casa é o painel arquitetônico feito com Ductal Branco, que é visível logo na entrada do prédio. Toda a sua estrutura foi pensada com o que há de mais moderno em acabamento e design (Muller, 2017).

Figura 4. Viadutos Chillon.



Fonte: DUCTAL (2023).

Figura 5. Ponte Suspensa de Honghe.



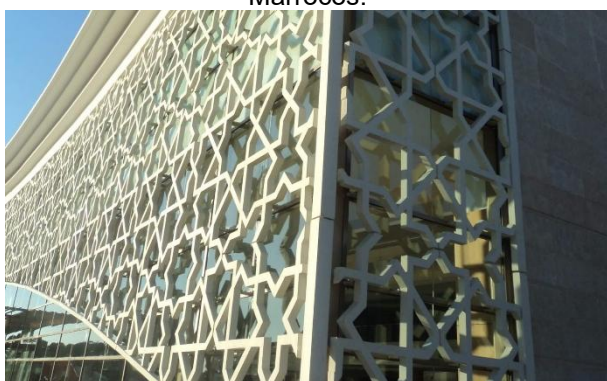
Fonte: DUCTAL (2023).

Figura 6. Banco Central do Iraque.



Fonte: DUCTAL (2023).

Figura 8. Escritório Nacional de Aeroportos de Marrocos.



Fonte: DUCTAL (2023).

Figura 7. Torre Zeena.



Fonte: DUCTAL (2023).

Figura 9. Casa Japão, em São Paulo.



Fonte: Muller (2017).

3.7 Características Mecânicas

As características principais do concreto em termos de mecânica são sua capacidade de suportar forças de compressão, tração e seu módulo de elasticidade. Essas características são identificadas por meio de ensaios.

Segundo Oliveira (2019) existem dois principais incentivos para entender o comportamento mecânico dos materiais. Um deles é aprimorar suas características mecânicas, ajustando os tipos e proporções dos elementos que o compõem. O outro é formular modelos constitutivos dos materiais para antecipar a resposta mecânica dos componentes produzidos a partir deles, tanto em estudos analíticos quanto em simulações numéricas.

A norma francesa NF P18 710 (AFNOR, 2016) caracteriza o UHPC como sendo um concreto com alta resistência à compressão e alta resistência à tração pós-fissuração conferindo-lhe um comportamento dúctil em tensão, cuja ausência de

fragilidade permite projetar e produzir estruturas e elementos estruturais sem a utilização de aço de reforço. Para construir certas estruturas, o UHPC pode, no entanto, conter armaduras ou não, sendo essa armadura constituída de barras (concreto armado) ou cordoalhas (concreto protendido).

3.7.1 Compressão

De acordo com a norma NF P18 710 (AFNOR, 2016) e Jacintho et.al. (2022), o UHPC deve ter resistência à compressão característica mínima de 150 MPa para aplicações estruturais, entretanto pode ser considerado um UHPC o concreto que tiver resistência superior à 130MPa.

Para determinar a resistência à compressão (Equação 1) para projeto, a NF P18 710 (AFNOR, 2016) e Jacintho et.al. (2022) recomendam as prescrições de resistência e deformações abaixo:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Em que γ_c é um fator referente ao UHPC comprimido, sendo definido pela Tabela 8.

Tabela 8. Coeficientes para o UHPC.

Situações de projeto	γ_C (UHPC Comprimido)	γ_{cf} (UHPC tensionado)	γ_S (aço de reforço)	γ_S (aço de protensão)
Durável Transitório	1,5	1,3	1,15	1,15
Acidental	1,2	1,05	1,0	1,0

Fonte: NF P 18 710 (AFNOR, 2016)

α_{cc} é o coeficiente de resistência à compressão, sendo seu valor igual a 0,85

A deformação do limite de comportamento elástico do material submetido à compressão é definida por:

$$\varepsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} \quad (2)$$

A deformação última, no estado de plastificação do material à compressão, é dada por:

$$\varepsilon_{cud} = \left(1 + 14 \frac{f_{ctm}}{K_{global} * f_{cm}} \right) * \varepsilon_{c0d} \quad (3)$$

f_{ctm} : valor médio de resistência a tração pós fissuração

$$K_{global} = 1,25$$

f_{cm} : valor médio da resistência à compressão

A norma francesa para projeto estrutural NF P18 710 (AFNOR, 2016) e Jacintho et. al. (2022) não dão indicações de estimativa do módulo de deformação longitudinal para o UHPC através da sua resistência à compressão.

Entretanto, na literatura técnica, Graybeal (2007) indica essa estimativa:

$$E_c = 3840 f_c^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Em que:

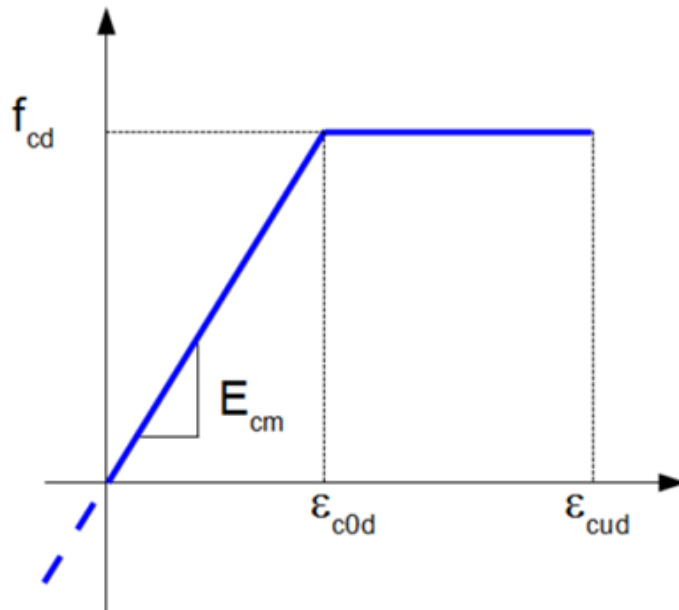
E_c : módulo de elasticidade

f_c : resistência a compressão do UHPC em MPa

A deformação no pico da resistência à compressão é prevista em 3,7 ‰ para os corpos de prova com cura normal (Graybeal, 2007).

A relação tensão vs. deformação indicada pela NF P18 710 (AFNOR, 2016) e por Jacintho et al. (2022) é mostrada na Figura 10.

Figura 10: Representação da relação tensão-deformação do UHPC na compressão para projetos no ELU



Fonte: NF P 18 710 (AFNOR, 2016)

f_{cd} : valor de projeto da resistência à compressão

E_{cm} : valor médio do módulo de Young

ε_{c0d} : máxima deformação elástica de encurtamento de projeto no Estado Limite Último.

ε_{cud} : máxima deformação de encurtamento de projeto no Estado Limite Último.

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cud} = \left(1 + 14 \frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}} \right) \cdot \varepsilon_{c0d} \quad (7)$$

3.7.2 Tração

A compreensão da resistência à tração permite estimar a carga na qual ocorre a fissuração e, portanto, permite prever a durabilidade do concreto. Outras características, como a ligação entre o concreto e a armadura, a contribuição do concreto para resistir ao cisalhamento, à torção, à retração e às contrações induzidas pela temperatura, estão todas associadas à sua resistência à tração (Oluokun, 1991).

A resistência à tração desempenha um papel significativo no desenvolvimento de fissuras em qualquer fase ao longo da vida útil de uma estrutura de concreto armado ou protendido. As fissuras normalmente iniciam-se quando a capacidade de tração do concreto é atingida, impactando tanto sua estética quanto sua durabilidade (Oluokun, 1991).

Estimar com precisão a resistência à tração do concreto pode ajudar a prevenir problemas de fissuração, melhorar a previsão da resistência ao cisalhamento e reduzir falhas devido às tensões decorrentes de uma estimativa insuficiente da resistência à tração (Oluokun, 1991).

A resistência à tração do concreto de qualquer classe de resistência à compressão pode ser determinada usando três métodos de teste diferentes: ensaio de tração direta e ensaio de tração por flexão.

Já a avaliação da resistência à tração em ensaios de flexão inclui a aplicação de força em três (ou quatro) pontos no corpo de prova prismático e as tensões acabam sendo não uniformes devido à heterogeneidade da composição do material (Van Mier e Van Vliet, 2002).

A precisão do teste é comprometida pelo comprimento da amostra; amostras curtas são afetadas por efeitos de contorno, enquanto amostras prismáticas longas requerem entalhes para previsibilidade de fissuras. Os entalhes podem ser fundidos ou cortados no local usando uma serra diamantada rotativa, essencial para estudar materiais naturais como rocha e gelo. Colocar LVDTs (transdutor para medição de deslocamento linear) ao longo do comprimento da amostra e selecionar os mais deformados garante a estabilidade dos resultados do ensaio (Van Mier e Van Vliet, 2002).

Para determinar a propriedade de resistência à tração do concreto, o teste de tração uniaxial deve ser o mais considerado (Van Mier e Van Vliet, 2002). Entretanto, é um ensaio muito complexo na sua execução por causa do tipo de equipamento utilizado. No Brasil esse ensaio não é normalizado, então a resistência à tração é obtida experimentalmente de forma indireta por ensaios de flexão. Para o UHPC o mais comum é o ensaio de flexão, com 3 ou 4 pontos de aplicação de força.

De acordo com a NF P18 470 (AFNOR, 2016) e Jacintho et al. (2022) para o UHPC devem ser obtidas em ensaio experimental dois valores de resistência à tração: um na fase elástica de deformação do material, e outro valor para exprimir o seu comportamento plástico. Esses dois valores são obtidos em 2 ensaios de flexão, entretanto com aplicação diferente do carregamento: um com 3 pontos de aplicação de carga ($f_{ct,el}$) e outro com 4 pontos de aplicação de carga ($f_{ct,fl}$). A partir dos resultados do ensaio com relação à força lida no equipamento, o cálculo da resistência à tração na flexão na fase elástica, é feito com as equações (8 e 9).

$$f_{ct,fl} = \frac{3.Fl}{b.a} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \left[\frac{K.a^{0,7}}{1+K.a^{0,7}} \right] \text{ (MPa)} \quad (9)$$

$k = 0,08$ (NF P18 470, 2016).

Para fins de projeto estrutural, a consideração da tração deve seguir as seguintes prescrições. A classificação de materiais segundo seu comportamento mecânico sob tração pode ser organizada em três categorias distintas, denominadas T1, T2 e T3. Essa distinção é feita com base na relação entre a curva média da resistência à tração $\left(\frac{f_{ctfm}}{K}\right)$ e a curva característica da resistência à tração $\left(\frac{f_{ctfk}}{K}\right)$, comparadas a valores de referência, como a resistência à tração média no regime elástico ($f_{ctm,el}$) e a resistência à tração característica no regime elástico ($f_{ctk,el}$). A Tabela 9 sintetiza essa classificação (Jacintho et al., 2022).

Tabela 9. Tabela de Classificação das Classes T1, T2 e T3

Classe	Curva média $\left(\frac{f_{ctfm}}{K}\right)$	Curva Característica $\left(\frac{f_{ctfk}}{K}\right)$
T1	$\frac{f_{ctfm}}{K} < f_{ctm,el}$	$\frac{f_{ctfk}}{K} < f_{ctk,el}$
T2	$\frac{f_{ctfm}}{K} \geq f_{ctm,el}$	$\frac{f_{ctfk}}{K} < f_{ctk,el}$
T3	$\frac{f_{ctfm}}{K} \geq f_{ctm,el}$	$\frac{f_{ctfk}}{K} \geq f_{ctk,el}$

Fonte: Jacintho et al., 2022

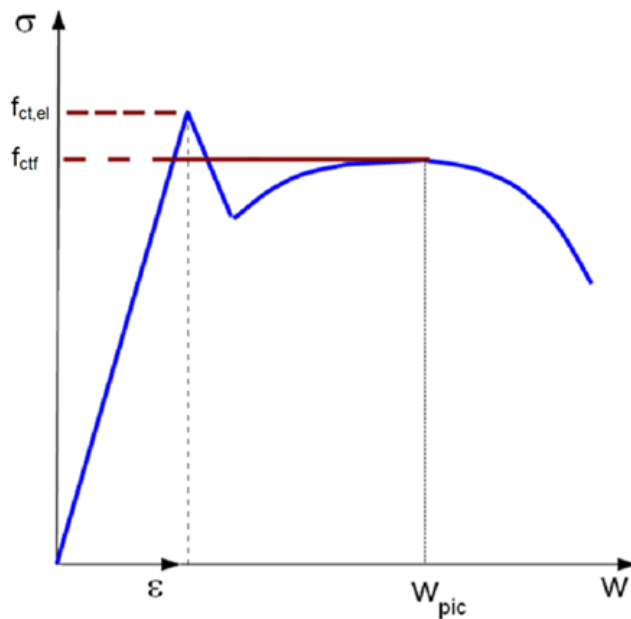
A Classe T1 caracteriza materiais que apresentam amolecimento sob tração direta (softening), ou seja, após atingirem a tensão máxima, ocorre uma redução na capacidade resistente, levando à falha de forma mais acentuada. Esse comportamento é comum em materiais frágeis, nos quais a resistência à tração é baixa e a capacidade de redistribuir tensões é limitada (Jacintho et al., 2022).

A Classe T2, por sua vez, corresponde a materiais que apresentam deformação limitada (hardening limitado). Nesse caso, embora a resistência à tração média do material seja maior ou igual ao valor elástico médio ($f_{ctm,el}$), o valor característico ainda se mantém abaixo do limite elástico característico ($f_{ctk,el}$). Isso significa que o material pode suportar um aumento de carga antes da falha, porém com uma capacidade restrita de deformação antes da ruptura (Jacintho et al., 2022).

Já a Classe T3 compreende materiais que exibem deformação significativa (hardening). Para esses materiais, tanto a resistência à tração média (f_{ctfm}/K) quanto a resistência à tração característica (f_{ctfk}/K) superam os respectivos limites elásticos $f_{ctm,el}$ e $f_{ctk,el}$. Dessa forma, a estrutura do material permite suportar tensões mais elevadas e deformações substanciais antes da ruptura, indicando uma maior ductilidade e resistência progressiva sob carga crescente (Jacintho et al., 2022).

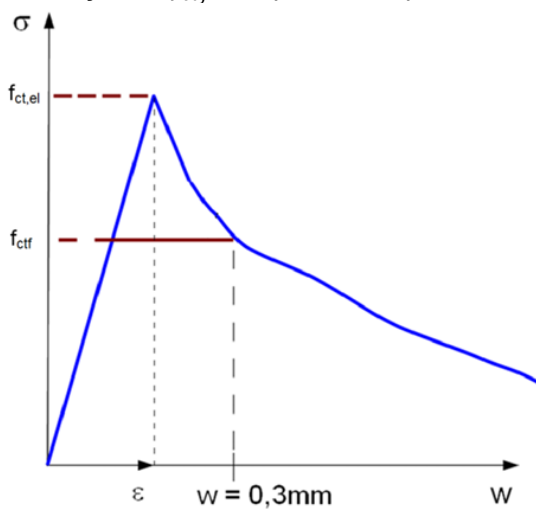
A Figura 11 demonstra o comportamento de softening do concreto e a Figura 12 demonstra o comportamento de hardening do concreto.

Figura 11: Definição do f_{ctf} em pico máximo



Fonte: NF P 18 710 (AFNOR, 2016)

Figura 12: Definição do f_{ctf} em que não há pico máximo da curva



Fonte: NF P 18 710 (AFNOR, 2016)

$$\varepsilon_{u,pic} = \frac{W_{pic}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{u1\%} = \frac{W_{1\%}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{u,lim} = \varepsilon_{lim} + \frac{l_f}{4.l_c} \quad (12)$$

3.8 Resumo do Panorama das pesquisas de elementos estruturais em UHPC sob flexão

Para avaliar o desempenho de flexão dos materiais, são comumente utilizados dois métodos de teste: a flexão em três pontos e a flexão em quatro pontos. A principal diferença entre eles reside no uso de um ou dois pontos de aplicação de carga sobre o corpo de prova, que está simplesmente apoiado. A resistência à flexão obtida pode variar dependendo do método de carga utilizado, e cada um possui suas próprias vantagens e desvantagens. O teste de flexão em três pontos é mais simples em termos de aplicação de carga, mas concentra a força em um único ponto, o que pode resultar em uma distribuição de flexão não uniforme, tornando alguns defeitos menos perceptíveis. Por outro lado, o teste de flexão em quatro pontos distribui o momento de flexão de maneira uniforme, permitindo resultados experimentais mais precisos (SHU et al., 2019).

Oliveira (2019) usou um modelo numérico em elementos finitos para explorar a influência das fibras no desempenho mecânico e estrutural do concreto de ultra alto desempenho, com ensaio de flexão em viga armada, e criação de modelos numéricos no software ABAQUS. Foram realizadas análises experimentais de imagens numéricas, testando três composições de UHPC.

Concluiu que as fibras influenciam positivamente na rigidez e capacidade de carga das vigas de UHPC. A quantidade de fibras mostrou impacto limitado na resistência à flexão, devido à interação complexa entre as fibras e a armadura longitudinal. As fibras contribuíram para o controle da fissuração e a redistribuição das tensões. A distribuição das fibras foi analisada e modelada, evidenciando seu alinhamento e orientação preferencial (Oliveira, 2019)

Zhu et al. (2020) responderam à demanda de reforço de estruturas de concreto armado, motivada pela deterioração ao longo do tempo. O objetivo do estudo está no reforço à flexão de vigas e lajes de concreto armado utilizando concreto de ultra alto desempenho (UHPC). Os resultados experimentais indicam que o módulo de elasticidade do UHPC situa-se na faixa de 44-46 GPa. Além disso, os melhores

resultados de resistência foram obtidos quando o UHPC continha cerca de 3% de fibras de reforço. Esse valor otimizado demonstra que o UHPC possui a capacidade de aumentar a resistência à flexão das vigas e lajes de concreto armado, também apresentou potencial para resistir às forças de tração e compressão. Esses resultados evidenciam que o UHPC tem o potencial de desempenhar um papel fundamental no aprimoramento da capacidade de carga e resistência de vigas e lajes de concreto armado.

3.9 Métodos dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF), também conhecido como FEM, é uma técnica numérica fundamental para calcular soluções aproximadas de problemas matemáticos complexos, descritos por equações diferenciais. Originalmente desenvolvido para atender às necessidades de análise estrutural e elasticidade nas engenharias civil e aeronáutica, o MEF foi impulsionado pelos trabalhos pioneiros de Hrennikoff em 1941 e Courant em 1943 que destacaram a importância de discretizar o domínio contínuo em subdomínios, conhecidos como elementos, permitindo uma análise detalhada e precisa. Desde então, o MEF foi amplamente generalizado para a modelagem numérica de sistemas físicos em várias áreas da engenharia, como eletromagnetismo, transferência de calor e dinâmica de fluidos.

A aplicação do MEF possibilita prever com precisão o comportamento de elementos estruturais, especialmente ao explorar diferentes configurações e espessuras de UHPC, sem a necessidade de realizar testes experimentais adicionais (Baccouch, 2021).

A capacidade de simulação avançada torna o MEF uma ferramenta valiosa para otimizar o design e a análise de estruturas complexas. A escolha pelo MEF é a discretização do domínio de cálculo com elementos finitos produzindo matrizes esparsas (quando a matriz possui grande quantidade de elementos com número 0, ou seja, não necessário) e simétricas. O MEF também se destaca por sua capacidade de lidar com não linearidades, como curvas não lineares. Adicionalmente, o método permite a discretização de geometrias complexas por meio de elementos triangulares

em 2D e tetraédricos em 3D, tornando-o adequado para análise estrutural, transferência de calor, análises elétrica ou magnética (Baccouch, 2021).

O MEF se tornou essencial na análise de estruturas de concreto armado devido à sua capacidade de simular numericamente a resposta estrutural completa até o colapso. Essa capacidade permite a avaliação abrangente dos aspectos de segurança e das características deformacionais da estrutura. Para análise de estruturas de concreto armado se justifica a utilização do MEF por sua capacidade de lidar com as complexidades do comportamento do material, como inelasticidade, fissuração e efeitos interativos entre concreto e armadura. O método permite a representação mais precisas dessas características, levando a uma avaliação mais realista do comportamento da estrutura (Bergan, et. al. 1979).

Simulando o comportamento de um sistema real em um ambiente virtual. Essa característica a torna útil para compreender o comportamento estrutural, prever como a estrutura se comportará sob diferentes tipos de carregamento, como compressão, tração, flexão e torção, e para otimizar o projeto, auxiliando na identificação de áreas críticas na estrutura e possibilitando a otimização do projeto para aumentar a resistência, reduzir o peso ou minimizar custos. A simulação de cenários complexos, como explosões e fadiga, que seriam complicados para exercer em laboratórios ou por falta de ambiente adequado ou por falta de equipamentos para executar, é possível com a análise por elementos finitos (Zaidi et.al. 2021).

Segundo Tawfik et al. (2021) a utilização de simulações numéricas de elementos finitos reduz a necessidade de testes físicos adicionais e auxilia na condução de estudos paramétricos complexos com precisão. A natureza complexa e não linear do comportamento do concreto sob tração e compressão representa um desafio significativo para a simulação. Esta complexidade é atribuída à resposta frágil do concreto, que pode levar à fratura por fissuração ou esmagamento quando submetido a forças de tração ou compressão, respectivamente.

A utilização de análise numérica através do Método dos Elementos Finitos (FEM) permite prever com precisão o comportamento de elementos estruturais,

explorando diferentes configurações e espessuras de UHPC, sem a necessidade de realizar testes experimentais adicionais.

O modelo constitutivo empregado para UHPC é o *Concrete Damage Plasticity* (CDP), que quantifica o dano material com um parâmetro que varia de zero (plena integridade) a um (completa perda de resistência). Os parâmetros do CDP são ajustados para refletir as condições do modelo real. Já para a barra de aço, adota-se um modelo constitutivo linear, levando em consideração densidade, módulo de elasticidade e resistência. No programa computacional ABAQUS, cinco parâmetros de plasticidade são cruciais na definição do modelo CDP: ângulo de dilatação (Ψ), que varia entre 0° e 50° , excentricidade do potencial de fluxo (ϵ), relação entre resistência à compressão inicial e resistência à compressão uniaxial inicial (f_{b0}/f_{c0}), e (K_c) princípio de tensões invariantes em extensão à linha de compressão (q_{cm}), que varia entre 0,5 e 1, e por fim o parâmetro de viscosidade (μ), que retém rigidez tangencial positiva durante pequenos incrementos de tempo (Tawfik et al., 2021).

O modelo CDP leva em consideração as diferenças entre as propriedades de tração e compressão dos materiais, adotando a fissuração sob tração e o colapso por compressão como critérios para representar a falha do concreto. Dessa forma, consegue descrever com precisão o comportamento inelástico de materiais frágeis, como o próprio concreto (Zhuang, 2009, Fakeh et al., 2023 e Li et al., 2023).

Compreender o comportamento do UHPC sob tensão envolve analisar a sua deformação em diferentes direções. O coeficiente de Poisson, simbolizado pela letra grega ν , é uma propriedade fundamental dos materiais que descreve a relação entre a deformação lateral (transversal) e a deformação axial (longitudinal) quando submetidos a uma força. Imagine que você está esticando um elástico. O coeficiente de Poisson quantifica essa relação: um valor próximo de 0 indica que o material deforma pouco lateralmente quando esticado, enquanto um valor próximo de 0,5 indica uma grande deformação lateral.

No caso de concretos de alta resistência, Persson (1999) sugere que seu coeficiente de Poisson é ligeiramente menor em comparação ao concreto convencional, o que pode ser atribuído à sua microestrutura mais densa e compacta,

resultante da adição de microssilica, baixa relação água/cimento e processos de cura específicos. Definido isto essa característica influencia diretamente a forma como o UHPC se comporta sob carga, impactando a sua rigidez, resistência à fissuração e comportamento geral da estrutura (PERSSON, 1999).

O modelo CDP, conforme mencionado por Othman e Marzouk (2018) é um modelo contínuo baseado em plasticidade e dano, permitindo a entrada independente de relações tensão-deformação, parâmetros de dano e taxas de deformação. No entanto, sua aplicação específica ao UHPC ainda não foi totalmente elucidada, e a falta de estudos sobre a expansão volumétrica deste material evidencia lacunas na compreensão de seu comportamento sob altas pressões hidrostáticas. Nesta pesquisa será usado o ABAQUS pela sua disponibilidade de uso e pela orientação encontrada na literatura técnica, como no trabalho de Oliveira (2019).

3.10 Métodos Numéricos para Análise do Comportamento Não Linear

A análise do comportamento não linear do concreto pode ser realizada por meio de métodos experimentais e numéricos. Embora os métodos experimentais forneçam dados empíricos para validação, eles também apresentam desafios como altos custos, tempo e complexidade logística. Como resultado, os métodos numéricos têm se tornado cada vez mais populares como ferramentas complementares e, em alguns casos, alternativas para a análise do comportamento do concreto.

O CAE Assistant, 2025 destaca alguns métodos numéricos importantes:

- Método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica que divide a estrutura em múltiplos elementos menores, permitindo simular o desenvolvimento e interação de fissuras, a distribuição não uniforme de tensões e os efeitos de diferentes condições de carregamento. O MEF é amplamente utilizado na análise de estruturas de concreto devido à sua capacidade de modelar geometrias complexas e condições de contorno variadas.
- Método dos elementos discretos (DEM) é uma abordagem numérica que simula o comportamento do concreto na meso-escala,

examinando as interações entre os agregados. O DEM modela cada partícula separadamente, sendo útil para simular a fratura e a propagação de fissuras em nível microestrutural.

- Os modelos de treliça representam o concreto como uma rede de elementos interconectados, simulando a formação e propagação de fissuras. Esses modelos são adequados para estudar o processo de falha em estruturas de concreto, capturando a redistribuição de tensões e a formação de mecanismos de colapso.

- Modelos de zona coesiva (CZM) modelam o processo de fratura onde a separação do material ocorre em uma interface específica, simulando o início e o crescimento controlado de fissuras. Esses modelos são particularmente úteis para simular a propagação de fissuras em interfaces, como juntas e zonas de aderência entre o concreto e a armadura.

A modelagem multiescala integra modelos em diferentes escalas (micro, meso, macro) para fornecer uma compreensão abrangente do comportamento do concreto. Essa abordagem permite capturar os efeitos da microestrutura do concreto nas propriedades macroscópicas, fornecendo uma representação mais precisa do comportamento do material, como já foi colocado no início deste capítulo. Esta pesquisa trabalhou com a análise simplificada em macroescala.

4. METODOLOGIA

A análise em macroescala é uma análise mais simplificada do ponto de vista numérico pois considera o concreto como um material homogêneo e a sua heterogeneidade é apresentada na resposta experimental do comportamento tensão-deformação. Nesta análise é possível considerar a armadura como um elemento finito a parte, com suas próprias características. Esta foi a análise selecionada para ser usada nesta pesquisa, pela sua simplicidade de uso.

4.1 Trabalho Experimental de Apoio para Análise Numérica

O presente estudo teve como um dos propósitos investigar as características de flexão de vigas de UHPC, por meio da aplicação da simulação numérica com elementos finitos do software ABAQUS. Este trabalho aborda o dimensionamento da capacidade resistente de vigas utilizando alguns dados experimentais e alguns dados calculados conforme recomendação da norma francesa NF P18 710 (AFNOR, 2016).

Para esta pesquisa, foram considerados os resultados de ensaios realizados em um trabalho de iniciação científica (Santos, 2023 e Jacintho et. al., 2024), no qual foi caracterizado um traço de UHPC com relação a resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 7,5 cm x 15 cm e para os ensaios de resistência à tração na flexão foram utilizados corpos de prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 40 cm.

O traço utilizado para composição do UHPC foi, na seguinte proporção 1: 1,1: 0,1: 0,194: 0,19: 0,04 para os respectivos materiais: cimento, areia de quartzo, pó de quartzo, sílica, relação a/c e aditivo. Para as fibras de aço foi utilizado o teor de 1,86% e para as fibras de PVA foi utilizado o teor de 0,14%. Este traço foi encontrado após uma otimização feita na análise do Delineamento Composto Central Rotacional de 2², aplicado em (Jacintho et. al., 2024).

Como resultado dos ensaios de resistência à compressão axial, foi obtida a média de 132,01 MPa, módulo de elasticidade de média de 45,22 GPa.

Para se obter a resistência à tração, foram realizados dois tipos de ensaios de flexão, ensaio de três pontos, como mostrado na Figura 13 e ensaio de quatro pontos. Esses ensaios foram realizados conforme a NF P18 470 (AFNOR, 2016) e a prática recomendada Jacintho, et.al. (2022).

As equações 13 e 14 foram utilizadas.

$$f_{ct,fl} = \frac{3.Fl}{b.a} \text{ (MPa)} \quad (13)$$

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \left[\frac{K.a^{0,7}}{1+K.a^{0,7}} \right] \text{ (MPa)} \quad (14)$$

Com $K = 0,08$ (NF P18 470, 2016). Tem-se os seguintes parâmetros:

$a = 100,215$ mm (largura)

$b = 100,105$ mm (altura)

$F = 40,67$ kN

$Def = 0,106166$ mm

$f_{ct,fl} = 13,96$ MPa

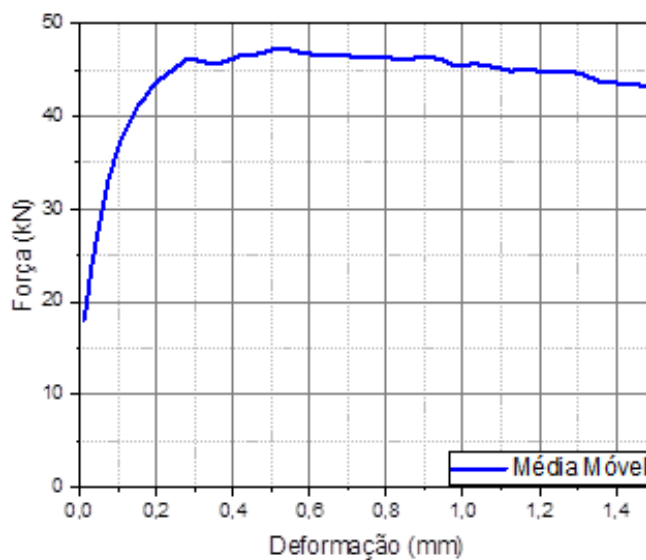
Figura 13: Ensaio de três pontos.



Fonte: Jacintho, et.al. (2022)

Para o ensaio de resistência a tração na flexão de 3 pontos foi obtido por Jacintho, et.al. (2022) o seguinte gráfico representado na Figura 14 pela média obtida dos 3 corpos de prova, em que o eixo horizontal (eixo x) demonstra a abertura de fissura medida durante o ensaio.

Figura 14: Ensaio de resistência a tração.



Fonte: Jacintho et. al. (2022).

Como dados para este trabalho foram obtidas uma força média de 45,0kN e uma deformação de 0,2mm.

4.2 Descrição da Análise Numérica

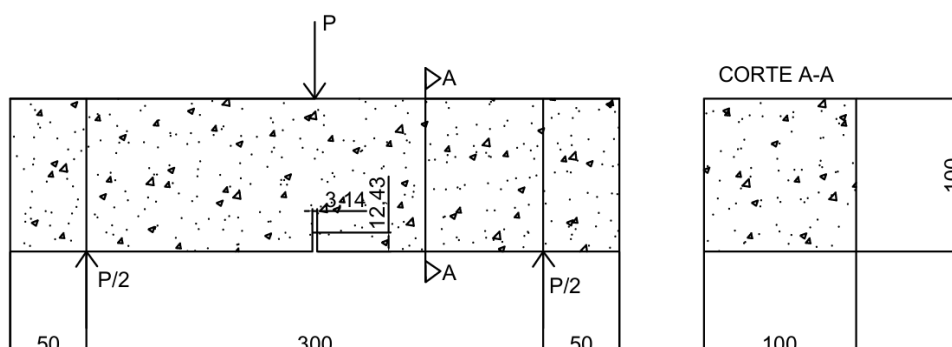
Foi utilizado o software ABAQUS para simular o comportamento à flexão de corpos de prova prismáticos e de vigas armadas e não armadas de UHPC.

O modelo constitutivo empregado foi o modelo CDP (Concrete Damage Plasticity), que se mostrou eficaz para representar o comportamento do material de ultra alto desempenho à compressão e à tração. Além disso, a literatura (Bahraq et al., 2019, Shafieifar; Farzad; Azizinamini, 2017 e Al-Osta et al., 2017) indica que o (CDP) pode ser utilizado para modelar tanto concreto convencional quanto UHPC no ABAQUS, com baixo índice de divergência. Isso reforça a escolha do CDP como uma abordagem confiável para capturar os complexos comportamentos de dano e plasticidade em simulações numéricas de materiais cimentícios.

A calibração do software, ou análise paramétrica, foi realizada com a simulação do ensaio de resistência à tração na flexão de 3 pontos com entalhe, utilizando os dados fornecidos pela parte experimental de Jacintho et al. (2024) e Santos (2023).

As dimensões básicas do prisma utilizado nos ensaios de flexão foram 100mm x 100mm x 400mm, com um entalhe central (no caso do ensaio de 3 pontos) calculado como a média das medidas dos três prismas moldados resultando em 3,4mm x 12,4mm. O vão do ensaio entre os apoios foi estabelecido experimentalmente em 300mm, conforme Figura 15.

Figura 15: Ensaio de resistência a tração



Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 10 – Medidas reais dos corpos de prova prismáticos do ensaio de flexão com 3 pontos.

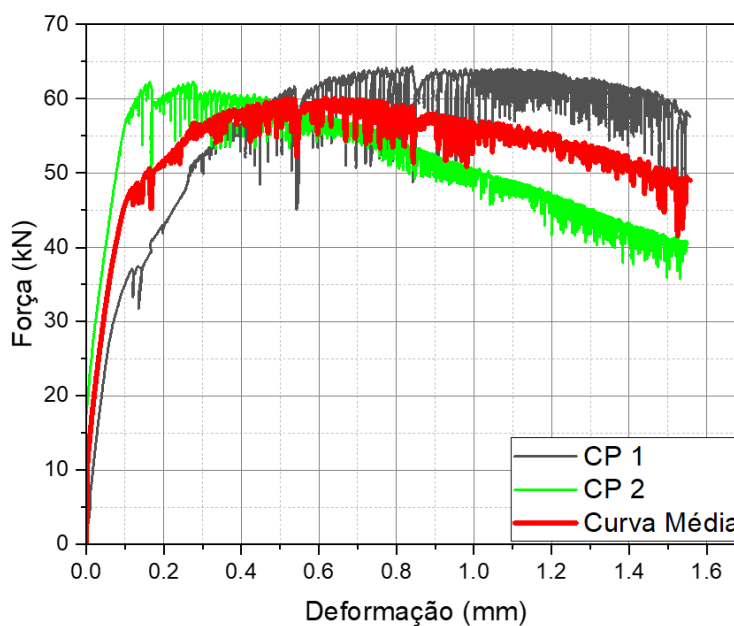
CP	Dimensões Médias	
	Larguras	Alturas
1	98,27	100,29
2	102,16	99,92
3	103,79	100,46
Média	100,215	100,105

Fonte: Jacintho et al. (2024) e Santos (2023).

Para os ensaios de 3 pontos, as medidas reais dos prismas foram coletadas para o cálculo da resistência à tração no limite da elasticidade, o $f_{ct,el}$, demonstradas na Tabela 10.

Os dados limites da fase elástica foram calculados segundo a norma francesa NF P 18 470 (AFNOR, 2016). A resistência de pico na fase elástica, $f_{ct,fl}$ é obtida da curva média dos ensaios experimentais de 4 pontos, como sendo o ponto limite do gráfico apresentado na Figura 16 para a força máxima aplicada.

$$f_{ct,fl} = \frac{3.Fl}{b.a} \text{ (MPa)} \quad (15)$$

Figura 16: – Curvas experimentais e curva média obtidas no ensaio de flexão à 4 pontos dos prismas

Fonte: Jacintho et al. (2024).

Para a força de 46,64kN, foi encontrada a resistência $f_{ct,fl}$ de 13,96MPa. Com esta resistência, foi calculada a correspondente resistência à tração do UHPC da pesquisa de Santos (2023) e Jacintho et al. (2024), definida como $f_{ct,el}$ pela norma francesa NF P 18 470 (AFNOR, 2016). Seu valor foi de $f_{ct,el} = 9,32\text{MPa}$, usando a equação 16.

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \left(\frac{K.a^{0,7}}{1+K.a^{0,7}} \right) \text{ (MPa)} \quad (16)$$

O módulo de elasticidade médio foi obtido nos ensaios e o coeficiente de Poisson foi adotado segundo indicação da NF P 18 710 (AFNOR, 2016) e da Prática Recomendada ABECE/IBRACON (Jacintho et. al. (2022)):

E_c - Módulo de elasticidade de 45,22GPa

ν - Coeficiente de Poisson de 0,2

4.3 ABAQUS

O concreto, um material compósito amplamente utilizado na construção civil, exibe um comportamento complexo e não linear sob diferentes tipos de carregamento e o UHPC não é diferente. Essa não linearidade é inerente à sua natureza heterogênea, sendo influenciada pela presença de fissuras, vazios e pelas interações entre seus componentes, como agregados, pasta de cimento e água (CAE Assistant, 2025). Compreender esse comportamento é crucial para prever com precisão como as estruturas de concreto se comportarão sob diferentes cenários de tensão, garantindo a segurança e o desempenho das construções.

Segundo o CAE Assistant,2025, a não linearidade do concreto se manifesta principalmente em:

- Compressão em que o concreto demonstra alta resistência à compressão, mas, ao ultrapassar um certo limite de tensão, começa a apresentar comportamento não linear, marcado pelo surgimento de microfissuras e, eventualmente, pelo esmagamento do material.
- Tração em que o concreto é relativamente fraco sob tensão, e sua resposta não linear é amplamente governada pelo início e

propagação de fissuras. A resistência à tração é uma fração significativa da resistência à compressão, e o comportamento pós-fissuração é crucial para a durabilidade e integridade estrutural.

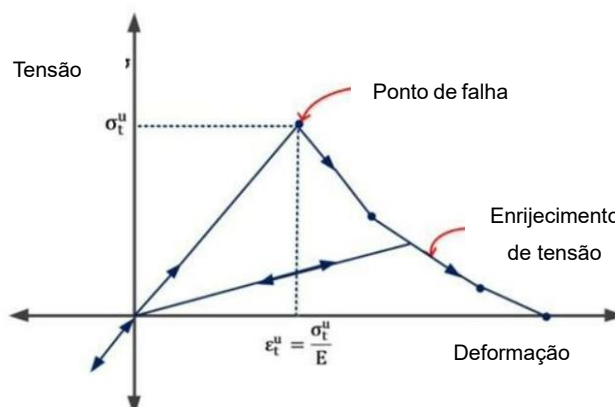
- Cisalhamento sendo o comportamento não linear ao cisalhamento surge da interação complexa entre fissuras e o intertravamento dos agregados, resultando em deformações não lineares e potenciais modos de falha complexos.

4.3.1 Análise Numérica do Concreto

O ABAQUS, um software de análise de elementos finitos amplamente utilizado na engenharia estrutural, oferece diversas opções para modelar o comportamento não linear do concreto. Segundo o CAE Assistant, 2025, o comportamento não linear do concreto pode ser modelado por meio de três tipos de modelos de fissuração:

- Modelo de concreto com fissura distribuída (smeared crack concrete model): este modelo é adequado para situações em que o concreto experimenta principalmente deformação monotônica sob baixas pressões de confinamento. Ele representa a fissuração como uma redução contínua das propriedades do material, em vez de modelar fissuras discretas. O comportamento à tração após a ruptura, neste método, é representado por meio do modelo de rigidez à flexão (*tension stiffening effect*), como ilustrado na Figura 17.

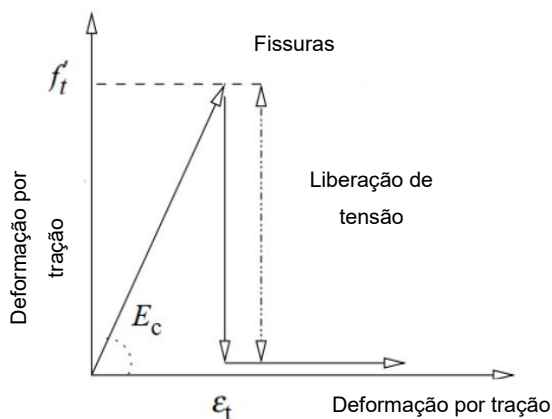
Figura 17: – Modelo de rigidez à flexão (*Tension Stiffening Effect*)



Fonte: CAE Assistant, 2025

Modelo de concreto com fissura frágil (*brittle crack concrete model*): o modelo trata o concreto como um material frágil, focando na formação e propagação de fissuras. Ele é adequado para simular o comportamento de estruturas de concreto sob carregamento de tração, onde a fissuração é o principal modo de falha. O comportamento do *brittle crack concrete model* é demonstrado na Figura 18.

Figura 18: – Concreto com fissuras frágeis.



Fonte: CAE Assistant, 2025

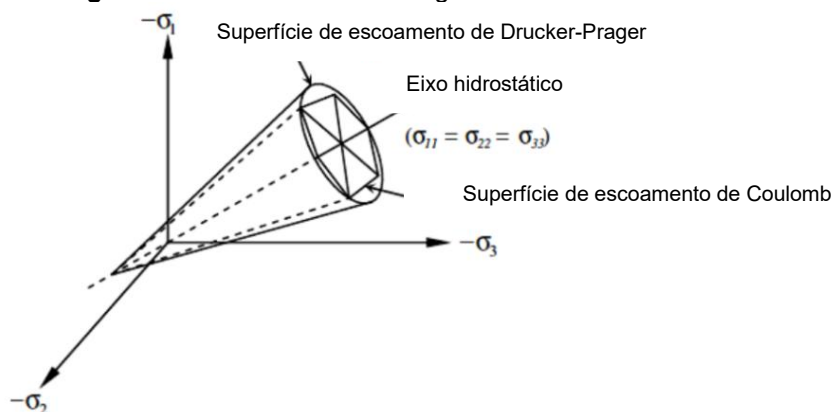
- Modelo *concrete damage plasticity* (cdp): considerado o critério mais preciso para examinar o comportamento não linear do concreto, o modelo CDP leva em conta a fissuração por tração e o esmagamento por compressão, capturando os principais mecanismos de dano no concreto. Este foi o modelo usado nesta pesquisa e está descrito com mais detalhes no próximo item.

4.3.2 Concrete Damage Plasticity (CDP)

Este modelo do Abaqus, usa a função de potencial de falha com base no modelo de Drucker-Prager, que descreve o comportamento do concreto como critério de resistência. A formulação essencial da superfície de potencial plástico no CDP é expressa pela Equação 16, enquanto a representação tridimensional do desvio dos planos de tensão pode ser observada nos planos meridianos, como ilustrado na Figura 19, CAE Assistant, 2025.

$$f(h, r, \theta) = 0 \quad (16)$$

Figura 19: Modelo Drucker-Prager.



Fonte: caeassistant.com

O modelo CDP é baseado nos seguintes princípios:

- **Plasticidade:** O modelo incorpora conceitos de plasticidade para representar as deformações permanentes que ocorrem no concreto sob carregamento.
- **Dano:** O modelo utiliza variáveis de dano para representar a degradação das propriedades do material devido à fissuração e ao esmagamento.
- **Hardening e Softening:** O modelo considera o comportamento de hardening e o de softening do concreto sob compressão, bem como o de softening sob tração.
- **Dependência da Taxa de Deformação:** O modelo pode ser estendido para incluir os efeitos da taxa de deformação no comportamento do concreto.

O modelo CDP é constituído pelos seguintes parâmetros:

- **Ângulo de Dilatação (Ψ):** Descreve a deformação plástica do concreto sob cisalhamento. Quando Ψ é zero, não há variação volumétrica. Essencialmente, Ψ correlaciona deformação volumétrica e de cisalhamento (Equação 17). Materiais sensíveis à pressão, como o concreto, têm tipicamente $\Psi \approx 20^\circ$ (maior que seu atrito interno, $\approx 12^\circ$).

O confinamento em concreto armado pode variar Ψ 20° a 40°. Um Ψ menor indica comportamento frágil, um maior, dúctil.

$$\psi = -\frac{\delta_{\epsilon v}}{\delta_y} \quad (17)$$

- Excentricidade (ϵ): Define a forma da superfície de potencial plástico, conforme Bazant e Jirasek, 2002. Para um concreto de resistência à compressão de $f_{cm} = 41,39\text{MPa}$, $f_{ctm} = 3,59\text{MPa}$, $f_{b0} = 1,117 \times f_{cm}$ são calculados os seguintes valores $m = 0,521$, $\epsilon = 0,027$ através das equações 18 e 19.

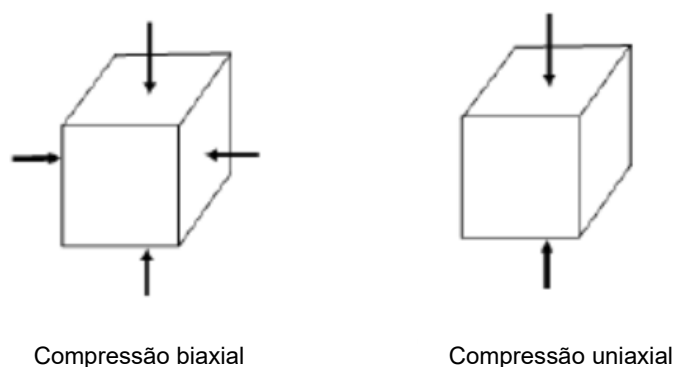
$$m = \frac{1 + \epsilon}{2 - \epsilon} \quad (18)$$

$$\epsilon = \frac{f_{ctm}}{f_{b0}} \frac{f_{b0}^2 - f_{cm}^2}{f_{cm}^2 - f_{ctm}^2} \quad (19)$$

O modelo CDP utiliza a excentricidade do potencial de fluxo para controlar a sensibilidade do ângulo de dilatação às variações na pressão de confinamento. O valor padrão (0,1) implica que o material mantém um ângulo de dilatação aproximadamente constante em uma ampla gama de pressões de confinamento. Valores significativamente inferiores ao padrão podem levar a problemas de convergência nas análises realizadas no Abaqus, especialmente quando o material é submetido a condições de baixo confinamento, como é o caso, por exemplo, de elementos estruturais de UHPC sem armadura.

A relação entre as tensões de escoamento compressivas biaxiais e uniaxiais $\left(\frac{f_{b0}}{f_{c0}}\right)$ é um parâmetro que caracteriza a função de falha no modelo de Plasticidade de Danos do Concreto. Esse parâmetro corresponde a relação entre a tensão biaxial e a tensão uniaxial à compressão do. O valor padrão geralmente utilizado é 1,16; no entanto, a literatura sugere valores entre 1,16 e 1,25, dependendo da resistência do concreto e do grau de confinamento aplicado, conforme Figura 20.

Figura 20: Tensões de compressão uniaxial e biaxial.

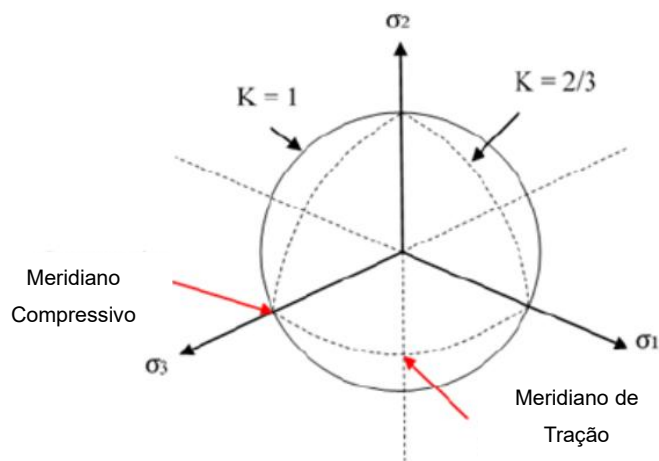


Fonte: Pamin et al., 2019

- Razão do Segundo Invariante de Tensão no Meridiano de Tração para Aquele no Meridiano de Compressão (K) é um parâmetro fundamental para caracterizar a configuração do plano das tensões desviantes e o ângulo de confinamento do material. Quando o plano desviante apresenta uma forma triangular, isso indica um baixo nível de confinamento do concreto. Por outro lado, uma forma circular do plano desviante está associada a um maior grau de confinamento.

O parâmetro K geralmente é definido em um intervalo entre 0,6667 e 1. No entanto, alguns pesquisadores sugerem um valor máximo de 0,8. O valor padrão adotado, na maioria dos casos, é 0,6667, conforme Figura 21.

Figura 21: $K=2/3$ correspondendo à formulação de Rankine e $K=1$ correspondendo ao critério de Drucker-Prager



Fonte: Pamin et al., 2019

- Parâmetro de Viscosidade (μ): Ajuda a melhorar a convergência do modelo no regime de amolecimento, em modelos avançados de materiais, a obtenção de convergência durante a análise de tensões de tração e degradação da rigidez costuma ser um grande desafio. Uma abordagem comum para contornar essa dificuldade é a utilização de equações de regularização viscoplástica, que avaliam a rigidez tangente do material considerando o seu comportamento de amolecimento.

No Abaqus, é adotada a regularização de Duvaut-Lions, 1976, que utiliza tensores de deformação relativa para simular a degradação da rigidez em função dos efeitos viscosos. Ao aplicar a regularização viscoplástica com um valor reduzido para o parâmetro de viscosidade, é possível aumentar a taxa de convergência do modelo na fase de softening, sem comprometer a precisão dos resultados. Vale ressaltar que, no ABAQUS, o valor padrão desse parâmetro é zero, o que significa que a regularização viscoplástica não é aplicada por padrão. Nesta pesquisa foi aplicado o valor de 0,0001, próximo de zero.

A modelagem numérica do comportamento do UHPC sob flexão desta pesquisa foi realizada utilizando o modelo Concrete Damage Plasticity (CDP) no software ABAQUS. Este modelo, amplamente utilizado na literatura para simular o comportamento de materiais cimentícios (Fakeh et al., 2023; Li et al., 2023), permite a consideração dos efeitos de dano e plasticidade no material, como descrito.

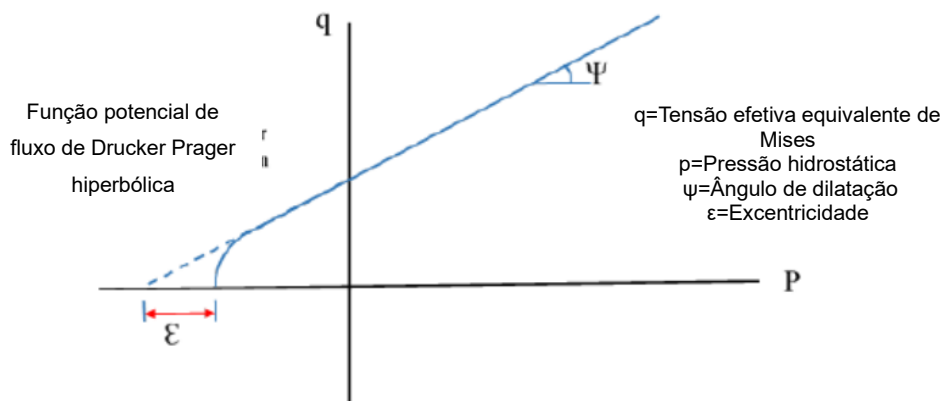
A determinação das deformações plásticas é derivada da função do potencial plástico, que no modelo CDP assume um fluxo não associativo. A função hiperbólica de Drucker-Prager (Equação 20) é utilizada para descrever o potencial plástico em termos de tensões efetivas:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (20)$$

onde σ_{t0} representa a tensão de escoamento de tração no estado uniaxial, ϵ é a excentricidade que define a taxa de aproximação da função hiperbólica a uma reta assintótica, e ψ é o ângulo de dilatação medido no plano meridional sob alta pressão de confinamento (Figura 22).

A Figura 22 ilustra o plano meridional e a representação do ângulo de dilatação, permitindo uma visualização geométrica do comportamento do material sob diferentes estados de tensão.

Figura 22: Ângulo de dilatação e excentricidade a partir do plano meridiano.



Fonte: Pamin et al., 2019

4.3.3 Comportamento Não Linear à Tração

Para modelar o comportamento tensão x deformação à tração do concreto, é necessário considerar o comportamento pós-falha. Isso é obtido por meio do *strain softening*. Para definir esse comportamento no ABAQUS, é preciso inserir os valores do módulo de Young (E_0), tensão (σ_t), deformação de fissuração (ϵ_{cr}) e o parâmetro de dano (d_t), que varia de zero a um (CAE Assistant, 2025). O strain softening representa a redução da resistência do concreto após o início da fissuração.

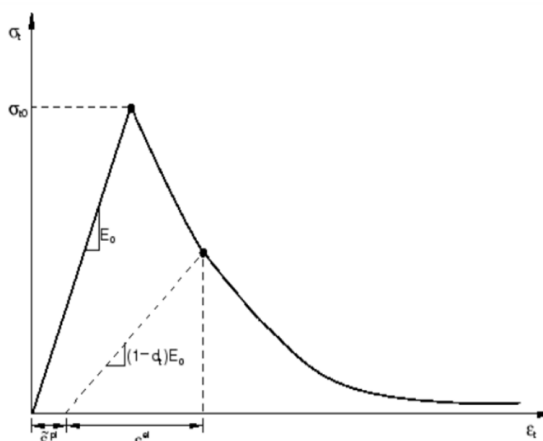
Como ilustrado na Figura 23, quando o corpo de prova de concreto é descarregado a partir de qualquer ponto localizado no ramo de softening da curva tensão-deformação, observa-se uma resposta de descarregamento enfraquecida: a rigidez elástica do material demonstra-se comprometida ou degradada. Essa degradação da rigidez elástica apresenta diferenças marcantes entre os ensaios de tração e de compressão e torna-se mais significativa conforme a deformação plástica aumenta.

A variável de dano d_t é a responsável por quantificar essa degradação da rigidez elástica. Os valores dessa variável variam de zero, indicando material íntegro, até um, que representa a perda total de resistência do material.

De acordo com as regras apresentadas, se E_0 representa a rigidez elástica inicial (não danificada) do material, a relação tensão-deformação sob carregamento de tração pode ser expressa pela equação 21.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon^{pl}_t) \quad (21)$$

Figura 23: Modelo de tração do concreto.



Fonte: CAE Assistant, 2025

4.3.4 Comportamento Não Linear à Compressão

Para definir o comportamento à compressão do concreto no ABAQUS, é preciso inserir os valores de tensão (σ_c), as deformações inelásticas correspondentes (ε_{in}), e as propriedades de dano (d_c) deve ser inserido de acordo com a Figura 24. O modelo CDP utiliza curvas de endurecimento e amolecimento para representar o comportamento do concreto sob compressão, capturando os efeitos da plasticidade e do dano. Os valores de deformação total podem ser convertidos em deformações inelásticas a partir das equações 22 e 23.

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (22)$$

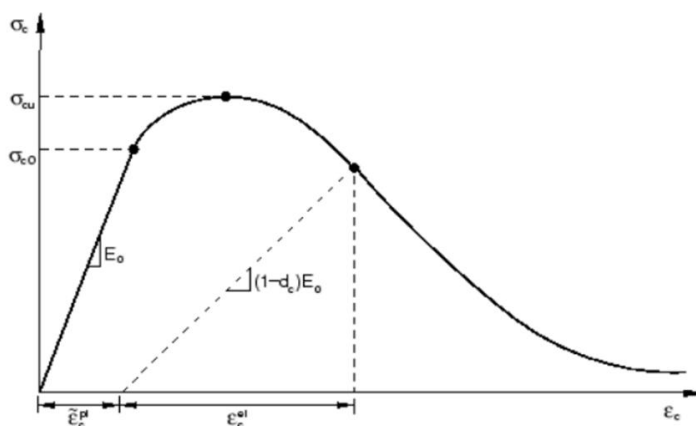
$$\varepsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (23)$$

A degradação da rigidez elástica no modelo CDP é representada pela variável de dano (d_c). Essa variável pode variar de zero, indicando um material totalmente íntegro, até um, que corresponde à completa perda de resistência do material.

Considerando E_0 representa a rigidez elástica inicial (não danificada) do material, a relação tensão-deformação sob carregamento de compressão pode ser descrita pela equação 24.

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (24)$$

Figura 24: Resposta do concreto à carga uniaxial em compressão.



Fonte: CAE Assistant, 2025

4.3.5 Análise de Fissuração no Concreto

A análise de fissuração é um aspecto importante na engenharia de estruturas de concreto. O CAE Assistant, 2025 destaca que a análise de fissuração auxilia na determinação de onde as fissuras ocorrem, como elas se propagam e se são fissuras de tração ou cisalhamento.

Em geral, existem dois tipos de fissuras em corpos de prova de concreto:

- Fissuras de Tração: Geradas como resultado da tensão normal, atuam perpendicularmente ao plano da fissura.
- Fissuras de Cisalhamento: Formam-se em vigas de concreto perto dos apoios, com um ângulo entre 30° e 45° em relação ao eixo da viga.

4.4 Dados Experimentais Incorporados na Análise Numérica

Na primeira etapa da pesquisa foi realizada uma análise paramétrica utilizando um prisma com as medidas de 10 cm x 10 cm x 40 cm submetido à flexão em 3 pontos, conforme Figura 13.

A simulação da não linearidade do concreto foi realizada por meio do modelo CDP, estruturado em duas etapas: no estágio elástico, foram adotados um módulo de elasticidade de 45,22 GPa (valor obtido na pesquisa de Santos, 2023 e Jacintho et al., 2024) para o UHPC e uma razão de Poisson de 0,2 (adotado segundo indicação da norma NF P 18 710 (AFNOR, 2016)); já no estágio plástico com dano, foram definidos os parâmetros plásticos do material, incluindo as curvas tensão-deformação para compressão e tração uniaxiais conforme ensaios experimentais obtidos por Santos (2023) e Jacintho et al. (2024).

A Tabela 11 apresenta os valores específicos desses parâmetros, com base na dissertação da Oliveira (2019). No entanto, para o coeficiente de viscosidade (μ), os ensaios de parametrização realizados com o prisma demonstraram que o valor de 0,0001 proporcionou a melhor convergência e representação do comportamento experimental, sendo este o valor adotado. Os detalhes desses testes e seus resultados são apresentados na Tabela 23 da Seção 5.1. O valor adotado foi definido através da tentativa 14.

Tabela 11. Parâmetros do modelo CDP utilizado.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Oliveira (2019)

4.5 Verificação da Flexão em Vigas de UHPC

O UHPC é um material diferenciado pela quantidade de fibras adicionadas ao compósito cimentício, provendo propriedades ao concreto, como maior resistência à tração, dando condições de se usá-lo em elementos estruturais submetidos à flexão, sem armadura (metálica ou não metálica). Por isso neste trabalho objetivou-se a análise do UHPC sem armadura em uma viga modelada numericamente, comparando

a sua resistência à flexão com uma viga armada com barras de aço, modelada numericamente.

Na verificação de Estado Limite Último (ELU) para flexão, a condição de segurança é cumprida quando $M_{ud} \geq M_{sd}$. Ou seja, o momento fletor solicitante é determinado a partir das cargas permanentes e variáveis impostas e ele deve ser menor ou no máximo igual ao momento resistente último.

O comportamento da viga em UHPC sob flexão assemelha-se ao de uma viga em concreto convencional quanto à capacidade de suportar compressão, porém, na zona tracionada, leva-se em consideração a resistência do UHPC. A resistência calculada à compressão deve ser obtida seguindo a equação (20), adotando o coeficiente $\gamma_c = 1,5$ conforme estabelecido pelas diretrizes da norma francesa.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (20)$$

O parâmetro α_{cc} leva em consideração os efeitos de longo prazo na resistência à compressão, bem como os efeitos negativos da forma como a carga é aplicada.

Para esta análise foram utilizadas a pesquisa realizada em Oliveira, 2019 e alguns dados obtidos em ensaios de laboratório, realizados na pesquisa de Santos, (2023) e Jacintho et. al. (2024).

A análise da resistência de vigas em UHPC sem armadura pode ser feita de acordo com as prescrições da NF P18 710 (AFNOR, 2016) e da Prática Recomendada ABECE/IBRACON (Jacintho et. al. (2022)).

Ao determinar o momento resistente final de elementos em UHPC (não armados, armados ou protendidos), as seguintes suposições são feitas:

- As seções planas permanecem planas.
- Para um determinado estado de deformação, a tensão de compressão ou de tração para o UHPC são consideradas a partir dos diagramas apresentados nas

No caso tem-se:

- B** - Deformação de compressão limite do UHPC;
- C** - Deformação de compressão pura limite do UHPC;
- F** - Deformação de tração limite do UHPC;

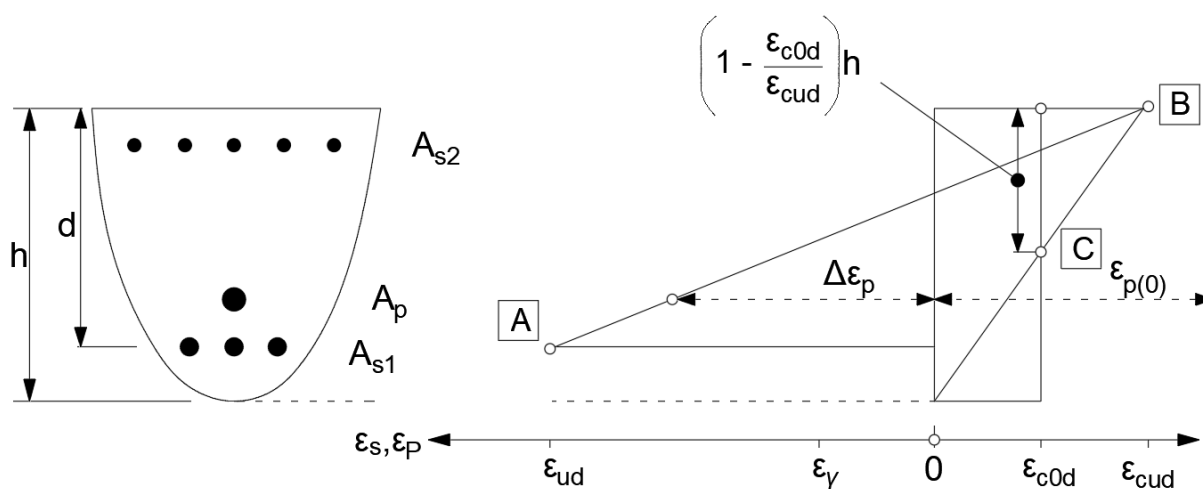
Ponto B: o ponto B se refere à deformação limite de encurtamento ϵ_{cud} do UHPC na fibra mais comprimida da seção.

Ponto C: o ponto C refere-se à deformação limite de encurtamento ϵ_{c0d} do UHPC sob compressão para a peça submetida apenas à compressão axial.

Ponto F: quando a relação constitutiva de tração escolhida para o cálculo não possuir ramo descendente (por exemplo a relação constitutiva convencional para classe T3* ou relações constitutivas convencionais para elementos delgados), o ponto F refere-se ao limite de alongamento $\epsilon_{u,lim}$ do UHPC na fibra mais tracionada da seção.

No caso do UHPC armado e/ou protendido, os limites dos pontos são mostrados na Figura 20.

Figura 26: Diagrama de deformações admissíveis no Estado Limite Último para UHPC armado e/ou protendido



Fonte: NF P 18 710 (AFNOR, 2016)

- A** - Deformação de tração limite na armadura;
- B** - Deformação de compressão limite do UHPC;
- C** - Deformação de compressão pura limite do UHPC;

Ponto A: o ponto A refere-se à deformação final da armadura.

Ponto B: o ponto B se refere à deformação limite de encurtamento ϵ_{cud} do UHPC na fibra mais comprimida da seção.

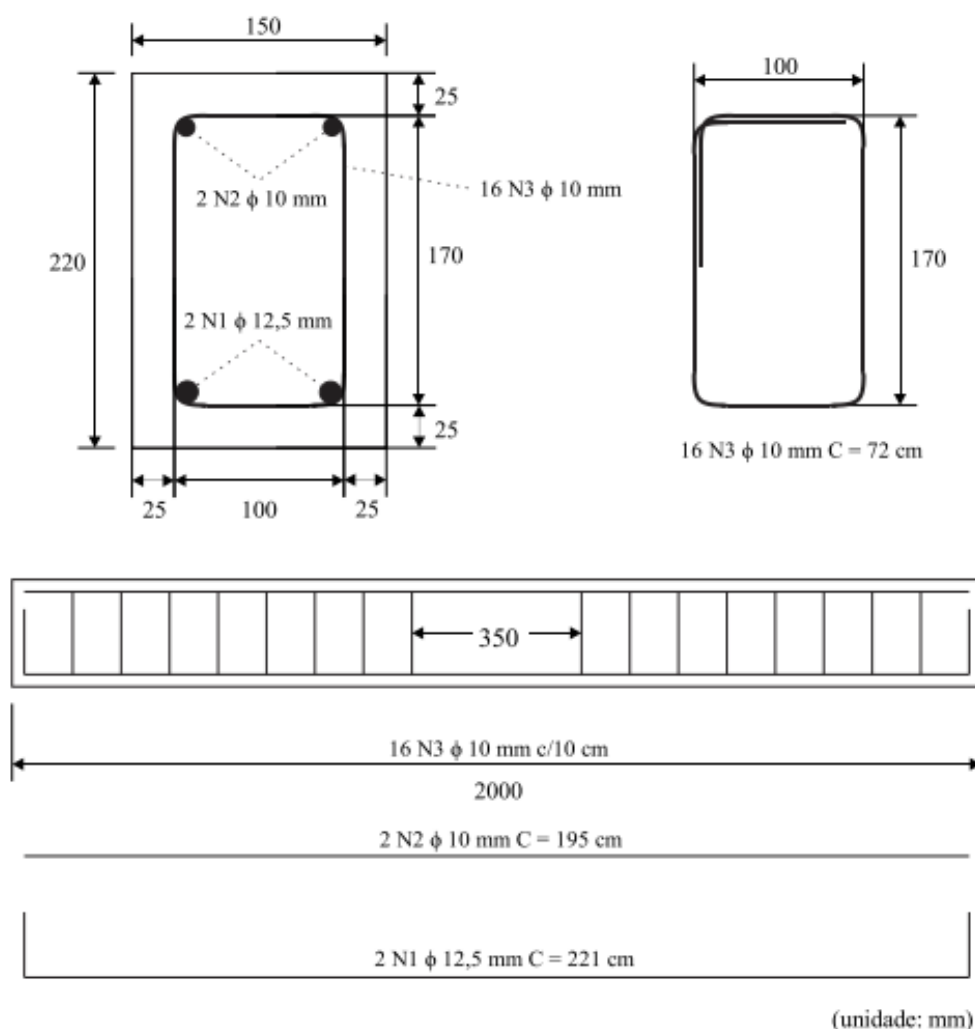
Ponto C: o ponto C refere-se à deformação limite de encurtamento ϵ_{c0d} do UHPC sob compressão para a peça submetida à compressão axial.

Ambas as vigas (com e sem armadura) foram modeladas em elementos finitos no programa ABAQUS, calibrado com as análises iniciais aqui apresentadas, para fins de comparação das tensões últimas.

Para a análise do comportamento à flexão das vigas em UHPC, esta dissertação adotou as dimensões geométricas (base, altura e comprimento) e a taxa de armadura utilizadas por Oliveira (2019) (ver Figura 27)

As características das armaduras longitudinais e transversais utilizadas nas vigas em análise, em conformidade com a pesquisa de Oliveira (2019), estão sumarizadas na Tabela 12.

Figura 27: Geometria, dimensões e detalhamento das vigas (Oliveira, 2019)



Fonte: Oliveira (2019).

Tabela 12: Características das armaduras de aço utilizadas nas vigas (Oliveira, 2019).

Armadura de aço	Nomenclatura	d_s (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)	ν_s
Longitudinal	N1	12,5	122,7	540	200	0,3
	N2	10	78,5	553	200	0,3
Transversal	N3	10	78,5	553	200	0,3

sendo: d_s o diâmetro, A_s a área da seção transversal, f_y a resistência ao escoamento, E_s o módulo de elasticidade e ν_s o coeficiente de Poisson da armadura.

Fonte: Oliveira (2019).

A Tabela 12 detalha o diâmetro (ϕ_s), a área da seção transversal (A_s), a resistência ao escoamento (f_y), o módulo de elasticidade (E_s) e o coeficiente de Poisson (ν_s) para cada tipo de armadura. A utilização de aço CA-50, tanto para as armaduras longitudinais quanto para as transversais, garante a comparabilidade dos resultados com o estudo de Oliveira (2019).

Em relação à armadura transversal (estribos), a pesquisa seguiu a metodologia proposta por Yoo e Yoon (2015) apud Oliveira (2019), que alocaram estribos ao longo de todo o comprimento das vigas de UHPC. Essa decisão foi tomada com base nos resultados obtidos por Yoo (2014) apud Oliveira (2019), que demonstrou que a ausência de estribos leva a um modo de falha misto, envolvendo tanto a flexão quanto o cisalhamento.

Ao contrário do estudo de Yoo (2014) apud Oliveira (2019), que investigou o comportamento de vigas sem armadura transversal, a pesquisa de Oliveira (2019) buscou analisar o comportamento à flexão de vigas com estribos, garantindo que a falha ocorresse predominantemente por flexão.

Para descrever o comportamento não linear do aço, foi empregado para o critério de plasticidade o modelo elastoplástico proposto por Earls (1999). O modelo de Earls (1999) é uma representação da relação tensão-deformação empregada para descrever o comportamento mecânico de aços de alta resistência caracterizados pela presença de um patamar de escoamento.

Na modelagem numérica da matriz de UHPC, optou-se pela utilização de elementos sólidos lineares tridimensionais com oito nós e integração reduzida, designados como C3D8R no software ABAQUS. Essa escolha justifica-se pela sua capacidade de representar o comportamento tridimensional do material com um custo computacional relativamente baixo.

4.5.1 Modelagem Numérica das Vigas

Para a análise numérica do comportamento à flexão das vigas em UHPC, tanto armadas quanto não armadas, empregou-se o software ABAQUS, seguindo uma abordagem de macroescala. Nesta modelagem, o Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) foi tratado como um material homogêneo, cujas propriedades

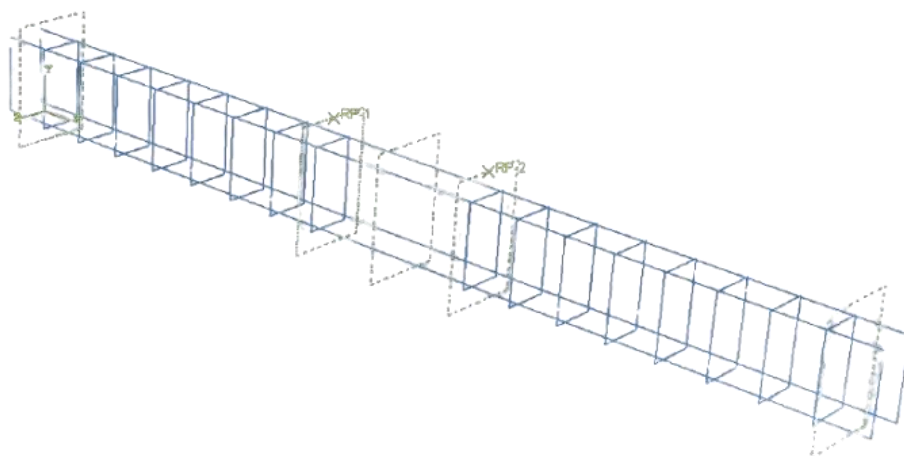
foram definidas pelo modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP), conforme detalhado na Seção 4.4.3. As armaduras, por sua vez, foram consideradas como elementos distintos, com suas características próprias.

A matriz de UHPC foi realizada utilizando elementos finitos sólidos tridimensionais do tipo C3D8R, com uma malha aproximada de 15 mm. Para a representação das armaduras de aço, foram empregados elementos de treliça tridimensionais do tipo T3D2. A Figura 28 ilustra a modelagem da armação de reforço utilizada. A escolha por um modelo tridimensional completo, sem a aplicação de simetria, visou capturar integralmente o comportamento estrutural da viga sob flexão.

As condições de contorno e a aplicação de carga foram configuradas para replicar o ensaio experimental de flexão a quatro pontos. No apoio localizado no lado direito da viga, os deslocamentos foram restringidos nas direções x e y . Já no apoio do lado esquerdo, apenas o deslocamento na direção y foi impedido, simulando, respectivamente, um apoio fixo e um apoio móvel. A força foi aplicada por meio de um deslocamento incremental na direção y , imposto em pontos de referência (RP-1 e RP-2) localizados na área superior da viga. Para garantir a transferência uniforme desses deslocamentos e evitar concentrações de tensões indesejadas na interface de aplicação da carga, utilizou-se a restrição MPC Constraint com o tipo MPC Tie, conectando os pontos de referência à área projetada dos apoios superiores da viga. A Figura 29 apresenta esquematicamente as condições de contorno e a aplicação de carga no modelo.

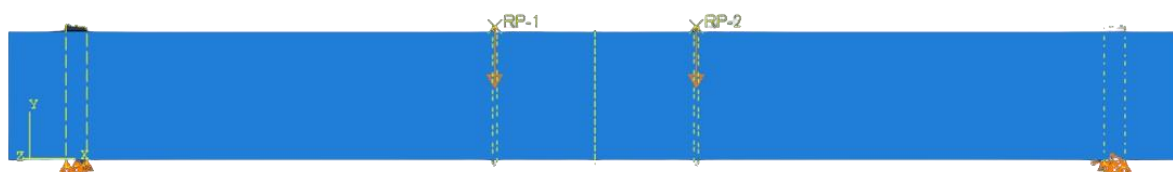
Adicionalmente, para possibilitar a comparação direta com os resultados experimentais, um ponto de monitoramento foi inserido na parte inferior central do vão da viga. Este ponto permitiu a coleta do deslocamento vertical central, fundamental para a validação do modelo numérico.

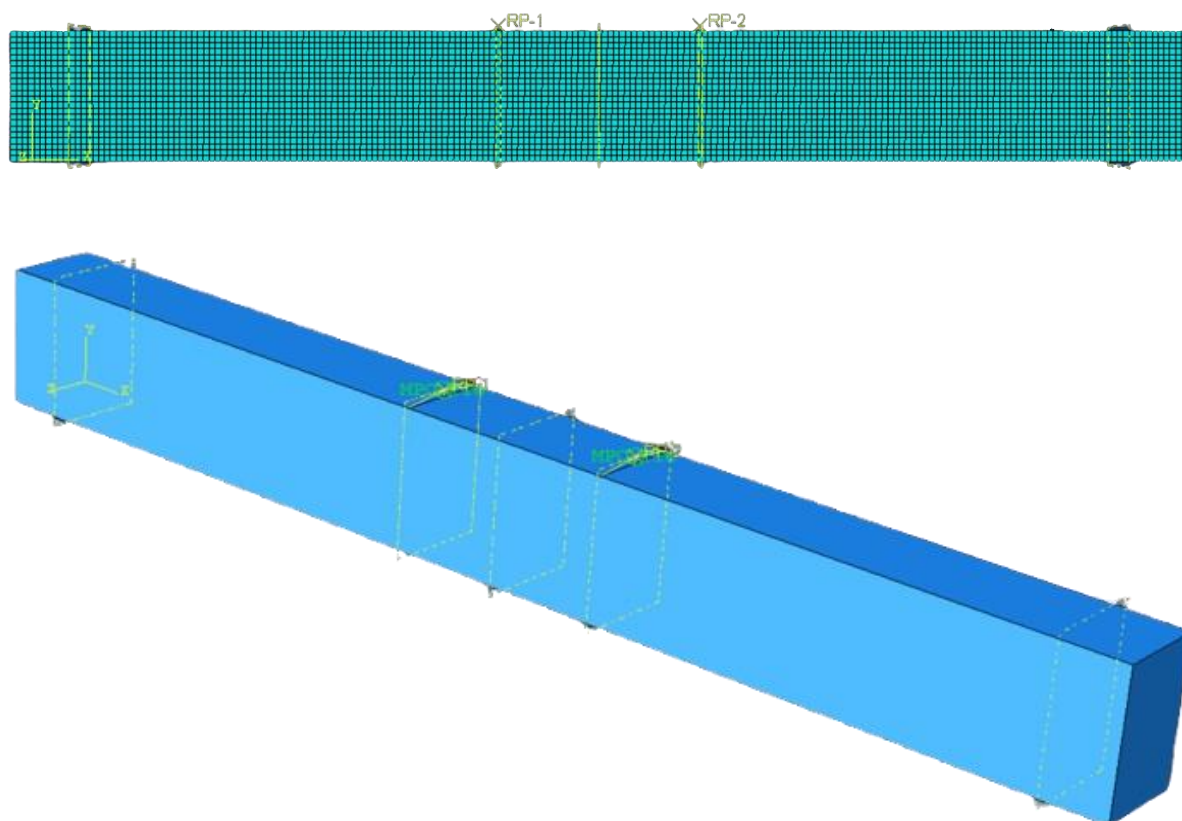
Figura 28: Modelagem da armação de reforço.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Figura 29: Condições de contorno e aplicação de carga na viga modelada.





Fonte: Autoria Própria, 2025.

4.6 Simulação do Comportamento Uniaxial na Compressão

Para a definição do comportamento uniaxial do UHPC sob compressão, a presente pesquisa adotou a norma francesa NF P18-710 (2016), que estabelece diretrizes para o cálculo de estruturas em UHPC. Este modelo da norma francesa é similar ao modelo proposto por Hordijk (1991) e Carreira (1985) para representar a relação tensão-deformação do UHPC, este modelo é comumente usado para analisar concretos convencionais em análise numérica.

A opção pela norma NF P18-710 (2016) justifica-se pela sua abrangência e especificidade para o UHPC, considerando as particularidades desse material em relação ao concreto convencional. Além disso, a norma francesa oferece um conjunto de parâmetros e coeficientes que permitem uma representação mais precisa do comportamento do UHPC sob compressão, o resultado foi definido através das Equações 25 a 31 definidas na norma NF P18-710 (2016).

$$\sigma = f_{cm} \frac{\eta \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,f}}}{\eta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,f}}\right)^{\varphi \cdot \eta}} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{c1,f} = \left[1 + 4 \frac{f_{ctpfm}}{K_{global} \times f_{cm}} \right] \left[1 + 0,16 \frac{k_0}{f_{cm}^2 + 800} \right] \frac{f_{cm}^{2/3}}{k_0} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{cu1,f} = \left[1 + 15 \frac{f_{ctpfm}}{K_{global} \times f_{cm}} \right] \left[1 + \frac{20}{f_{cm}} \right] \left[1 + 0,16 \frac{k_0}{f_{cm}^2 + 800} \right] \frac{f_{cm}^{2/3}}{k_0} \quad (27)$$

$$k_0 = \frac{E_{cm}}{f_{cm}^{1/3}} \quad (28)$$

$$\eta = \frac{k}{k - 1} \quad (29)$$

$$k = E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1,f}}{f_{cm}} \quad (30)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_{c1,f} \\ \frac{\ln \left(1 - \eta + \frac{\eta}{0,7} \frac{\varepsilon_{cu1,f}}{\varepsilon_{c1,f}} \right)}{\eta \times \ln \left(\frac{\varepsilon_{cu1,f}}{\varepsilon_{c1,f}} \right)} & \text{se } \varepsilon > \varepsilon_{c1,f} \end{cases} \quad (31)$$

4.7 Simulação do Comportamento Uniaxial na Tração

Para a definição do comportamento uniaxial do UHPC sob tração, a presente pesquisa usou resultados de ensaios experimentais de tração na flexão de 3 pontos e 4 pontos (Santos, 2023), e com o auxílio da análise inversa proposta na NF P 18 470 (AFNOR, 2016) e na prática recomendada ABECE/IBRACON (Jacintho et. al. (2022)), foi elaborada a curva tensão de tração x abertura de fissura a qual foi usada como dado de inserção no ABAQUS.

No ensaio de 4 pontos é obtida a resistência à tração no limite da elasticidade $f_{ct,el}$. Este ensaio descrito pela norma francesa NF P 18 470 (AFNOR, 2016) é o mesmo ensaio descrito pela norma brasileira para obtenção da resistência à tração na flexão, a ABNT NBR 12142 (2010). No ensaio de 3 pontos, o controle de aplicação da força é feito através da medida da velocidade da abertura da fissura e esse ensaio é descrito na NF P 18 470 (AFNOR, 2016), com o limite da abertura da fissura em 1,5mm. Neste ensaio é obtida a resistência à tração pós fissuração f_{ctpf} mas não de forma direta. É necessário o uso da análise inversa proposta pela NF P 18 470 (AFNOR, 2016) e a prática recomendada ABECE/IBRACON (Jacintho et. al. (2022)) sobre esses resultados experimentais para se chegar na curva pós fissuração de tração direta do UHPC.

Essa escolha difere da abordagem utilizada por Oliveira (2019), que empregou o modelo de Hordijk (1991) para representar a relação tensão-abertura de fissura do UHPC e foi usada como dado de inserção no mesmo programa.

A opção pela norma NF P18-710 (2016) justifica-se pela sua abrangência e especificidade para o UHPC, considerando as particularidades desse material em relação ao concreto convencional.

5. RESULTADOS

5.1 – Análise Paramétrica Do Prisma

A etapa inicial da análise numérica no software ABAQUS foi para calibração do modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP) para representar o comportamento do UHPC caracterizado experimentalmente por Santos (2023) e Jacintho et al. (2024). O objetivo principal desta calibração foi reproduzir a curva força x deslocamento obtida no ensaio experimental de flexão em três pontos com entalhe realizado nos prismas de UHPC, conforme descrito na Seção 4.

Na tabela 13 estão os resultados da calibração e detalha as tentativas realizadas, explorando diferentes combinações de parâmetros do modelo CDP e curvas de entrada para o comportamento do material sob compressão e tração. A geometria do prisma modelado seguiu as dimensões experimentais (100mm x 100mm

x 400mm com entalhe de 3,4mm x 12,43mm e vão de 300mm), e as condições de contorno e aplicação de carga por deslocamento foram implementadas conforme descrito na Seção 4.2. O módulo de elasticidade ($E = 45,22$ GPa) e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,2$) foram mantidos constantes em todas as tentativas, utilizando os valores médios experimentais obtidos por Santos (2023) e Jacintho et al. (2024).

A calibração concentrou-se na variação dos parâmetros plásticos do modelo CDP e na definição das curvas de tensão-deformação para compressão e tensão-abertura de fissura para tração. Os parâmetros do CDP explorados incluíram o Ângulo de Dilatação (Ψ), a Excentricidade (e), a razão f_{b0}/f_{c0} , o parâmetro K e a Viscosidade (μ), cujos papéis no modelo são discutidos na Seção 4.4.3.

A seguir será apresentado uma sequência de tentativas, onde as células destacadas em verde indicam as modificações realizadas em relação à tentativa anterior. Esta abordagem sequencial permitiu investigar sistematicamente a influência de cada parâmetro e curva na resposta numérica do prisma.

Ao longo de todas as tentativas de calibração, alguns parâmetros do modelo CDP foram mantidos constantes. A excentricidade (e) foi definida como 0.1, a razão entre a resistência à compressão sob carga biaxial e a resistência à compressão uniaxial (f_{b0}/f_{c0}) em 1.16, e a razão da segunda tensão invariante de tração compressiva (K) em 0.6667, esses parâmetros não foram alterados.

Para todas as tentativas foi utilizado os seguintes parâmetros para fase elástica.

Módulo de Elasticidade (E): 45220 MPa (equivalente a 45,22 GPa).

Coeficiente de Poisson (ν): 0,2.

Os gráficos de cada tentativa apresentam as curvas de força-deslocamento. As curvas CP1, CP2 e CP3 correspondem às curvas obtidas dos ensaios experimentais dos prismas de UHPC, realizados por Santos (2023) e Jacintho et al. (2024). A Curva Média, por sua vez, é o resultado da média aritmética das curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, servindo como o comportamento experimental de referência que o modelo numérico buscou replicar. A linha nomeada como Série 5 representa a curva de força-deslocamento gerada pelo modelo numérico no ABAQUS após o processo de calibração. O principal objetivo das tentativas foi justamente ajustar os parâmetros do

modelo CDP para que a curva numérica ABAQUS se aproximasse o máximo possível da Curva Média experimental, validando assim a capacidade preditiva do modelo.

As tabelas apresentadas são as diferentes tentativas de calibração, com a descrição dos parâmetros ajustados.

Tentativa 1: Calibração Inicial com Base na NF P 18 710 e Modelo Hordijk (1991).

Esta primeira tentativa serviu como ponto de partida para a calibração. Os parâmetros iniciais do modelo CDP foram definidos com base nas diretrizes de Carreira (1985) para o comportamento em compressão (Figura 31), e o modelo de deslocamento de Hordijk (1991) (Figura 30).

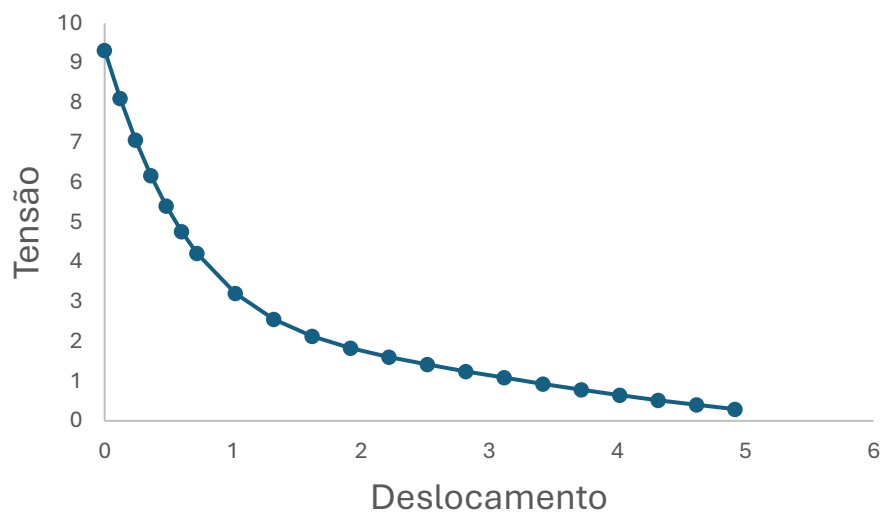
Na Figura 32, são apresentadas as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, juntamente com a curva média derivada dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, representada em roxo.

A Tabela 13 mostra os parâmetros iniciais das tentativas.

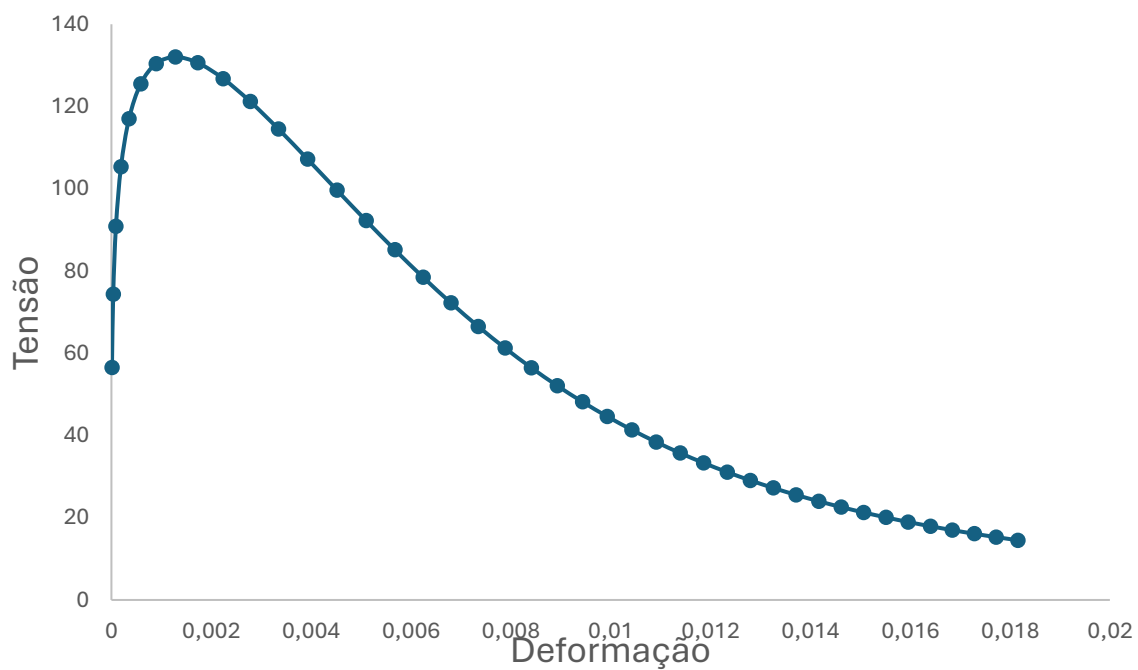
Tabela 13. Parâmetros tentativa 1.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
54°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

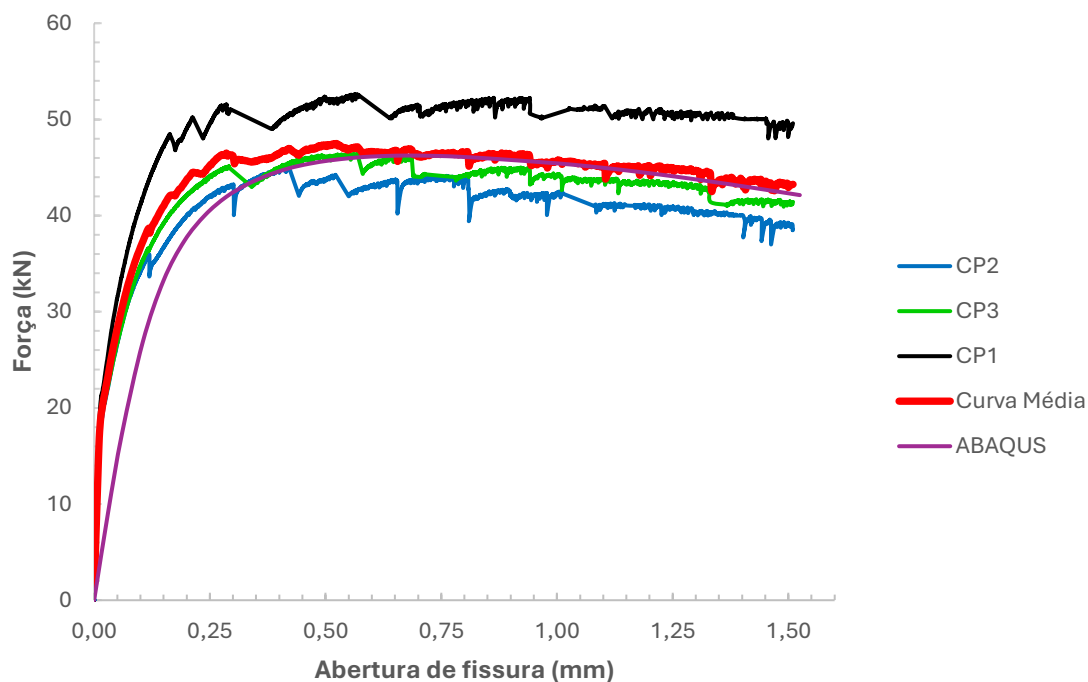
Figura 30: Deslocamento por Hordjik (1991).

Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Compressão por Carreira (1985)

Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa1



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 2:

Diferenças em relação a tentativa 1:

Ângulo de Dilatação (Ψ): 36°

Viscosidade (μ): 0,000001

Sendo a curva de compressão adicionada no ABAQUS a conforme norma NF P18 710 (Figura 33), e para curva de deslocamento utilizada a mesma da Figura 30

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 14.

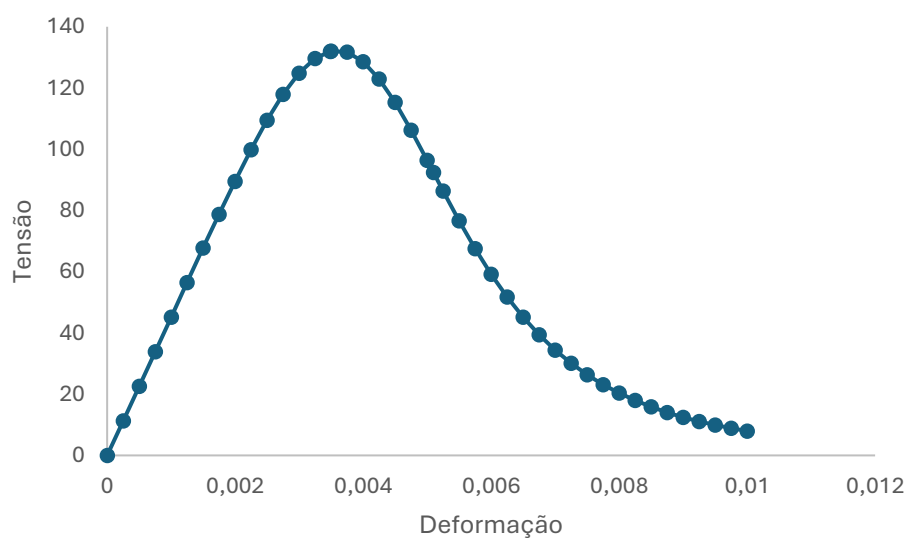
A Figura 34 ilustra as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, acompanhadas pela curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, apresentada na cor roxa.

Tabela 14. Parâmetros tentativa 2.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

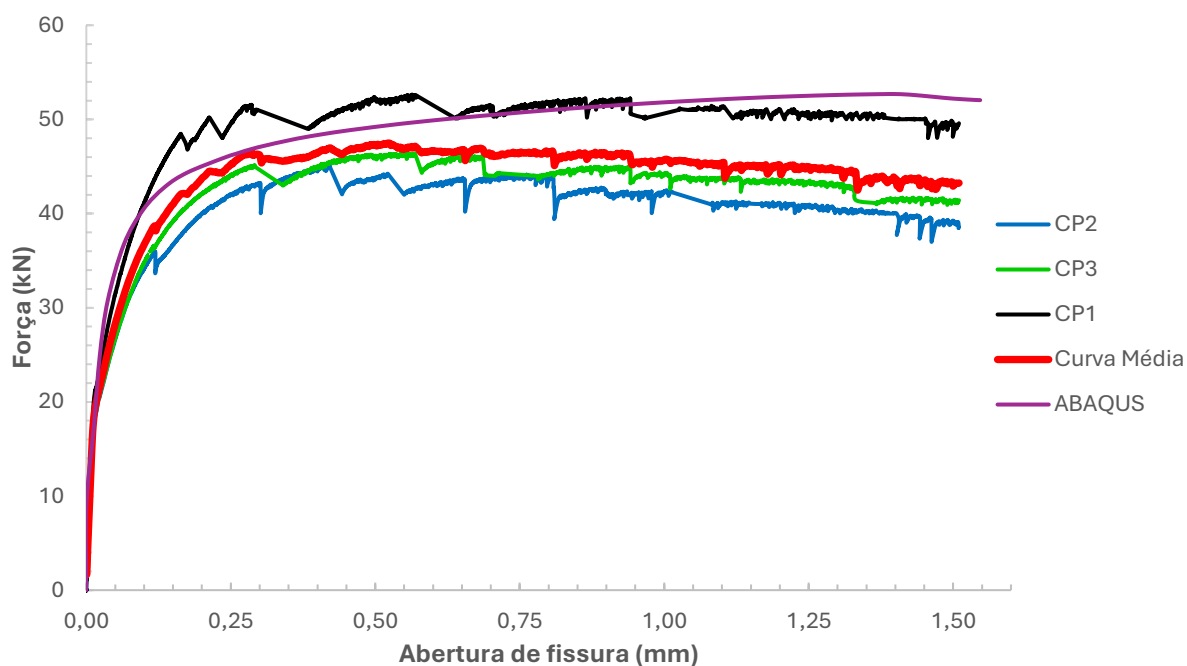
Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Compressão pela NF P18 710.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 2.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 3: Ajuste da Viscosidade.

Diferenças em relação a tentativa 2:

Ângulo de Dilatação (Ψ): 54°

Viscosidade (μ): 0,0001

Sendo a curva de compressão adicionada no ABAQUS a conforme norma NF P18 710 (Figura 33), e para curva de deslocamento utilizada a mesma da Figura 30 (Hordik, 1991).

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 15.

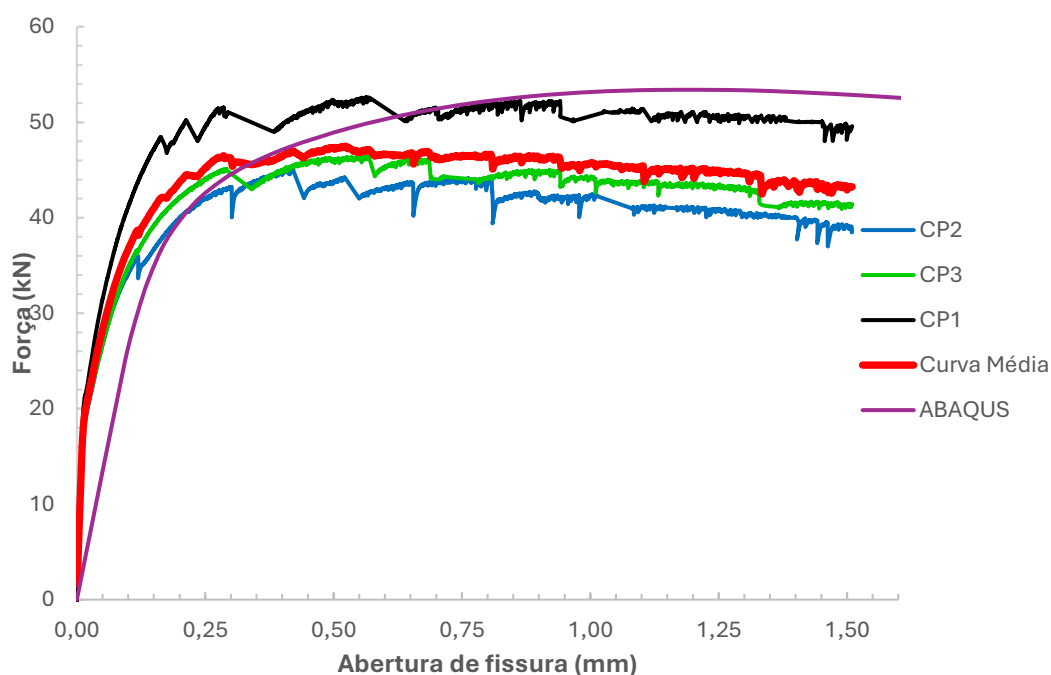
Na Figura 32, são mostradas as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, destacada em roxo.

Tabela 15. Parâmetros tentativa 3.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
54°	0,1	1,16	0,6667	0,0001

Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 3.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 4: Curva NF P 18 710

Diferenças em relação a tentativa 3:

Ângulo de Dilatação (Ψ): 36°

Na quarta tentativa houve a mudança do modelo constitutivo para compressão novamente para NF P 18 710, em que foi definido através de uma reta definidas nas equações apresentadas na Seção 3.7.1., definindo a curva da Figura 36.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 16.

Já para curva de deslocamento utilizada a mesma da Figura 30 (Hordik, 1991).

A Figura 37 apresenta as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, bem como a curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, destacada na cor roxa.

Tabela 16. Parâmetros tentativa 4.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,0001

Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Compressão pela NF P18 710 - Seção 3.7.1

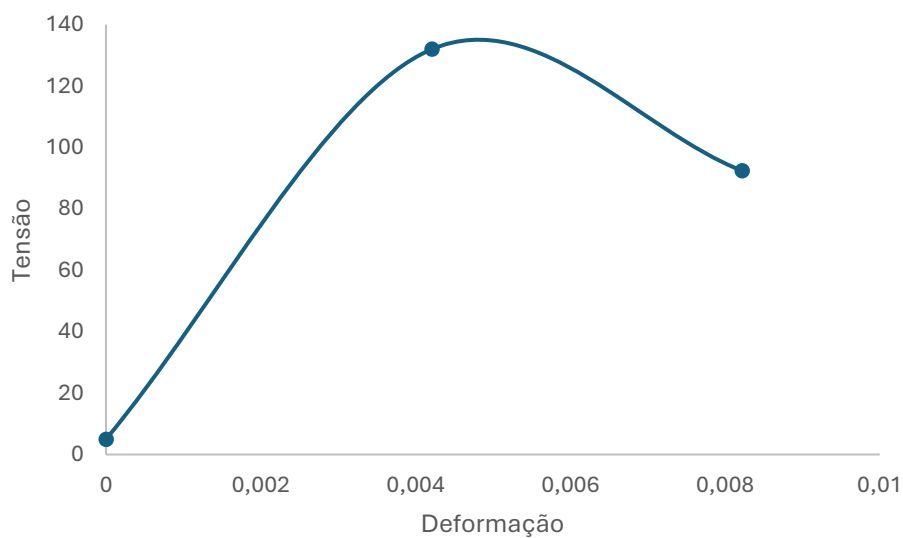
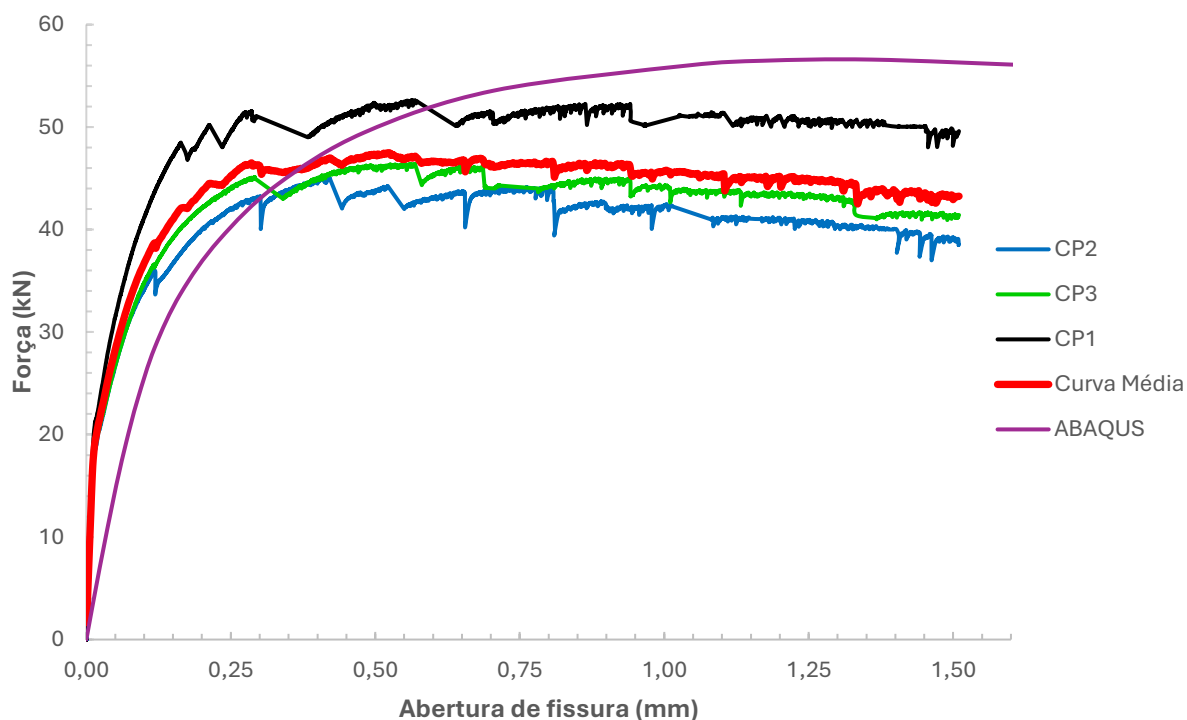


Figura 37: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 4.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 5: Viscosidade.

Diferença em relação a tentativa 4:

Viscosidade (μ): 0,000001

Na tentativa 5 não houve mudança nas curvas de compressão e deslocamento, sendo utilizada para compressão a mesma curva da tentativa 4 (Figura 36) e para curva de deslocamento utilizada a mesma da Figura 30 (Hordik, 1991).

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 17.

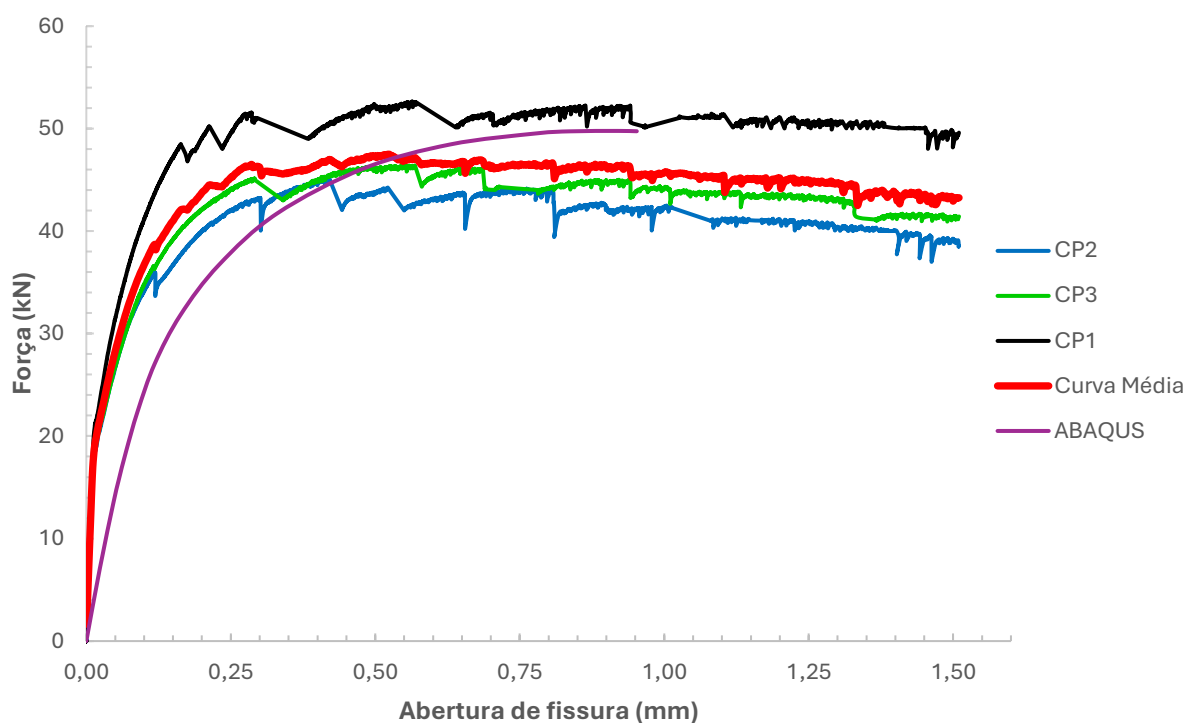
Na Figura 38, observam-se as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, junto à curva média obtida a partir dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, representada em roxo.

Tabela 17. Parâmetros tentativa 5.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 38: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 5.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 6:

Diferença em relação a tentativa 5:

Ângulo de Dilatação (Ψ): 42°

Na tentativa 6 não houve mudança nas curvas de compressão e deslocamento, sendo utilizada para compressão a mesma curva da tentativa 4 (Figura 36) e para curva de deslocamento utilizada a mesma da Figura 30 (Hordik, 1991).

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 18.

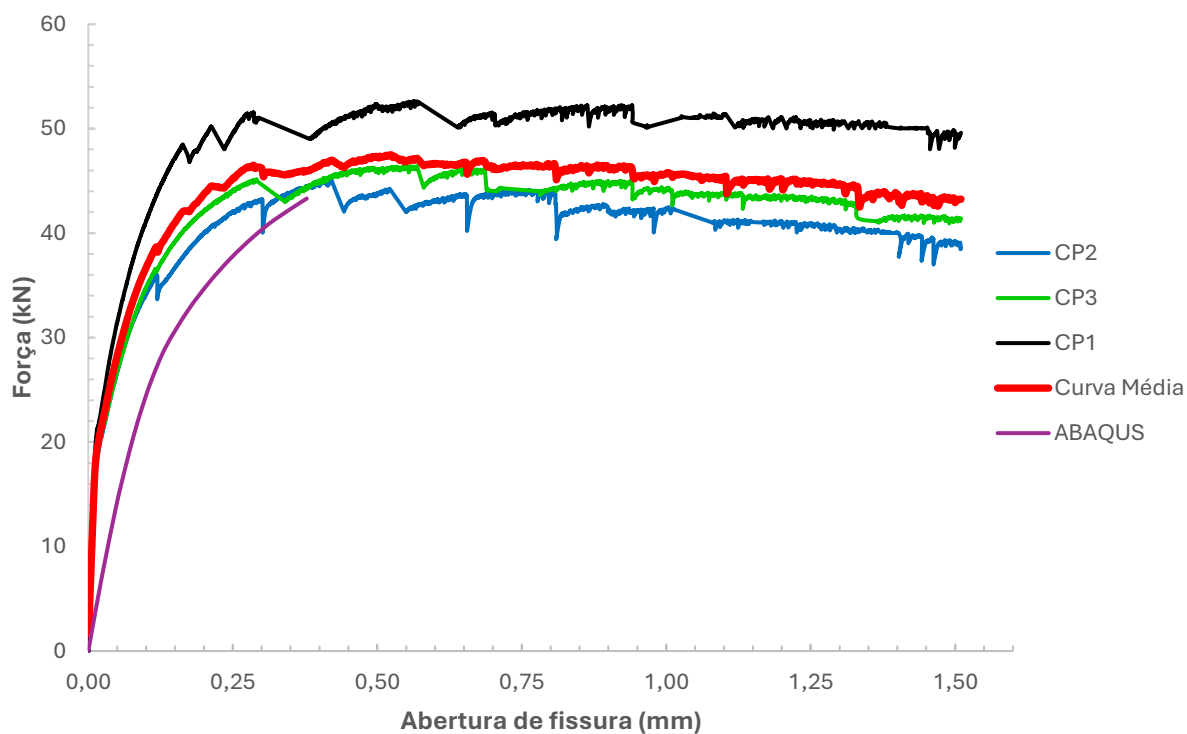
A Figura 39 exibe as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, indicada pela cor roxa.

Tabela 18. Parâmetros tentativa 6.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
42°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 39: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 6.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 7: Análise Inversa

Diferenças em relação a tentativa 6.

Ângulo de Dilatação (Ψ): 36°

Na sétima tentativa foi inserido para tensão a análise inversa conforme explicado na Seção 4.8 Figura 40.

Para compressão foi utilizado a curva da Figura 36.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 19.

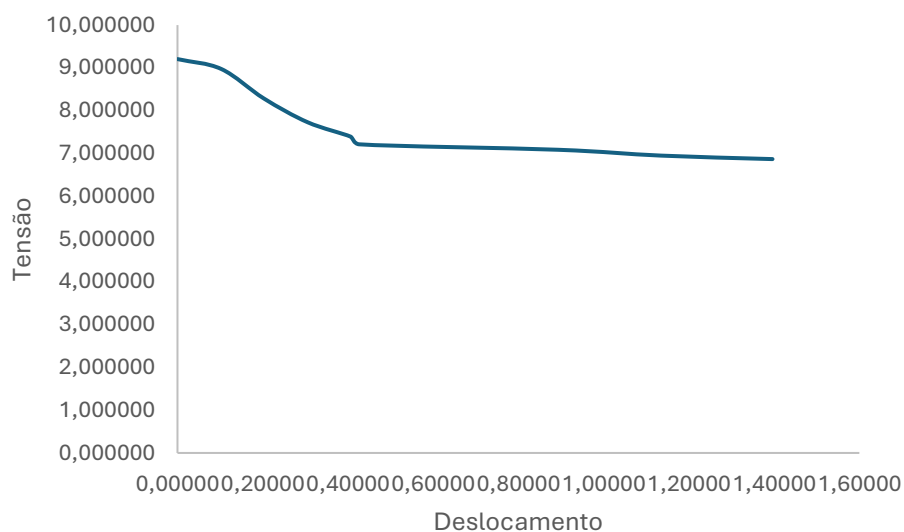
A Figura 41 ilustra as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, acompanhadas pela curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, apresentada na cor roxa.

Tabela 19. Parâmetros tentativa 7.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

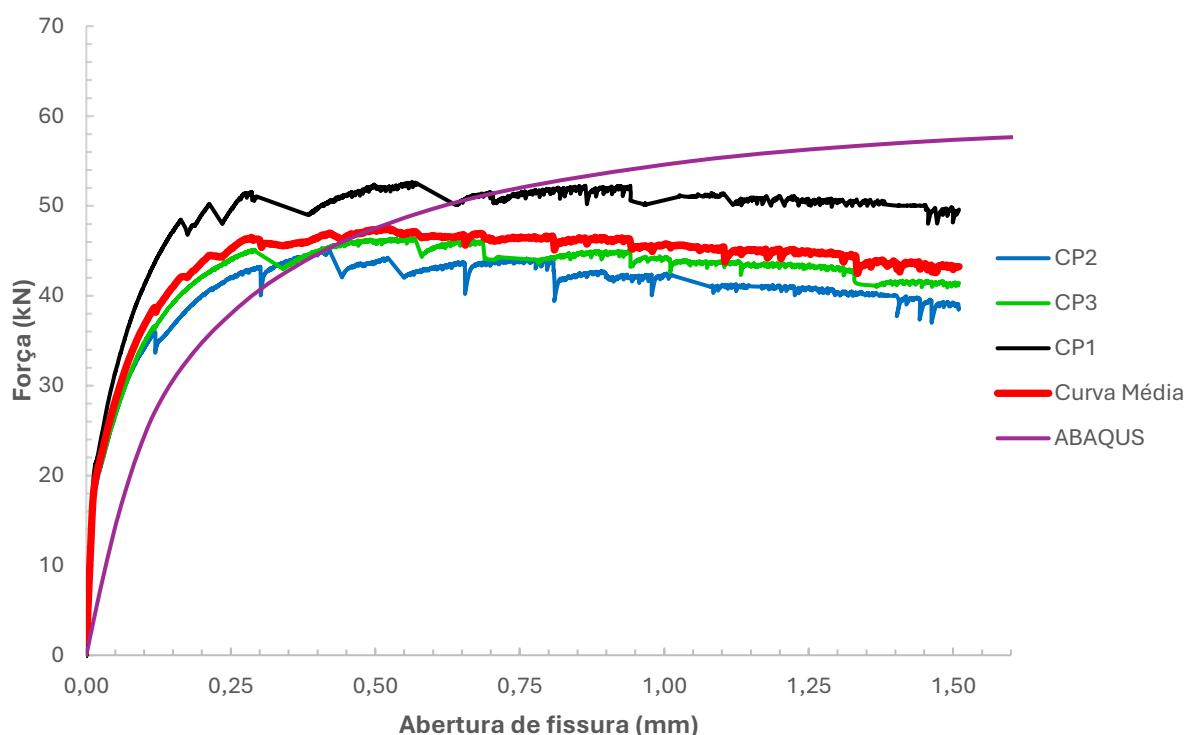
Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Análise Inversa



Fonte: Autoria própria.

Figura 41: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 7.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 8: NF P 18 710

Não houve mudança dos parâmetros em relação a tentativa anterior, a mudança foi somente a volta para compressão conforme NF P 18 710, conforma Seção 4.6.

A curva de compressão utilizada foi a mesma da Figura 33 e para Deslocamento, foi a mesma curva da Figura 40.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 20.

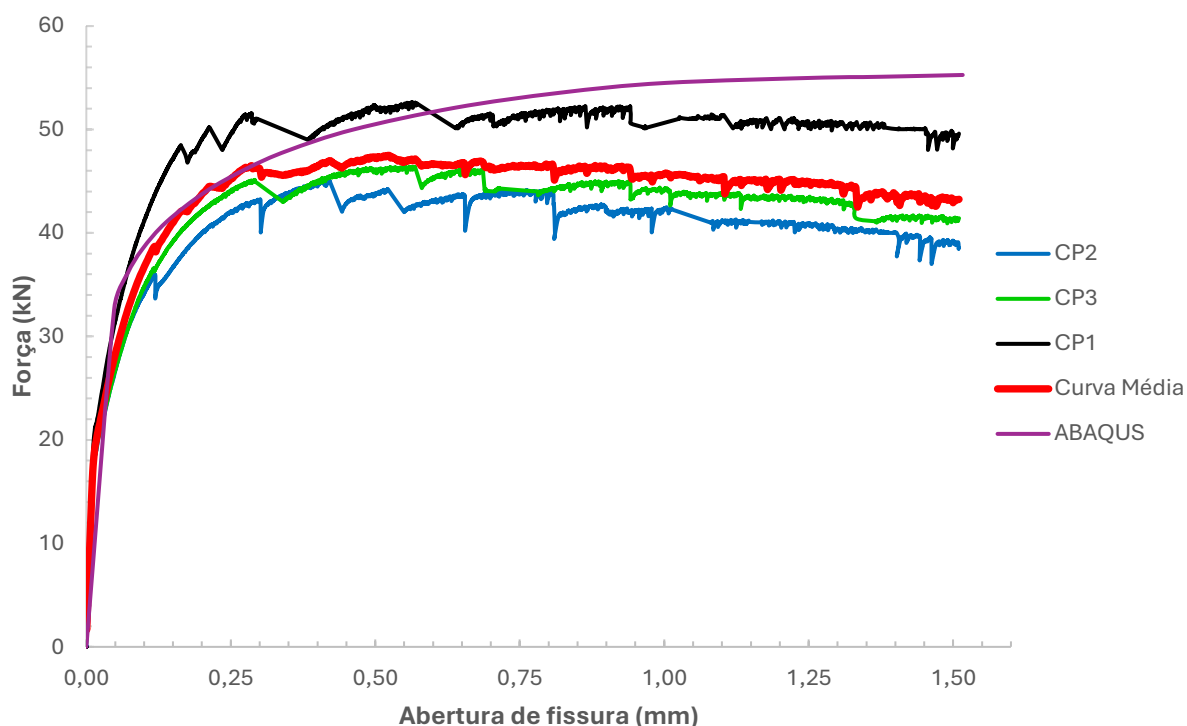
Na Figura 42, são mostradas as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, destacada em roxo.

Tabela 20. Parâmetros tentativa 8.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 8.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 9: Tensão-deformação.

Não houve mudança de parâmetros, somente a volta do modelo constitutivo para NF 18 710, definido através de retas conforme Seção 3.7.1, sendo a curva definida na Figura 36.

Para deslocamento foi aplicado a curva representada pela Figura 40.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 20.

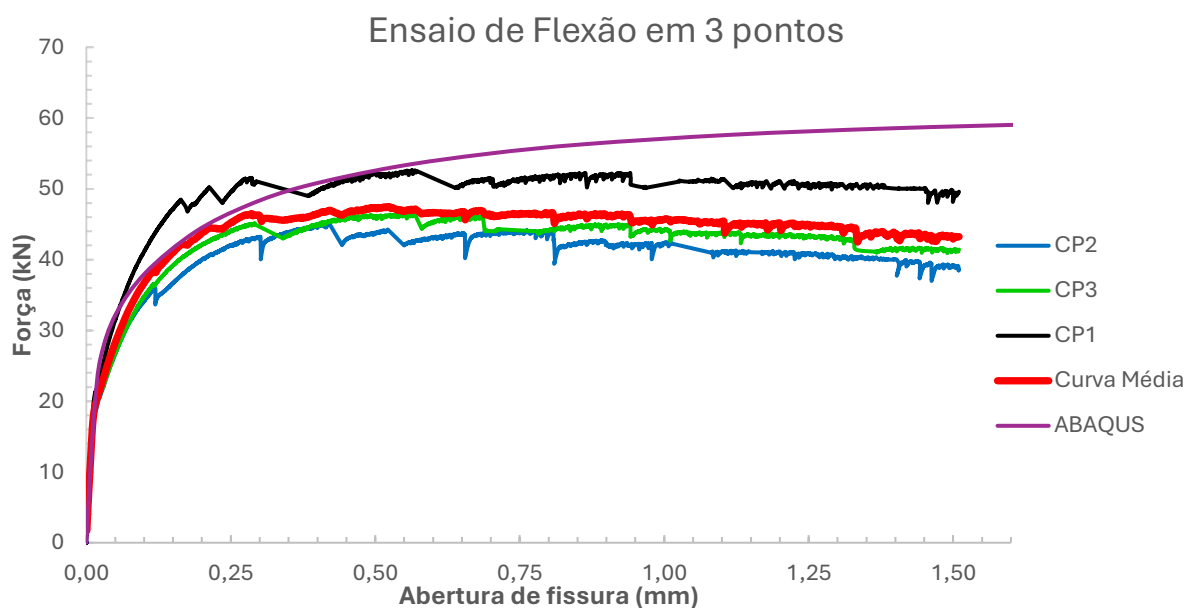
A Figura 43 apresenta as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, bem como a curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, destacada na cor roxa.

Tabela 21. Parâmetros tentativa 9.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 43: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 9.



Tentativa 10: NF P 18 710.

Não houve mudança dos parâmetros em relação a tentativa anterior, a mudança foi somente a volta para compressão conforme NF P 18 710, conforma Seção 4.6, com sua curva definida na Figura 33, e deslocamento conforme Figura 40.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 22.

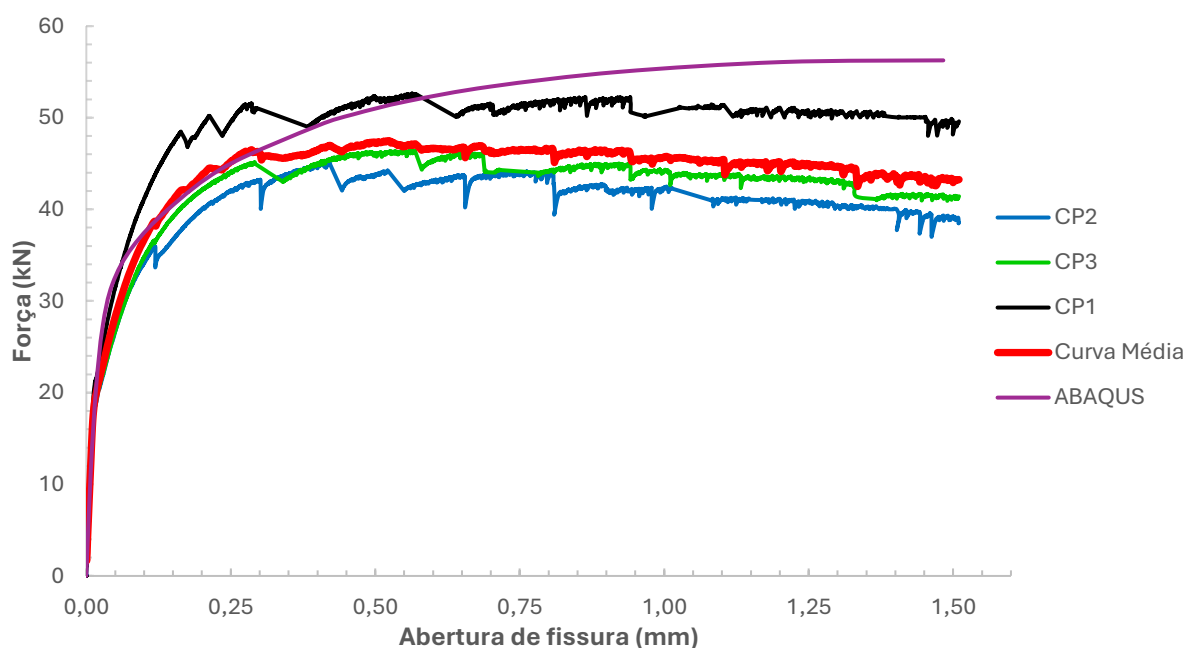
A Figura 44 exhibe as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, indicada pela cor roxa.

Tabela 22. Parâmetros tentativa 10.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 10.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 11: NF P 18 710

Não houve mudança dos parâmetros em relação a tentativa anterior, a mudança foi somente a volta para tensão em que foi retornado a tentativa 1 com Hordijk (1991), conforme Figura 30.

Para compressão continuou utilizando a curva da Figura 33.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 23.

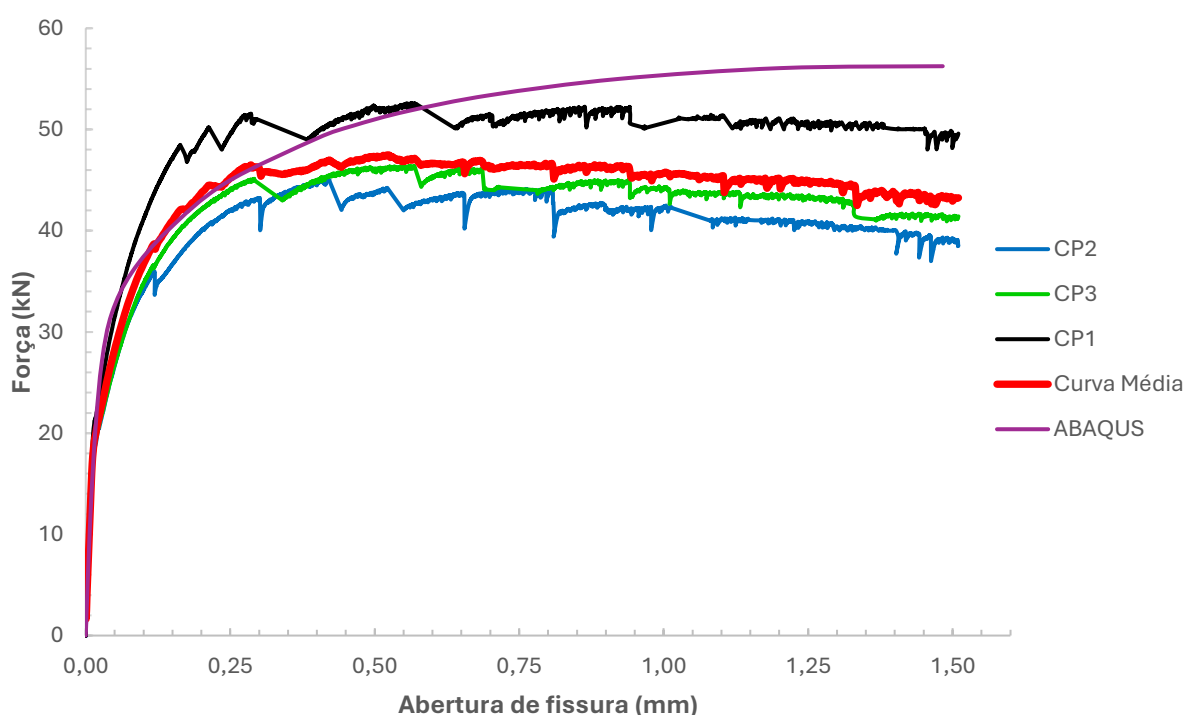
A Figura 45 ilustra as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, acompanhadas pela curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, apresentada na cor roxa.

Tabela 23. Parâmetros tentativa 11.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001

Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 11.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 12: Dano à Compressão com Viscosidade Reduzida

Diferenças em relação a tentativa 11:

Viscosidade (μ): 0,0001

Na décima segunda tentativa foi novamente definido para tensão a análise inversa conforme Seção 4.8, conforme mostrada na Figura 40.

Para compressão se manteve a mesma curva da análise anterior, definida pela Figura 33.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 24.

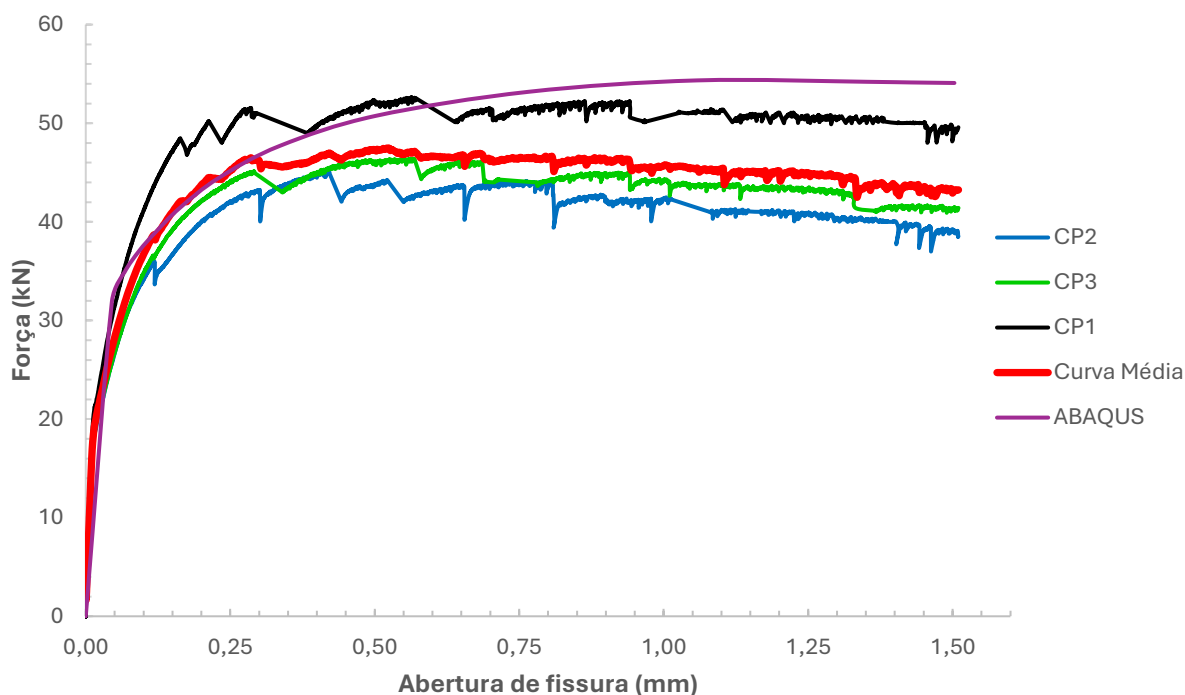
Na Figura 46, são mostradas as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, destacada em roxo.

Tabela 24. Parâmetros tentativa 12.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,0001

Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 12.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 13: Viscosidade

Diferença em relação a tentativa 12:

Viscosidade (μ): 0,000001.

Na décima terceira tentativa foi definida para tensão a análise inversa conforme Seção 4.8, conforme mostrada na Figura 40.

Para compressão se manteve a mesma curva da análise anterior, definida pela Figura 33.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 25.

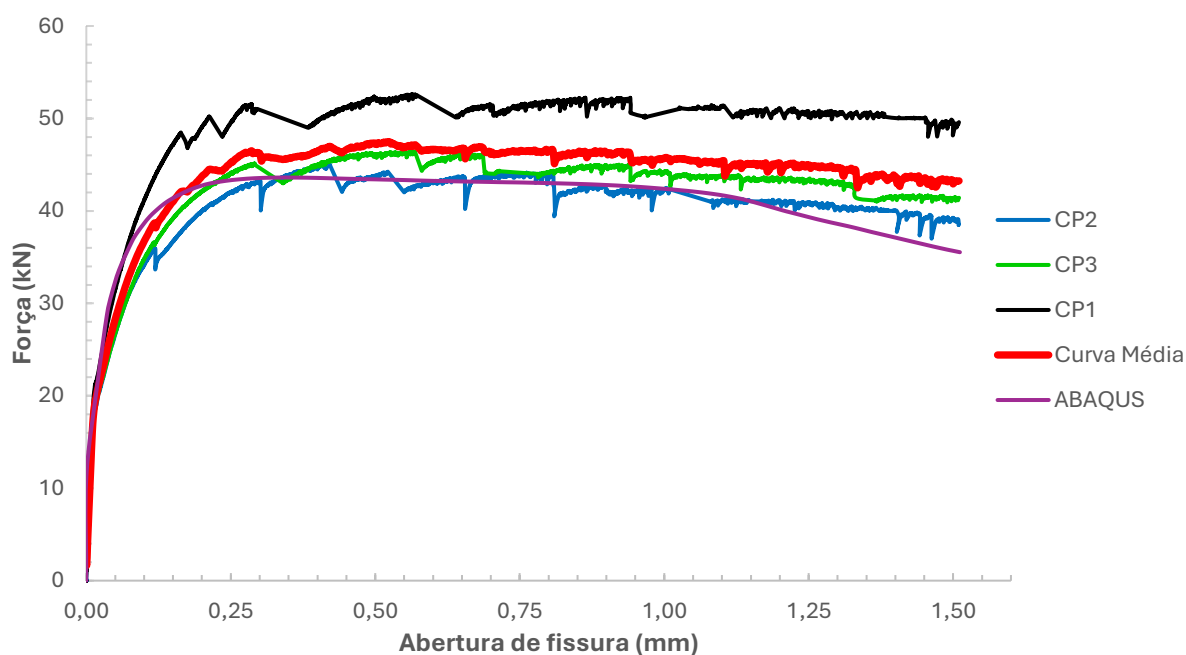
A Figura 47 apresenta as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, bem como a curva média dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, destacada na cor roxa.

Tabela 25. Parâmetros tentativa 13.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,000001.

Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 12.



Fonte: Autoria própria.

Tentativa 14: Viscosidade

Diferença em relação a tentativa 13:

Viscosidade (μ): 0,0001

Na décima quarta tentativa foi definida para tensão a análise inversa conforme Seção 4.8, conforme mostrada na Figura 40.

Para compressão se manteve a mesma curva da análise anterior, definida pela Figura 33.

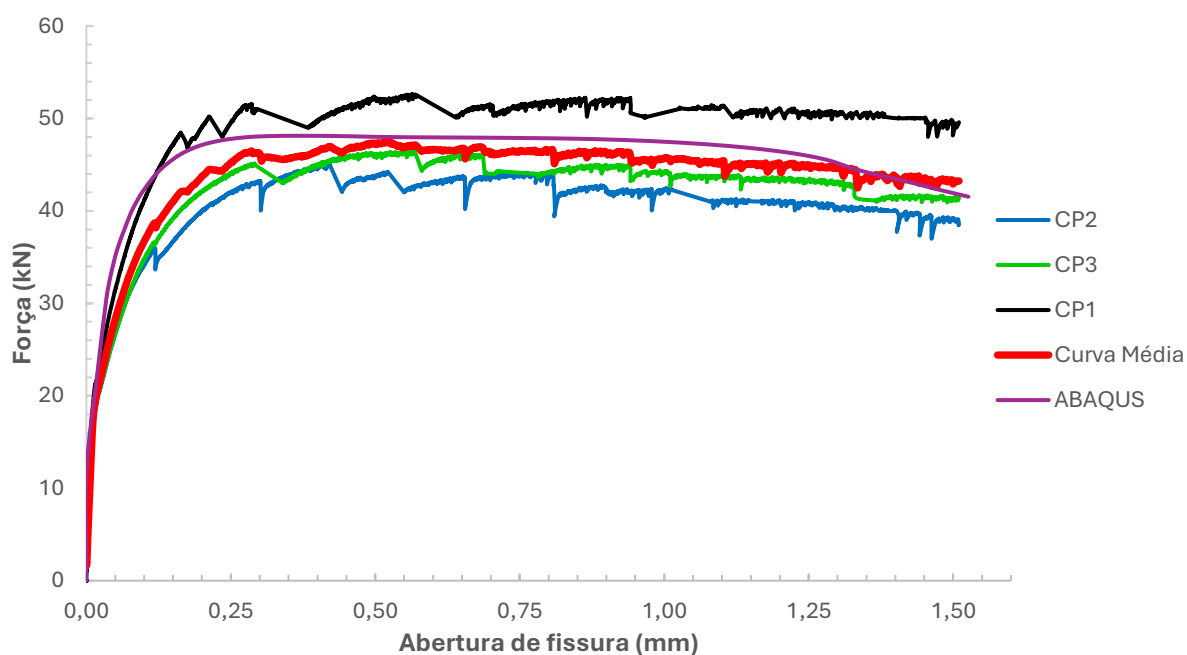
Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 26.

Na Figura 48, observam-se as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, junto à curva média obtida a partir dessas três, além da curva simulada no ABAQUS, representada em roxo.

Tabela 26. Parâmetros tentativa 14.

Ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,0001.

Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 13.

Fonte: Autoria própria.

Tentativa 15: Viscosidade

Diferença em relação a tentativa 14.

Viscosidade (μ): 0,00001

Para essa tentativa foi definida para tensão a análise inversa conforme Seção 4.8, conforme mostrada na Figura 40.

Para compressão se manteve a mesma curva da análise anterior, definida pela Figura 33.

Os parâmetros utilizados para essa tentativa estão exemplificados na Tabela 27.

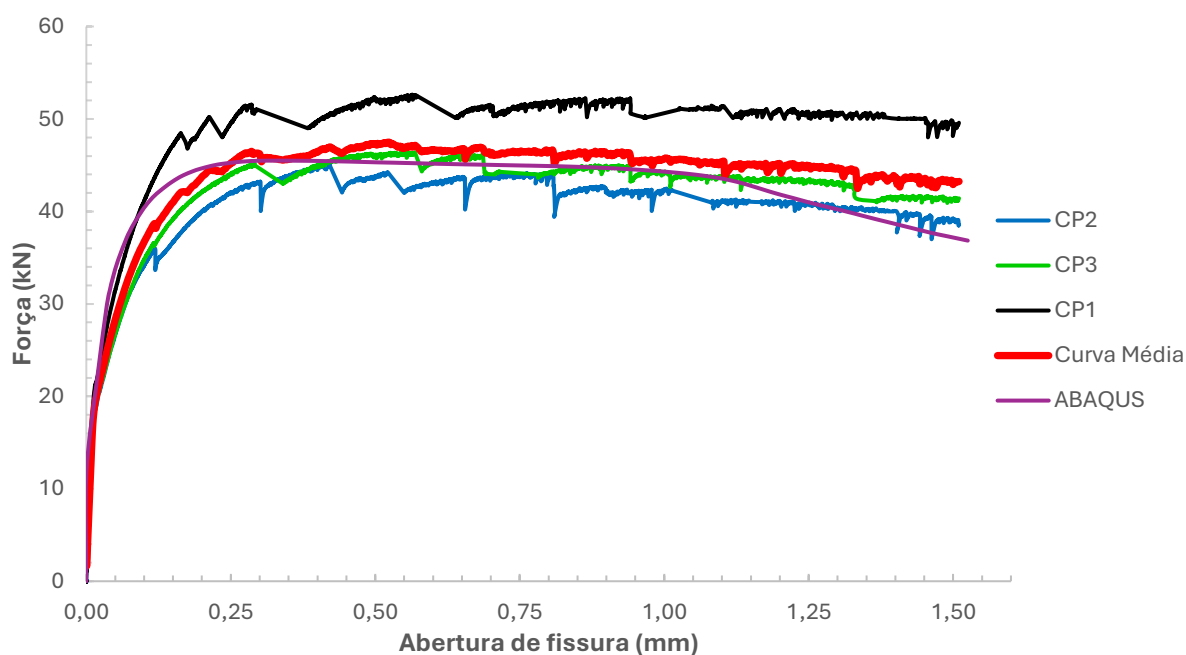
A Figura 49 exibe as curvas experimentais CP1, CP2 e CP3, a curva média resultante da combinação dessas três, e a curva simulada no ABAQUS, indicada pela cor roxa.

Tabela 27. Parâmetros tentativa 15.

ψ	e	$\left(\frac{fb_0}{fc_0}\right)$	κ	μ
36°	0,1	1,16	0,6667	0,00001.

Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Ensaio de flexão 3 pontos – tentativa 14.



Fonte: Autoria própria.

O modelo calibrado, obtido após este processo iterativo de ajuste e comparação, foi então utilizado nas simulações subsequentes das vigas em UHPC, tanto armadas quanto não armadas, permitindo analisar seu comportamento à flexão de forma representativa e comparar os resultados numéricos com os estudos analíticos e experimental de referência (Oliveira, 2019).

5.2 – Análise De Vigas De UHPC Submetidas À Flexão

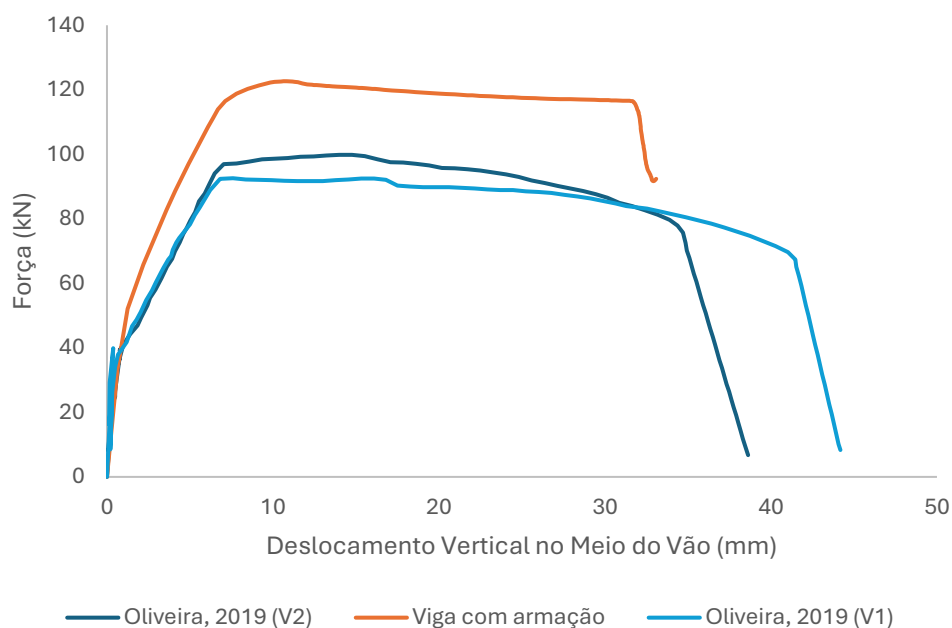
5.2.1 – Vigas Com Armadura

Esta seção apresenta os resultados da simulação numérica de vigas de UHPC com armadura passiva, submetidas à flexão, e os compara com dados experimentais

de referência (Oliveira, 2019). O objetivo principal é avaliar a capacidade do modelo numérico proposto, que incorpora as propriedades do UHPC caracterizadas experimentalmente em Jacintho et al. (2022) e os modelos constitutivos baseados nas diretrizes da norma francesa NF P 18-710 (AFNOR, 2016), em prever o comportamento de vigas armadas em UHPC. Essa análise é crucial para contrastar com abordagens que utilizam modelos constitutivos mais comuns para concretos tradicionais, como os empregados por Oliveira (2019).

Para a modelagem numérica, foram utilizadas as dimensões e a taxa de armadura das vigas de Oliveira, 2019 (MPa, foram obtidas dos ensaios de Santos (2023) e Jacintho et al. (2024). O comportamento do UHPC, conforme detalhado na Seção 4.6. As propriedades do UHPC, como o módulo de elasticidade de 45,22 GPa e a resistência à compressão de 132,01 no modelo CDP foi definido utilizando as equações da NF P 18-710 para compressão (Seção 4.6) e tração (Seção 4.7), refletindo a proposta de dimensionamento para uma futura norma brasileira. É importante ressaltar que a obtenção dos resultados numéricos para cada simulação demandou aproximadamente 3 dias de processamento computacional.

A Figura 50 ilustra a curva força-deslocamento vertical no meio do vão obtida da simulação numérica, em comparação com a curva experimental da viga V2 e V1 de Oliveira (2019), que representa uma viga de UHPC com armadura.

Figura 50: Força x Deslocamento

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Observa-se na Figura 32 que a curva numérica desenvolvida neste trabalho apresenta uma fase elástica inicial com rigidez maior à da curva experimental de Oliveira (2019). Essa fase inicial é predominantemente influenciada pelo módulo de elasticidade do UHPC e pela geometria da viga.

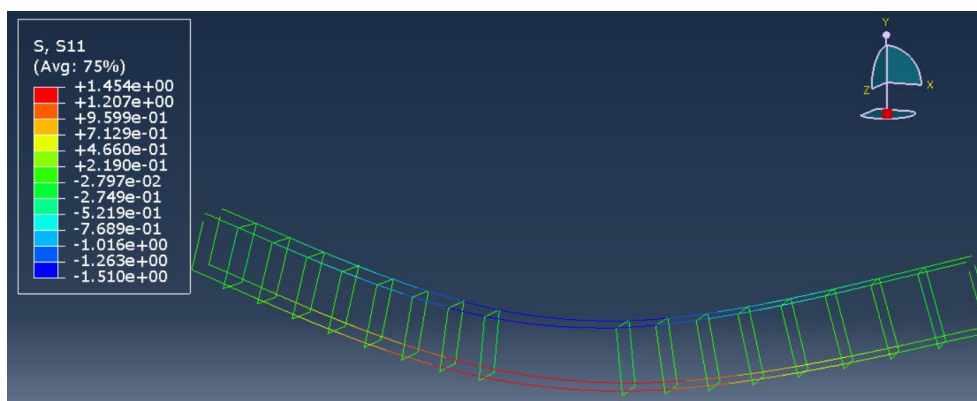
A força máxima atingida pelo modelo numérico foi de 122kN, o que representa um pico de 22% maior em relação ao pico de carga experimental de Oliveira (2019) 99kN. Este resultado sugere que a abordagem baseada na NF P 18-710, ao definir o comportamento do UHPC no modelo CDP, tende a ser otimista a capacidade resistente última da viga em UHPC.

No comportamento pós-pico, a curva numérica demonstra similaridade em comparação com os dados experimentais de Oliveira (2019). As diferenças observadas podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo as particularidades dos modelos constitutivos empregados para o UHPC (baseados na NF P 18-710 versus modelos mais tradicionais), a calibração dos parâmetros do CDP, e a forma como a interação fibra-matriz e armadura-concreto são representadas em cada abordagem. A utilização das equações da NF P 18-710 para definir o comportamento do UHPC no

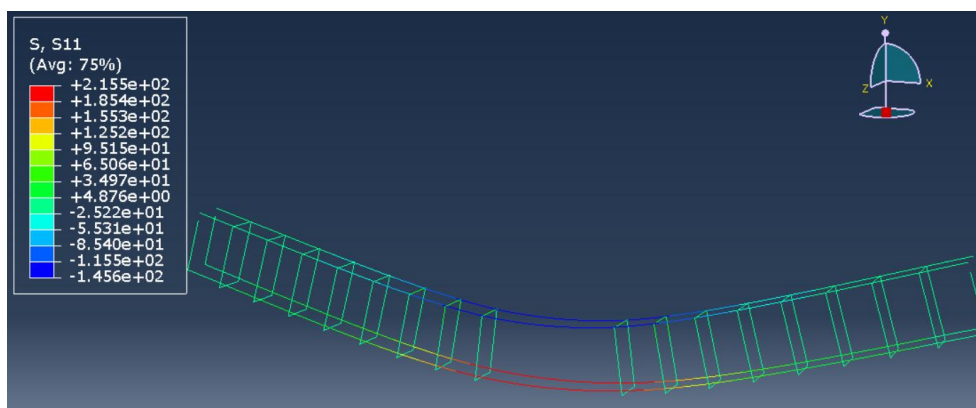
modelo CDP fornece uma representação adequada do desempenho estrutural, o que é um passo importante para o desenvolvimento de diretrizes de projeto para este material no contexto brasileiro.

A análise do comportamento da armadura longitudinal no modelo numérico oferece resultados adicionais sobre a resposta da viga. A Figura 51, que apresenta a tensão no eixo X, ilustra o estado de tensão na armação no início do escoamento, um ponto crítico onde o aço começa a apresentar deformações plásticas significativas, contribuindo para a capacidade de deformação da viga. A Figura 52, também com a tensão no eixo X, representa o estado de tensão na armação no final do escoamento, indicando a extensão da plastificação do aço e sua contribuição para a capacidade última e a ductilidade da viga. Essas visualizações do modelo numérico permitem compreender a evolução e distribuição das tensões e deformações na armadura ao longo do processo de carregamento, complementando a análise global da curva força-deslocamento e evidenciando os mecanismos de falha internos.

Figura 51: Início do escoamento da armação



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Figura 52: Final do escoamento da armadura

Fonte: Autoria Própria, 2025.

5.2.2 – Análise da Influência da Armadura Passiva no Comportamento à Flexão de Vigas em UHPC

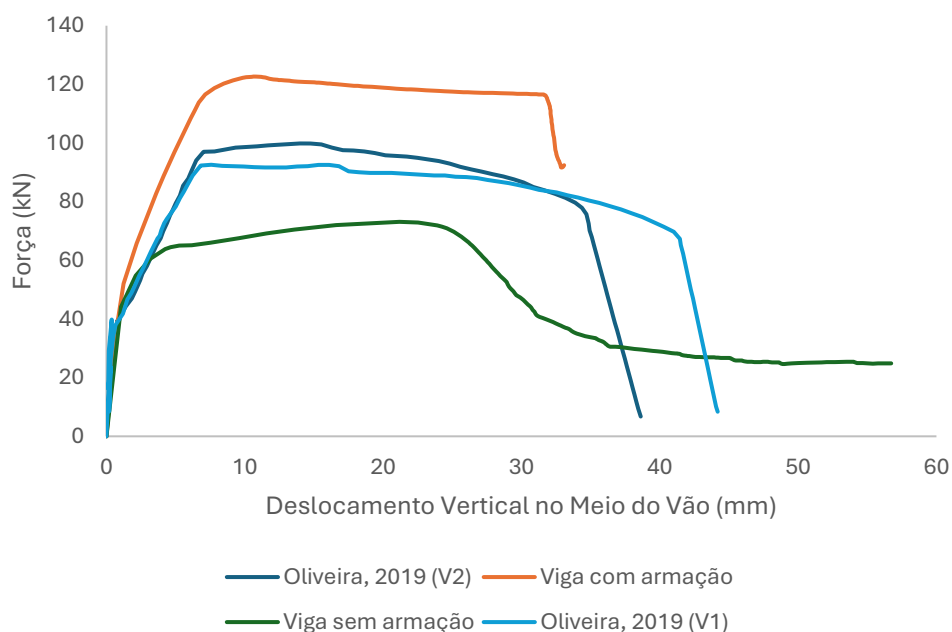
Nesta etapa, são detalhados os resultados da simulação numérica de vigas de UHPC não armadas submetidas à flexão. Embora não tenham sido realizados ensaios experimentais próprios para esta configuração de viga – uma vez que o UHPC, devido à sua elevada resistência à tração intrínseca, pode reduzir a necessidade de armadura passiva em certas aplicações, a presente análise visa comparar a capacidade de simulação do modelo numérico desenvolvido (que emprega as propriedades do UHPC obtidas experimentalmente por Jacintho et al. (2022) e os modelos constitutivos da norma francesa NF P 18-710 (AFNOR, 2016)) com dados experimentais de referência da literatura, especificamente os de Oliveira (2019) para vigas similares sem armadura. Esta abordagem é crucial para avaliar a aplicabilidade da nossa metodologia.

Para a modelagem numérica, foram utilizadas as dimensões das vigas de Oliveira (2019), conforme detalhado na Seção 4.6. As propriedades do UHPC, como o módulo de elasticidade de 45,22 GPa e a resistência à compressão de 132,01 MPa, foram obtidas dos ensaios de Santos (2023) e Jacintho et al. (2024). O comportamento do UHPC no modelo CDP foi definido utilizando as equações da NF P 18-710 para compressão (Seção 4.6) e tração (Seção 4.7), refletindo a proposta de dimensionamento para uma futura norma brasileira.

A Figura 53 ilustra a curva força-deslocamento vertical no meio do vão obtida da simulação numérica para a viga sem armadura, em comparação com a curva

experimental da viga V1 e V2 de Oliveira (2019), que representa uma viga de UHPC com armadura.

Figura 53: Curva Força x Deslocamento Vertical no Meio do Vão para Viga de UHPC Sem Armadura



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Observa-se na Figura 53 que a curva numérica desenvolvida neste trabalho apresenta uma fase elástica inicial similar à da curva experimental de Oliveira (2019), tanto para V1 quanto para V2.

Após a análise individual do comportamento numérico de vigas em UHPC com e sem armadura, segue-se uma comparação direta entre esses dois cenários. O objetivo é investigar a influência da armadura passiva na resistência e no comportamento à flexão das vigas de UHPC, utilizando os resultados obtidos com o modelo numérico baseado na NF P 18-710.

Ao comparar as curvas força-deslocamento das vigas armadas e não armadas, observa-se uma diferença significativa na capacidade resistente última.

Capacidade Resistente: A viga armada, conforme os resultados numéricos da Seção 5.2.1, atingiu uma força máxima de 122kN. Em contraste, a viga não armada, que alcançou uma força máxima de 73kN. Isso representa um declínio de aproximadamente 59,8% na resistência máxima devido à falta da armadura passiva.

Este resultado numérico indica que, mesmo com a elevada resistência à tração intrínseca do UHPC, a armadura passiva contribui substancialmente para a capacidade de carga máxima do elemento.

Essa análise numérica corrobora a importância da armadura passiva para otimizar o desempenho de vigas em UHPC, especialmente em termos de capacidade resistente e, crucialmente, de ductilidade. Apesar de o UHPC possuir uma resistência à tração superior à do concreto convencional, a armadura atua como um mecanismo de segurança adicional.

Os resultados numéricos, obtidos a partir da abordagem da NF P 18-710, sugerem que a norma é capaz de capturar a contribuição da armadura, indicando que a consideração da resistência à tração do UHPC em conjunto com a armadura passiva é um caminho promissor para o dimensionamento de elementos estruturais com este material no Brasil.

É importante reiterar que esta comparação é baseada em resultados numéricos e em dados experimentais da literatura (Oliveira, 2019), e não em um ensaio comparativo direto entre vigas armadas e não armadas produzidas na mesma campanha experimental. No entanto, a consistência observada entre o modelo e os dados de referência fortalece a confiança na capacidade do modelo em prever o comportamento do UHPC sob diferentes configurações de armadura.

6. CONCLUSÕES

Ao longo desta dissertação, o comportamento à flexão de vigas em Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) foi investigado por meio de um estudo numérico. A pesquisa buscou, em particular, avaliar a aplicabilidade das diretrizes da norma francesa NF P 18-710 (AFNOR, 2016) como base para uma futura norma brasileira de dimensionamento de elementos estruturais em UHPC, integrando a caracterização experimental de um traço de UHPC com a modelagem numérica em elementos finitos no software ABAQUS. As principais conclusões, resultantes das análises desenvolvidas, são detalhadas a seguir.

Os resultados da caracterização experimental do UHPC, obtidos a partir de ensaios de compressão axial em prismas (Santos, 2023 e Jacintho et al., 2024), forneceram os parâmetros mecânicos essenciais para a modelagem. Foram determinadas uma resistência à compressão média de 132,01 MPa, um módulo de elasticidade médio de 45,22 GPa, e resistências à tração na flexão $f_{ct,el}$ de 9,32 MPa e $f_{ct,fl}$ de 13,96 MPa.

O ponto de pico de resistência à tração, obtido pela análise inversa, foi f_{ctf} de 6,27MPa. Segundo a NF P18 710 (AFNOR, 2016), Se $f_{ctf}/1,25$ for menor do que o $f_{ct,el}$ então o material é classificado como T1, com comportamento de softening. Como $f_{ctf}/1,25 = 5,02\text{MPa}$ e esse valor é menor do que 9,32MPa ($f_{ct,el}$), então este concreto otimizado tem o comportamento de softening, mesmo com 1,86% de adição de fibras de aço e 0,14% de adição de fibras de PVA.

Esses dados foram cruciais para a calibração do modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP) no ABAQUS, onde o comportamento à compressão e à tração do UHPC foi definido com base nas equações propostas pela NF P 18-710(AFNOR, 2016). A calibração do modelo CDP com os dados experimentais do prisma demonstrou a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento força-deslocamento do UHPC, servindo como base para as simulações de vigas.

A análise numérica de vigas em UHPC, tanto armadas quanto não armadas, permitiu conclusões significativas. Para as vigas armadas, a comparação entre o modelo numérico, que utilizou as diretrizes da NF P 18-710 (AFNOR, 2016), e os

dados experimentais de Oliveira (2019) revelou um comportamento muito semelhante entre a análise numérica e a experimental.

O modelo numérico previu uma força máxima de 122kN. No entanto, é importante notar que, como não foram utilizados os mesmos parâmetros para a definição do resultado em ambos os estudos, a aplicação da norma francesa NF P 18-710 (AFNOR, 2016) pode ter proporcionado uma visão otimista sobre o desempenho experimental. A análise das tensões na armadura (Figuras 51 e 52) forneceu resultados sobre o início e a extensão do escoamento do aço, confirmando a contribuição da armadura para a capacidade resistente e a ductilidade da viga. O processo de obtenção desses resultados numéricos para as vigas demandou aproximadamente 3 dias de processamento computacional por simulação, ressaltando a complexidade e o custo computacional envolvidos na modelagem avançada de materiais.

No que diz respeito às vigas sem armadura, a análise numérica foi comparada com dados experimentais de Oliveira (2019). É fundamental ressaltar que não foram realizados ensaios experimentais próprios para esta configuração de viga, justificando-se pela elevada resistência à tração intrínseca do UHPC, que pode reduzir a necessidade de armadura passiva em certas aplicações. Neste contexto, o modelo numérico demonstrou sua capacidade de prever o comportamento força-deslocamento, fornecendo uma base para a compreensão do desempenho de elementos não armados.

A comparação numérica entre as vigas armadas e a não armada evidenciou a importância da armadura passiva. Mesmo com a alta resistência do UHPC, a presença da armadura contribuiu significativamente para o aumento da capacidade de carga última e para a melhoria da ductilidade do elemento estrutural, atuando como um mecanismo de segurança adicional e otimizando o desempenho. Na caracterização experimental, o UHPC desta pesquisa foi classificado como T1 (softening) e ficou claro na análise numérica que a viga modelada sem armadura tem uma resistência à flexão com quase a metade do valor das vigas armadas.

Em resumo, esta pesquisa demonstrou a viabilidade de modelar numericamente vigas em UHPC submetidas à flexão, utilizando dados experimentais

de caracterização do material e as prescrições da norma francesa NF P 18-710(AFNOR, 2016).

Os resultados numéricos, ao serem comparados com dados da literatura, indicam que a proposta de dimensionamento baseada na NF P 18-710(AFNOR, 2016) pode servir como um referencial para o desenvolvimento de uma norma brasileira para elementos estruturais em UHPC, especialmente no que tange ao comportamento à flexão.

Para que uma viga em UHPC sem armadura tenha um comportamento satisfatório ou próximo de uma viga armada, com relação à sua capacidade resistente e ductilidade, o UHPC necessita ter um comportamento de hardening (T2 ou T3). Esta é uma sugestão de pesquisa futura para a continuidade desta pesquisa, obter em laboratório UHPC classificados como T2 e T3 e modelar vigas sem armadura.

7. BIBLIOGRAFIA

AL-OSTA, M. A.; ISA, M. N.; BALUCH, M. H.; RAHMAN, M. K. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 134, p. 279–296, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. *NF P18-470 – Concrete – Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity*. 2016.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. *NF P18-710 – Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)*. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Solo – Determinação da resistência ao cisalhamento pelo ensaio de compressão triaxial*. Rio de Janeiro, 2010.

BACCOUCH, M. A brief summary of the finite element method for differential equations. In: BACCOUCH, M. (ed.). *Finite Element Methods and Their Applications*. Londres: IntechOpen, 2021. cap. 1, p. 1-18. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/76195>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BAHRAQ, A. A. et al. Experimental and numerical investigation of shear behavior of RC beams strengthened by ultra-high performance concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 13, n. 6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0330-z>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BASTIEN-MASSE, M.; BRÜHWILER, E. Ultra high performance fiber reinforced concrete for strengthening and protecting bridge deck slabs. In: CHEN, A.; FRANGOPOL, D.; RUAN, X. (org.). *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension*. London: Taylor & Francis Group, 2014. p. 2176-2182.

BAZANT, Z. P.; JIRÁSEK, M. Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: survey of progress. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 128, n. 11, p. 1119-1149, nov. 2002. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:11(1119).

BERGAN, P. G.; HOLAND, I. Nonlinear finite element analysis of concrete structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 17-18, p. 443-467, 1979.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782579901156>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BUITELAAR, P. Ultra high performance concrete: developments and applications during 25 years. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2004, Kassel. *Proceedings*. Kassel: University of Kassel, 2004.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 4, p. 957–971, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400011>.

CAE ASSISTANT. Concrete damage plasticity (CDP) in Abaqus. Disponível em: <https://caeassistant.com/blog/concrete-damage-plasticity-cdp-abaqus-video/>. Acesso em: 19 maio 2025.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal*, v. 82, n. 6, p. 797-804, 1985.

COURANT, R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*, v. 49, p. 1-23, 1943.

DARÉ, M. M. A. Análise de viabilidade do uso do UHPC em elementos estruturais. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

DU, J. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B*, v. 224, p. 109220, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>.

DUCTAL. Archistructure. 2023. Disponível em: <https://www.ductal.com/en/archistructure>. Acesso em: 21 jul. 2025.

DUVAUT, G.; LIONS, J. L. *Inequalities in Mechanics and Physics*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1976. DOI: 10.1007/978-3-642-66165-5. Acesso em: 26 maio 2024.

EL-HELOU, R. G.; HABER, Z. B.; GRAYBEAL, B. A. Mechanical behavior and design properties of ultra-high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, v. 119, n. 1, p. 181–194, 2022. <https://doi.org/10.14359/51734194>.

EARLS, C. J. On the inelastic failure of high strength steel I-shaped beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 49, n. 1, p. 1–24, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Concrete bridges – Design and detailing rules*. EN 1992-2. 2005.

FAKEH, M.; JAWDHARI, A.; FAM, A. Calibration of Abaqus concrete damage plasticity (CDP) model for UHPC material. 2023. <https://doi.org/10.21838/uhpc.16675>.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *FHWA-HRT-06-103: Material property characterization of ultra-high-performance concrete*. 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *FHWA-HRT-11-038: Ultra-high-performance concrete*. 2011.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *FHWA-HRT-13-060: Ultra-high-performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community*. 2013.

FIB (The International Federation for Structural Concrete). *Fib Model Code for Concrete Structures*. 2010.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras: conceitos básicos. In: SEMINÁRIO SOBRE AS NOVAS TECNOLOGIAS DO CONCRETO: Ultra-Alta Resistência, Auto-Adensável e Reforçado com Fibras, 2011, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: IBRACON, 2011a.

GARAS, V. Y.; KURTIS, K. E.; KAHN, L. F. Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, p. 493–502, 2012.

GRAYBEAL, B. A. TechNote: Design and construction of field-cast UHPC connections. *FHWA-HRT-14-084*. Washington, DC: FHWA, 2014.

GRAYBEAL, B. A.; BABY, F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 110, n. 2, p. 177–186, 2013.

GRAYBEAL, B. A. Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete I-girder. *Journal of Bridge Engineering*, v. 13, n. 6, p. 602–610, nov./dez. 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(602).

GRAYBEAL, B. A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 104, n. 2, p. 146–152, 2007.

HRENNIKOFF, A. P. Solution of problems in elasticity by the framework method. *Journal of Applied Mechanics*, v. 8, p. A169–A175, 1941.

HORDIJK, D. A. *Local approach to fatigue of concrete*. 1991. 216 f. Thesis (Ph.D.) – Technische Universiteit Delft, Delft, 1991.

HUNG, C.-C. et al. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes. *Composites Part B*, v. 158, p. 269–278, 2019.

HUNG, C.-C.; EL-TAWIL, S.; CHAO, S.-H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: behavior, analysis, and design. *Journal of Structural Engineering*, v. 147, n. 3, p. 03121001, 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073.

ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. v. II, cap. 36.

JACINTHO, A. E. et al. *Estruturas de concreto de ultra alto desempenho (UHPC): prática recomendada*. Comitê Técnico 303 – IBRACON/ABECE. GT5. 1. ed. 2022.

JACINTHO, A. E. et al. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete with steel and PVA fibers. *Materials*, v. 17, p. 5990, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17235990>.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING. *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*. 2008.

KOREA INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY. *Design guidelines for K-UHPC*. Korea, 2014.

LI, L.; XU, L.; ZENG, Y.; CUI, K.; CHI, Y.; HUANG, L. Understanding the role of coarse aggregate on tensile fatigue behaviors of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 139, 2023.

LI, J.-P.; ZHANG, L.-Y.; ZHU, Y.-J.; ZHAO, G.; LIU, F.-Z.; ZHANG, T. Finite element analysis of the flexural behavior of steel plate–high-performance concrete (HPC) slab and beam composite structures. *Buildings*, v. 15, n. 27, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15010027>.

LIU, J. et al. A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads. *Cement and Concrete Composites*, v. 148, p. 105449, 2024.

LIU, C. et al. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: a review. *Nanotechnology Reviews*, v. 9, n. 1, p. 1427–1444, 2020. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0107>.

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. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4. ed. New York: McGraw Hill Education, 2014.

MIKUROYA, T.; KUWATANI, T.; TAKADA, N. Testing and validating predictive models in the reliability analysis of engineered barrier systems in geological repositories. *Engineering Structures*, v. 210, p. 110171, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110171>.

MULLER, R. M. Mais uma obra de Ductal entregue no Brasil. *LinkedIn*, 2017. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/mais-uma-obra-de-ductal-entregue-brasil-rodrgo-menegaz-muller/>.

OLIVEIRA, C. O. *Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC*. 2019. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

OLUOKUN, F. A. Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, 1991.

OTHMAN, H.; MARZOUK, H. Applicability of damage plasticity constitutive model for ultra-high performance fibre-reinforced concrete under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, v. 114, p. 20–31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.12.013>.

PAMIN, J.; SOUZA, R. M. de; ALMEIDA, A. T. de; ALMEIDA, J. T. de. A unified constitutive model for concrete based on damage and plasticity. *Acta Mechanica*, v. 230, n. 11, p. 4097–4116, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02493-8>.

PERSSON, B. Poisson's ratio of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1647–1653, 1999.

REVISTA CONCRETO E CONSTRUÇÕES. Edificações residenciais e comerciais: estado da arte em estudos sobre estruturas de concreto para edifícios. *Concreto e Construções*, São Paulo: IBRACON, n. 76, p. 43, 2014.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).

RICHTER, C. A. Properties and behavior of UHPC-class materials. McLean, VA: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2018.

ROMPA, D. D.; GIDRÃO, G. de M. S. Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC). *Ambiente Construído*, v. 20, n. 2, p. 73–88, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200388>.

SANTOS, A. M. Características mecânicas do UHPC: resistência à compressão e resistência à tração na flexão. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS, 28., 2023. Anais [...]. Campinas: PUC-Campinas, 2023.

SANTOS, J. D. dos. *Modelagem numérica do concreto de ultra alto desempenho (UHPC) reforçado com fibras de aço utilizando o modelo CDP*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

SHAFIEIFAR, M.; FARZAD, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC). *Construction and*

Building Materials, v. 156, p. 402–411, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>.

SHU, G.; ZHANG, Q.; HUANG, Y.; BU, Y. Micromechanical analysis of steel fiber corrosion in ultra-high performance concrete. *Journal of Southwest Jiaotong University*, v. 54, n. 6, p. 1268–1276, 2019.

SUMITOMO, G. S. *Estudo do comportamento mecânico do UHPFRC produzido com fibras de aço e de PVA submetidos a elevadas temperaturas*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

TAWFIK, A. B.; MAHFOUZ, S. Y.; TAHER, S. E. F. Nonlinear ABAQUS simulations for notched concrete beams. *Materials*, v. 14, n. 23, 7349, 2021.
<https://doi.org/10.3390/ma14237349>.

ULLAH, R. et al. Ultra-high-performance concrete (UHPC): a state-of-the-art review. *Materials*, v. 15, 4131, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>.

VAN MIER, J. G. M.; VAN VLIET, M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 69, p. 235–247, 2002.

VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, v. 48, p. 53–66, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>.

XU, Z.; HUANG, Y.; LIANG, R. Numerical simulation of lap-spliced ultra-high-performance concrete beam based on bond–slip. *Buildings*, v. 12, n. 8, 1257, 2022.
<https://doi.org/10.3390/buildings12081257>.

YOO, D. Performance enhancement of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and model development for practical utilization. 2014. 628 f. Tese (Doutorado) – Graduate School, Korea University, Korea, 2014.

YOO, D.; KANG, S.; YOON, Y. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 67–81, 2014.

YOO, D.; ZI, G.; KANG, S.; YOON, Y. Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement methods. *Cement and Concrete Composites*, v. 63, p. 51–66, 2015.

YOO, D.; YOON, Y. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, v. 102, p. 409–423, 2015.

YOO, D. Y.; SHIN, H. O.; YOON, Y. S. Ultrasonic monitoring of setting and strength development of ultra-high-performance concrete. *Materials*, v. 9, n. 4, 294, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9040294>.

YOO, D. Y.; OH, T.; BANTHIA, N. Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review. *Cement and Concrete Composites*, v. 134, 104730, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104730>.

ZAIDI BHAT, F.; KANNI, S. Finite element analysis of concrete specimen. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, v. 6, n. 1, p. 223–227, maio 2021. <http://www.ijeast.com>.

ZHUANG, Z. *Finite element analysis and application based on ABAQUS*. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

Zhu, Yanping & Zhang, Yang & Qu, Shaoqin & Kumar, Aditya. (2020). Flexural and Tensile Strength of Ultra-High-Performance Concrete with ZnPh-Treated Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 32. 1-8. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003372.