

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**FELIPE DALL AGNOL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS EM  
CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM ABERTURAS NA ALMA  
PELO MODELO CONCRETE DAMAGED PLASTICITY**

**PATO BRANCO**

**2025**

**FELIPE DALL AGNOL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS EM  
CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM ABERTURAS NA ALMA  
PELO MODELO CONCRETE DAMAGED PLASTICITY**

**Numerical Analysis of the Structural Behavior of Ultra-High-Performance Concrete  
Beams with Web Openings Using the Concrete Damage Plasticity Model**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Civil do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná. Área de Concentração:  
Materiais e Engenharia de Estruturas.  
Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Miranda  
Saleme Gidrão  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak

**PATO BRANCO**

**2025**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Pato Branco**



FELIPE DALL AGNOL

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS EM CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM ABERTURAS NA ALMA PELO MODELO CONCRETE DAMAGED PLASTICITY**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Materiais E Engenharia De Estruturas.

Data de aprovação: 29 de Setembro de 2025

Dr. Davi Fagundes Leal, Doutorado - Instituto Federal Fluminense

Dr. Moacir Kripka, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Paulo Rogerio Novak, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 29/09/2025.

*Dedico este trabalho à minha esposa,  
pelo amor, paciência e apoio  
em cada etapa desta jornada.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, sabedoria e pela oportunidade de concluir mais esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo de Miranda Saleme Gidrão, pela orientação segura, pelas valiosas contribuições técnicas, pela confiança ao longo de todo o percurso e por me ajudar a reencontrar o foco nos momentos em que o desânimo parecia vencer.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Paulo Rogério Novak, por ter sido meu primeiro contato com a pesquisa e por me introduzir a este universo científico com paciência e um olhar sempre atento às possibilidades de crescimento.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco, pelo conhecimento transmitido, pela excelência do ensino e pela inspiração constante em seguir aprimorando o saber técnico e científico.

Em especial, registro meu sincero agradecimento aos professores Profa. Dra. Rúbia Mara Bosse, Prof. Dr. Davi Fagundes Leal e Prof. Dr. Moacir Kripka, pelas observações precisas e pelas contribuições que fortaleceram a qualidade deste trabalho e ampliaram minha visão acadêmica.

À minha esposa, pelo amor, paciência e apoio incondicional em cada etapa desta jornada. Sua presença foi abrigo e combustível em meio à exaustão, e esta conquista também é sua.

À minha mãe, exemplo de força e dedicação, pelo apoio constante, pelas palavras de encorajamento e pelas leituras atentas que ajudaram a lapidar cada detalhe desta dissertação.

Ao meu filho Raul, por lembrar todos os dias o motivo de seguir em frente e pelo sorriso que renova o ânimo mesmo nos dias mais longos.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo registrado o meu mais profundo agradecimento.

*“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,  
e o homem que adquire conhecimento.”*

*Provérbios 3:13*

## RESUMO

A execução de aberturas em vigas de concreto armado é prática recorrente em projetos estruturais, porém altera o fluxo de tensões e pode comprometer o desempenho global do elemento. Diante da crescente utilização de concretos de ultra-alto desempenho, este trabalho teve como objetivo analisar numericamente, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) e do modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP), implementado no software ABAQUS, o comportamento estrutural de vigas de concreto com aberturas na alma, considerando concretos convencionais e de ultra-alto desempenho reforçados com fibras (UHPFRC). O modelo numérico foi calibrado com base em resultados experimentais da literatura e posteriormente extrapolado para o UHPFRC, com ajustes nas propriedades constitutivas e nos parâmetros do CDP, de modo a representar adequadamente o comportamento não linear do material. Foi conduzido um estudo paramétrico abrangente, variando a posição da abertura (sem, no apoio e no meio do vão) e a presença de estribos, a fim de compreender os mecanismos de redistribuição de tensões e a influência da geometria e da armadura transversal sobre o desempenho global das vigas. Os resultados indicaram que as vigas em UHPFRC apresentaram resistência última cerca de 1,8 vezes a do concreto convencional e tenacidade aproximadamente 3 vezes a do concreto convencional, além de melhor capacidade de redistribuição de esforços e de dissipação de energia. Observou-se que o modelo numérico reproduziu de forma coerente os modos de ruptura e as regiões críticas de concentração de tensões, confirmando a aplicabilidade do CDP na análise de materiais frágeis e semifrágeis. Conclui-se que o UHPFRC proporciona desempenho estrutural significativamente superior frente às descontinuidades geradas por aberturas, conferindo maior rigidez, ductilidade e segurança global ao sistema. O caso mais crítico foi verificado para as vigas com aberturas próximas ao apoio, que apresentaram maiores reduções de resistência e rigidez, evidenciando a necessidade de especial atenção a essa configuração em projetos estruturais. O estudo contribui com uma metodologia de modelagem robusta e replicável, capaz de subsidiar futuras calibrações experimentais e o desenvolvimento de prescrições normativas voltadas ao dimensionamento de elementos em concretos de ultra-alto desempenho.

**Palavras-chave:** UHPFRC; Aberturas na alma; CDP; Análise Numérica.

# ABSTRACT

The execution of openings in reinforced concrete beams is a common practice in structural design; however, it alters the stress flow and can compromise the overall performance of the element. Considering the growing use of ultra-high-performance concretes, this study aimed to numerically analyze, through the Finite Element Method (FEM) and the Concrete Damage Plasticity (CDP) constitutive model implemented in ABAQUS, the structural behavior of concrete beams with web openings, comparing conventional concrete and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC). The numerical model was calibrated using experimental results from the literature and subsequently extended to UHPFRC, with adjustments to constitutive properties and CDP parameters in order to properly represent the nonlinear behavior of the material. A comprehensive parametric study was conducted, varying the opening position (none, near the support, and at mid-span) and the presence of stirrups, to understand stress redistribution mechanisms and the influence of geometry and transverse reinforcement on the overall beam performance. The results showed that UHPFRC beams reached ultimate strength about 1.8 times that of conventional concrete and toughness approximately three times that of conventional concrete, as well as a better capacity for stress redistribution and energy dissipation. The numerical model accurately reproduced the failure modes and critical stress concentration zones, confirming the applicability of the CDP model in the analysis of brittle and semi-brittle materials. It is concluded that UHPFRC provides significantly superior structural performance when subjected to discontinuities caused by openings, ensuring greater stiffness, ductility, and overall safety of the system. The most critical case occurred in beams with openings near the support, which exhibited the greatest reductions in strength and stiffness, highlighting the need for special attention to this configuration in structural design. The study contributes a robust and replicable modeling methodology that can support future experimental calibrations and the development of normative guidelines for the design of structural elements made of ultra-high-performance concrete.

**Keywords:** UHPFRC; Web openings; CDP; Numerical analysis.

## Lista de Figuras

1	Vigas com abertura na alma . . . . .	12
2	Construções de UHPFRC . . . . .	16
3	Número de publicações por ano na plataforma <i>Google Scholar</i> relacionados ao UHPFRC . . . . .	16
4	Exemplos de aberturas em estruturas de concreto . . . . .	21
5	Ilustração critérios de limites de furos em vigas conforme NBR 6118/2023. . . . .	22
6	Exemplo de regiões D . . . . .	24
7	Lei constitutiva do CDP . . . . .	27
8	Exemplo de UHPFRC . . . . .	31
9	Detalhes em UHPC museu MUCEM na cidade de Marseille-França . . . . .	32
10	Painéis em UHPC no Stade Jean-Bouin, Paris, France . . . . .	32
11	Lei constitutiva para tração concreto convencional . . . . .	34
12	Lei constitutiva para tração - UHPFRC . . . . .	35
13	Ensaio experimental realizado por Simão (2014) . . . . .	37
14	Viga VG2 . . . . .	37
15	Detalhamento da VG2 . . . . .	39
16	Modelagem do concreto . . . . .	40
17	Modelagem das armaduras . . . . .	40
18	Leis constitutivas do concreto C30 . . . . .	42
19	Detalhe esquemático do ensaio . . . . .	43
20	Viga com as condições de contorno aplicadas . . . . .	44
21	Malha do concreto . . . . .	46
22	Gráfico comparativo força-deflexão . . . . .	47
23	Deformação plástica no concreto . . . . .	48
24	Deformação plástica da armadura . . . . .	49
25	Gráfico força-deflexão para viga VGP . . . . .	50
26	Gráfico força-deflexão para viga VG1 . . . . .	50
27	Lei constitutiva para a compressão UHPFRC . . . . .	53
28	Lei constitutiva para a tração UHPFRC . . . . .	53
29	Comparativo lei constitutiva de compressão . . . . .	54
30	Comparativo lei constitutiva de tração . . . . .	54
31	Comparativo força-deflexão C30 e UHPFRC . . . . .	55
32	Comparativo de dados C30-UHPFRC . . . . .	56
33	Deformação plástica no UHPFRC . . . . .	57

34	Deformação plástica na armadura (UHPFRC) . . . . .	58
35	Sem abertura . . . . .	59
36	Abertura no centro do vão . . . . .	60
37	Abertura próxima ao apoio . . . . .	60
38	Com estribo . . . . .	61
39	Sem estribo . . . . .	61
40	Resultados em formato gráfico . . . . .	63
41	Resultados em gráficos de barra . . . . .	65
42	C30-S/AB-C/EST - CONCRETO . . . . .	67
43	C30-S/AB-C/EST - AÇO . . . . .	67
44	UHPFRC-S/AB-C/EST - CONCRETO . . . . .	69
45	UHPFRC-S/AB-C/EST - AÇO . . . . .	69
46	C30-APOIO-C/EST - CONCRETO . . . . .	71
47	C30-APOIO-C/EST - AÇO . . . . .	71
48	UHPFRC-APOIO-C/EST - CONCRETO . . . . .	73
49	UHPFRC-APOIO-C/EST - AÇO . . . . .	73
50	C30-MEIO-C/EST - CONCRETO . . . . .	75
51	C30-MEIO-C/EST - AÇO . . . . .	75
52	UHPFRC-MEIO-C/EST - CONCRETO . . . . .	77
53	UHPFRC-MEIO-C/EST - AÇO . . . . .	77
54	C30-S/AB-S/EST - CONCRETO . . . . .	79
55	C30-S/AB-S/EST - AÇO . . . . .	79
56	UHPFRC-S/AB-S/EST - CONCRETO . . . . .	81
57	UHPFRC-S/AB-S/EST - AÇO . . . . .	81
58	C30-APOIO-S/EST - CONCRETO . . . . .	83
59	C30-APOIO-S/EST - AÇO . . . . .	83
60	UHPFRC-APOIO-S/EST - CONCRETO . . . . .	85
61	UHPFRC-APOIO-S/EST - AÇO . . . . .	85
62	C30-MEIO-S/EST - CONCRETO . . . . .	87
63	C30-APOIO-S/EST - AÇO . . . . .	87
64	UHPFRC-MEIO-S/EST - CONCRETO . . . . .	89
65	UHPFRC-MEIO-S/EST - AÇO . . . . .	89
66	Gráfico comparativo UHPFRC-C30 sem abertura . . . . .	92
67	Gráfico comparativo UHPFRC-C30 abertura próxima ao apoio . . . . .	94
68	Gráfico comparativo UHPFRC-C30 abertura no meio do vão . . . . .	96
69	Parâmetros geométricos associados à posição e à dimensão da abertura . . . . .	97

70	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $F_{MÁX}$ . . . . .	100
71	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $\delta_u$ . . . . .	102
72	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $\delta_y$ . . . . .	104
73	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $U_t$ . . . . .	106

## Lista de Tabelas

1	Comparativo entre concreto convencional e UHPFRC . . . . .	28
2	Propriedades do Concreto . . . . .	41
3	Propriedades do aço . . . . .	43
4	Comparativo de dados Experimental x Numérico . . . . .	48
5	Propriedades do Concreto . . . . .	52
6	Comparativo de dados C30-UHPFRC . . . . .	57
7	Variações de modelos estudados . . . . .	62
8	Resultados tabelados . . . . .	64
9	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $F_{MÁX}$ . . . . .	100
10	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $\delta_u$ . . . . .	102
11	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $\delta_y$ . . . . .	104
12	Comparativo entre valores numéricos e calculados de $U_t$ . . . . .	106

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO . . . . .	11
1.2	JUSTIFICATIVAS . . . . .	15
1.3	OBJETIVO GERAL . . . . .	18
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	18
1.5	DESAFIOS TECNOLÓGICOS . . . . .	19
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1	FUROS E ABERTURAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO . . . . .	21
2.2	MODELO CONSTITUTIVO DO <i>CONCRETE DAMAGE PLASTICITY</i> . . . . .	26
2.3	CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO . . . . .	29
2.4	MODELO CONSTITUTIVO PARA O CONCRETO CONVENCIONAL E UHPFRC/UHPC . . . . .	33
2.4.1	COMPRESSÃO . . . . .	33
2.4.2	TRAÇÃO - CONCRETO CONVENCIONAL . . . . .	33
2.4.3	TRAÇÃO - UHPFRC . . . . .	34
2.5	ESTUDO EXPERIMENTAL DE SIMÃO (2014) . . . . .	36
<b>3</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>38</b>
3.1	MODELAGEM NUMÉRICA COM BASE NO MODELO DE SIMÃO (2014)	38
3.1.1	MODELAGEM DA VIGA E DE SEUS COMPONENTES . . . . .	38
3.1.2	ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES AO CONCRETO . . . . .	40
3.1.3	ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES AO AÇO . . . . .	43
3.1.4	APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO . . . . .	43
3.1.5	DEFINIÇÃO DAS MALHAS . . . . .	45
3.1.6	CONFIGURAÇÃO DO <i>STEP</i> . . . . .	46
3.2	RESULTADOS PRELIMINARES . . . . .	47
3.3	EXTRAPOLAÇÃO DO MODELO PARA CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS . . . . .	52
3.4	ESTUDO PARAMÉTRICO . . . . .	59
<b>4</b>	<b>DISCUSSÕES</b>	<b>66</b>
4.1	ANÁLISE DOS MODELOS . . . . .	66
4.1.1	MODELO 1 (C30-SEM ABERTURA-COM ESTRIBOS) . . . . .	66

4.1.2	MODELO 2 (UHPFRC-SEM ABERTURA-COM ESTRIBOS) . . . . .	68
4.1.3	MODELO 3 (C30-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-COM ESTRIBOS) . . . . .	70
4.1.4	MODELO 4 (UHPFRC-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-COM ESTRIBOS) . . . . .	72
4.1.5	MODELO 5 (C30-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-COM ESTRIBOS)	74
4.1.6	MODELO 6 (UHPFRC-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-COM ESTRIBOS) . . . . .	76
4.1.7	MODELO 7 (C30-SEM ABERTURA-SEM ESTRIBOS) . . . . .	78
4.1.8	MODELO 8 (UHPFRC-SEM ABERTURA-SEM ESTRIBOS) . . . . .	80
4.1.9	MODELO 9 (C30-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-SEM ESTRIBOS) . . . . .	82
4.1.10	MODELO 10 (UHPFRC-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-SEM ESTRIBOS) . . . . .	84
4.1.11	MODELO 11 (C30-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-SEM ESTRIBOS)	86
4.1.12	MODELO 12 (UHPFRC-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-SEM ESTRIBOS) . . . . .	88
4.2	EFEITO DO MATERIAL (UHPFRC E C30) . . . . .	90
4.3	EFEITO DA POSIÇÃO DA ABERTURA . . . . .	91
4.3.1	VIGAS SEM ABERTURA . . . . .	91
4.3.2	VIGAS COM ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO . . . . .	93
4.3.3	VIGAS COM ABERTURA NO MEIO DO VÃO . . . . .	95
4.4	REGRESSÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA . . . . .	97
4.4.1	REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $F_{MÁX}$ . . . . .	99
4.4.2	REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $\delta_u$ . . . . .	101
4.4.3	REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $\delta_y$ . . . . .	103
4.4.4	REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $U_t$ . . . . .	105
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>107</b>
5.1	CONCLUSÕES PRINCIPAIS . . . . .	107
5.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO . . . . .	109
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	110

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Devido a numerosas interferências entre projetos, restrições de espaço e à busca pela otimização máxima de materiais, a necessidade de criar furos ou aberturas em elementos estruturais tornou-se comum e frequente.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2023) distingue furos e aberturas conforme o tamanho em relação ao elemento estrutural. Em termos comuns, furos possuem pequenas dimensões, enquanto aberturas não. Alguns exemplos de furos e aberturas são demonstrados na figura 1. No entanto, os critérios para dimensionamento são abordados de maneira simplificada. Para o caso de furos, a norma especifica critérios de posicionamento e dimensões onde considera desprezíveis verificações adicionais na estrutura, enquanto que nos casos de aberturas apenas menciona que deve ser feita a verificação pelo Método das Bielas e Tirantes (MBT). Essa abordagem, embora forneça diretrizes, mostra-se simplista, uma vez que Souza (2004) afirma que em situações envolvendo materiais e comportamentos complexos, como por exemplo, concretos com adição de fibras e elementos protendidos, uma análise mais robusta e refinada deverá ser realizada. Nos casos de elementos de Concreto de Altíssimo Desempenho (UHPC – do inglês *Ultra-High-Performance Concrete*), ou Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado por Fibras (UHPFRC – do inglês *Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*), os elementos estruturais se tornam mais resistentes e mais esbeltos, e assim, a perda proporcional de seção devido à abertura é maior do que em concretos tradicionais (Ullah et al., 2022).

O contexto normativo brasileiro conta ainda com a NBR 16938 (ABNT, 2021), voltada ao projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. No entanto, essa norma não aborda as descontinuidades estruturais, como furos e aberturas, restringindo-se a critérios gerais de dimensionamento de elementos com fibras. Em âmbito internacional, o ACI 318 (ACI, 2019) e o Eurocode 2 (CEN, 2004) reconhecem aberturas como regiões de descontinuidade, recomendando o emprego de MBT.

No que se refere especificamente ao UHPC, algumas normas internacionais já incorporam diretrizes próprias. O AASHTO *Guide Specifications* (AASHTO, 2020) contempla a utilização do UHPC em obras rodoviárias, com foco em aspectos construtivos e de aceitação do material. Na Alemanha, a DAfStb *Richtlinie UHPC* (DAfStb, 2022) reúne recomendações de projeto e execução voltadas ao uso do UHPC, enquanto na Suíça, a SIA 2052 (SIA, 2016) define critérios de dimensionamento para esse material.

Entre essas normas, merece destaque a NF P 18-710 (AFNOR, 2016). Este documento estabelece regras específicas para o UHPFRC e trata das regiões de descontinuidade. No

capítulo dedicado à análise estrutural e dimensionamento aos estados limites últimos, a norma prescreve a utilização de MBT como método de verificação das regiões de descontinuidade.

O comportamento das regiões afetadas por aberturas pode ser explicado pelo Princípio de Saint-Venant (1855), segundo o qual as perturbações locais no campo de tensões, geradas por alterações geométricas ou carregamentos específicos, tendem a se dissipar a certa distância da região afetada. Assim, furos e aberturas alteram significativamente apenas a vizinhança imediata, enquanto seus efeitos se tornam desprezíveis em regiões afastadas (Beer et al., 2015). No entanto, essa simplificação deve ser aplicada com cautela, especialmente em elementos delgados e confeccionados com concretos de alto ou ultra-alto desempenho. Nesses casos, torna-se essencial o uso de modelos numéricos capazes de capturar a redistribuição de tensões e as concentrações de esforços.

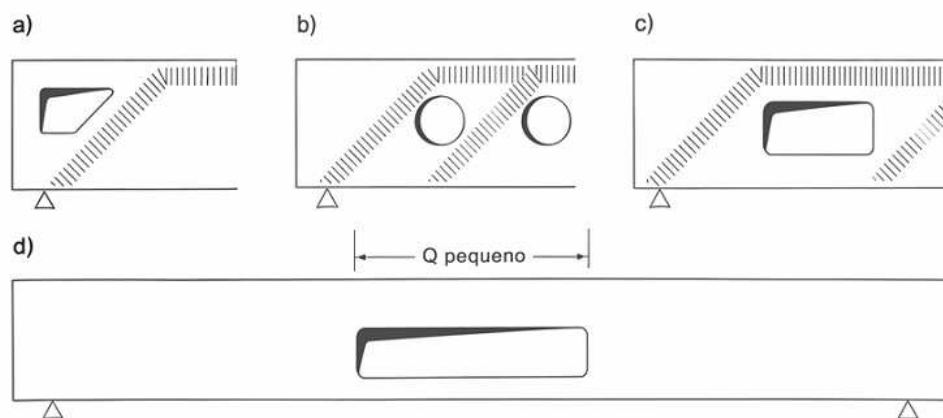


Figura 1: Vigas com abertura na alma  
Fonte: Adaptado de Leonhardt e Monnig (1978).

O MBT, recomendado por diversas normas, é amplamente utilizado para representar essas regiões de descontinuidade. Contudo, sua aplicação prática ainda apresenta limitações, principalmente em situações com geometrias complexas ou materiais de comportamento não linear avançado.

O estudo de Ahmed et al. (2012) mostra que a introdução de aberturas na alma altera profundamente o comportamento estrutural das vigas, reduzindo resistência última, rigidez e resistência ao cisalhamento, além de ampliar a largura das fissuras. Em vigas protendidas, Kunzler (2013) observou divergências entre resultados numéricos e analíticos obtidos pelo MBT, recomendando investigações adicionais em seções I e T. Essas pesquisas evidenciam que, mesmo em concretos convencionais, o posicionamento e a geometria da abertura são

determinantes para o modo de falha, e que reforços convencionais — como estribos adicionais ou chapas metálicas — têm eficácia apenas parcial.

Estudos recentes ampliaram a compreensão desses efeitos. Shnait e Izzet (2024) verificaram reduções de até 33% na força máxima em vigas de concreto armado com aberturas quadradas, mesmo com reforço metálico. Mahmood e Abdullah (2025) destacam que aberturas em regiões de cisalhamento são as mais críticas, podendo reduzir em até 64% a capacidade resistente, enquanto pequenas aberturas (<25% da altura da seção) provocam perdas inferiores a 3%. A ampliação da altura da abertura mostrou-se muito mais prejudicial que o aumento da largura, por comprometer diretamente o banzo comprimido.

Nos concretos de ultra-alto desempenho, as aberturas produzem efeitos mais intensos. O UHPC tende a apresentar comportamento frágil, enquanto o UHPFRC, pela presença de fibras, melhora a resistência ao cisalhamento e a ductilidade (Gidrão et al., 2024). Estudos experimentais de Al-Enezi, Yousef e Tahwia (2023) demonstraram que aberturas com 40% da altura da viga podem reduzir a carga máxima de cisalhamento em 60%. Zagon, Matthys e Kiss (2016) verificaram que, quando incorporada armadura de cisalhamento, vigas de UHPFRC com aberturas de mesma proporção mantiveram resistência comparável à de vigas sem aberturas, evidenciando o potencial do material.

Pesquisas adicionais confirmam que a forma e a posição da abertura influenciam diretamente a rigidez e a resistência. Wan et al. (2025) observaram que aberturas circulares proporcionam melhor distribuição de tensões do que retangulares ou quadradas, e que taxas elevadas de abertura comprometem significativamente a resistência à flexão. Tais achados reforçam a necessidade de abordagens numéricas avançadas e modelos constitutivos refinados para prever com precisão o comportamento desses elementos.

Sob ações dinâmicas, o comportamento das vigas com aberturas se torna ainda mais complexo. Saad, Sakr, Khalifa et al. (2024) realizaram simulações com o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), incluindo efeitos de taxa de deformação, e verificaram que aberturas em regiões de cisalhamento reduzem drasticamente a rigidez e a resistência sob impacto. Já aberturas pequenas no meio do vão podem atuar como dissipadores de energia, mitigando danos localizados. Liu et al. (2024) confirmaram que vigas de UHPC com aberturas retangulares submetidas a impactos apresentam ganhos relevantes em rigidez e energia dissipada, desde que o detalhamento de estribos e a geometria sejam adequados. Ensaios sob torção também demonstram a eficiência do UHPC em compensar a ausência de armadura diagonal (Ali, Hassan e Hussein, 2024).

As propriedades excepcionais do UHPC/UHPFRC — resistência compressiva três a cinco vezes superior à do concreto convencional, elevada durabilidade e absorção de energia — resultam de sua matriz densa e baixa permeabilidade (Azanaw, 2025). Entretanto, desafios

persistem quanto ao custo e à ausência de normalização consolidada. Pesquisas recentes têm explorado inteligência artificial e aprendizado de máquina para prever propriedades mecânicas e otimizar traços (Abdellatief, Hamla e Hamouda, 2025; Xu et al., 2025), além de investigações sobre fluência (Redžić, Grgić e Baloević, 2025), confinamento triaxial (Tang, Feng, Ren et al., 2025) e hibridização de fibras (Khaleel e Dawood, 2025). A produção em escala real de UHPFRC, com materiais locais e processos convencionais, mostrou-se tecnicamente viável para reabilitação de pontes e estruturas de grande porte (Lande et al., 2025).

À luz das evidências reunidas, observa-se que o dimensionamento de vigas com aberturas — sobretudo em concretos de ultra-alto desempenho — exige instrumentos analíticos e numéricos capazes de representar simultaneamente os efeitos de dano, plasticidade, fissuração e atuação das fibras. Nesse cenário, o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) destaca-se como ferramenta consistente para simular a acumulação de plasticidade e a evolução progressiva do dano no concreto (Lee e Fenves, 1998). Assim, investigar o comportamento de vigas de UHPC e UHPFRC com aberturas na alma, por meio de modelagem numérica não linear, torna-se essencial para compreender os efeitos combinados da posição da abertura, da presença de estribos e das propriedades do material sobre o desempenho estrutural global.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

A execução de aberturas em elementos estruturais constitui prática recorrente na engenharia civil, seja para a passagem de instalações prediais, para adequações arquitetônicas ou para a compatibilização de projetos. Embora necessária, essa prática introduz zonas de descontinuidade que alteram significativamente o fluxo de tensões e, conseqüentemente, o desempenho estrutural. A literatura demonstra que, quando não devidamente avaliadas, tais descontinuidades podem comprometer a segurança, reduzir a capacidade resistente e antecipar mecanismos de ruptura (Ahmed et al., 2012; Zagon, Matthys e Kiss, 2016).

No contexto normativo brasileiro, a NBR 6118 (ABNT, 2023) aborda a questão de furos e aberturas de maneira simplificada, restringindo-se a recomendações geométricas e, nos casos mais complexos, à utilização do método das bielas e tirantes. Essa abordagem, entretanto, mostra-se insuficiente para elementos executados com materiais cujas propriedades diferem substancialmente do concreto convencional. É o caso do concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC), cuja resposta estrutural não pode ser reduzida às simplificações normativas tradicionais.

O UHPFRC vem ganhando destaque na engenharia estrutural por sua elevada resistência, baixa porosidade, durabilidade e elevada capacidade de absorção de energia devido às fibras incorporadas. Entretanto, a presença de aberturas tende a modificar significativamente seu comportamento, demandando análises refinadas não contempladas nas normas nacionais.

Esse crescimento pode ser observado tanto na prática profissional quanto no meio acadêmico. Silveira (2025) evidencia o aumento contínuo da aplicação do UHPFRC em obras reais, enquanto Barbosa (2025) demonstra, por meio de um levantamento bibliométrico, a expansão exponencial das pesquisas científicas envolvendo esse material (Figuras 2 e 3).

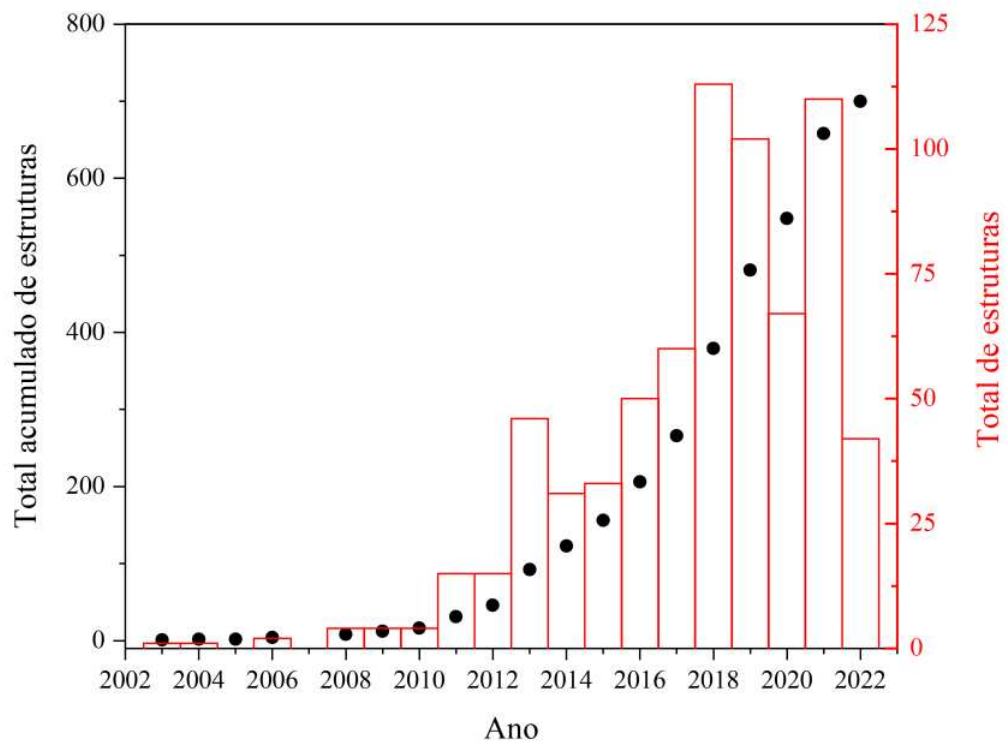


Figura 2: Construções de UHPFRC  
 Fonte: Adaptado de Silveira (2025).

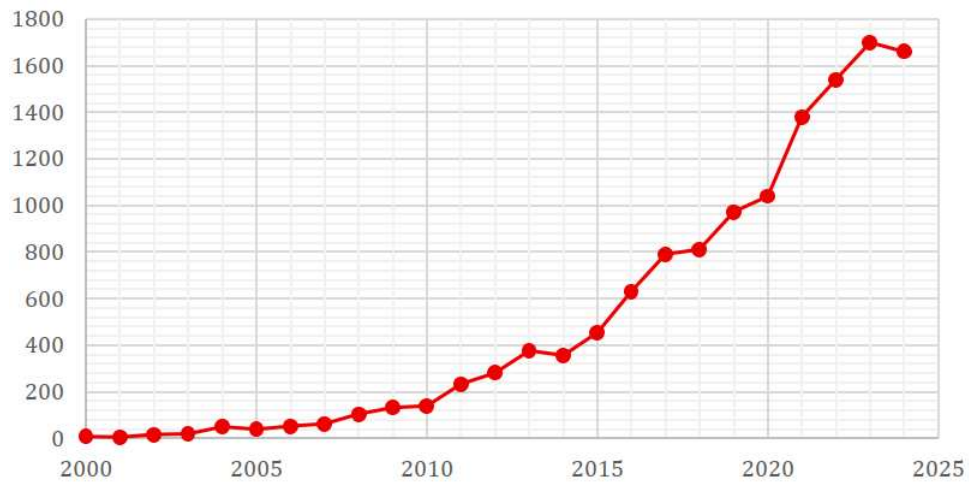


Figura 3: Número de publicações por ano na plataforma *Google Scholar* relacionados ao UHPFRC

Fonte: Barbosa (2025).

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica em três frentes principais:

- Relevância científica: contribui para suprir uma lacuna no estado da arte ao avaliar, de forma comparativa e sistemática, o comportamento de vigas de concreto convencional e UHPFRC com aberturas, utilizando modelagem numérica avançada baseada no *Concrete Damage Plasticity* (CDP).
- Aplicabilidade prática: fornece subsídios para projetistas e construtores compreenderem os riscos associados à execução de aberturas em elementos de concreto de alto desempenho, bem como o papel dos estribos como reforço transversal.
- Impacto normativo: oferece resultados que podem apoiar a discussão sobre a necessidade de diretrizes específicas para elementos estruturais em UHPFRC no Brasil, complementando as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023) e NBR 16938 (ABNT, 2021).

Portanto, este estudo busca não apenas analisar numericamente o comportamento de vigas com aberturas, mas também propor uma reflexão crítica sobre os limites das abordagens normativas atuais e a potencial contribuição de materiais avançados, como o UHPFRC, para a engenharia estrutural contemporânea.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar e comparar, por meio de modelagem numérica com o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* (CDP), o comportamento estrutural de vigas de concreto convencional e de Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC), considerando a presença de aberturas na alma.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Demonstrar e validar uma estratégia de modelagem numérica aplicada à análise de vigas de concreto com aberturas na alma, incluindo o uso do modelo CDP para o Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras.
2. Validar o modelo numérico a partir do estudo de Simão (2014), empregando a não linearidade física do CDP para representar o comportamento do concreto.
3. Ampliar a simulação numérica validada para incluir o UHPFRC.
4. Investigar os efeitos da abertura em diferentes posições (sem abertura, no apoio e no meio do vão) sobre o comportamento global das vigas.
5. Analisar a influência da presença ou ausência de estribos como reforço transversal na redistribuição de tensões e na capacidade resistente das vigas.

## 1.5 DESAFIOS TECNOLÓGICOS

Os principais desafios tecnológicos do trabalho consistem em:

- Os concretos de Ultra-Alto Desempenho (UHPC e UHPFRC) apresentam propriedades excepcionais de resistência e durabilidade, com aplicações bem-sucedidas em projetos de engenharia ao redor do mundo. Entretanto, sua utilização em território nacional ainda é embrionária, em grande parte devido à ausência de normativas e diretrizes específicas, o que impõe uma curva de aprendizado significativa.
- O modelo de Concrete Damage Plasticity (CDP) é um modelo constitutivo refinado usado para simular o comportamento não linear de materiais cimentícios. No entanto, a correta calibração dos parâmetros deste modelo para refletir com precisão o comportamento experimental é um desafio substancial.
- A simulação do comportamento pseudo-dúctil do UHPFRC representa um desafio adicional, uma vez que o CDP, em sua formulação original, não contempla explicitamente a contribuição das fibras. Dessa forma, torna-se necessário ajustar os parâmetros constitutivos e adotar estratégias de modelagem específicas para reproduzir de forma adequada os mecanismos de redistribuição de tensões característicos do material.
- Verifica-se uma lacuna significativa na literatura quanto à sistematização de ensaios experimentais envolvendo aberturas em vigas de concreto, o que impõe a necessidade de um levantamento bibliográfico rigoroso capaz de subsidiar a etapa de validação numérica e de permitir comparações confiáveis.

Apesar dos desafios substanciais, destacam-se os estudos de Gidrão et al. (2024), Gidrão, Krahl e Carrazedo (2021), Silveira et al. (2024), Krahl (2018), Oliveira Ribeiro, Krahl e Carrazedo (2022) e Krahl, Carrazedo e El Debs (2018) que apresentam o emergente desenvolvimento científico do material.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será estruturado conforme os seguintes tópicos:

- **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** Apresenta a revisão da literatura relacionada ao tema. Inicialmente, são discutidos os conceitos e recomendações normativas acerca de furos e aberturas em vigas de concreto, bem como o Método das Bielas e Tirantes, sua fundamentação teórica e aplicações práticas. Em seguida, aborda-se o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* (CDP), utilizado para a representação do comportamento não linear do concreto. Na sequência são detalhadas as características do Concreto de Ultra-Alto Desempenho, destacando suas propriedades mecânicas, vantagens em relação ao concreto convencional e suas implicações no contexto da engenharia estrutural. Por fim é apresentado o estudo experimental de Simão (2014) o qual serviu de base para modelagem numérica do presente estudo.
- **MODELAGEM NUMÉRICA:** Descreve a metodologia empregada na modelagem numérica das vigas com aberturas, utilizando o software ABAQUS. São apresentados os critérios de definição das propriedades dos materiais, as condições de contorno, os parâmetros do modelo e o processo de discretização. Também são discutidos os procedimentos de verificação e validação do modelo numérico, baseados em resultados disponíveis na literatura.
- **DISCUSSÕES:** Apresenta e discute os resultados numéricos obtidos para as vigas de concreto convencional e UHPFRC. São analisados os efeitos da abertura (posição e ausência), da presença ou não de estribos e do tipo de material, com ênfase na resistência máxima e na tenacidade.
- **CONCLUSÃO:** Sintetiza as principais conclusões do trabalho, ressaltando as contribuições da pesquisa, suas limitações e sugestões para estudos futuros.

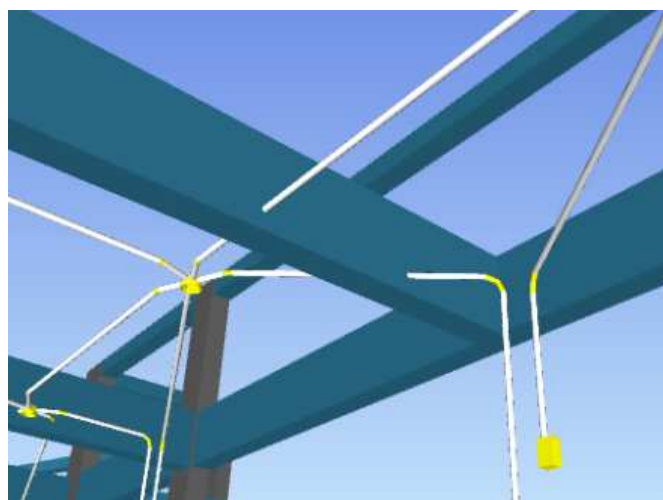
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FUROS E ABERTURAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO

A introdução de furos e aberturas em elementos estruturais é frequente em obras de engenharia, em razão da necessidade de otimização, da compatibilização entre projetos e de restrições de espaço. Quando não são adequadamente planejadas, tais intervenções podem reduzir a capacidade resistente e induzir instabilidades (Simão, 2014). Na figura 4 são demonstrados alguns exemplos de estruturas de concreto com aberturas.



(a) Exemplo de passagem de rede hidráulica  
Fonte: Soares et al. (2021).



(b) Exemplo de passagem de rede elétrica  
Fonte: Amador (2025).

Figura 4: Exemplos de aberturas em estruturas de concreto

A NBR 6118 (ABNT, 2023) distingue furos e aberturas conforme a dimensão relativa ao elemento: de modo geral, furos têm pequenas dimensões, enquanto aberturas apresentam porte maior. A norma admite dispensar verificações adicionais para furos na direção da largura de vigas, desde que sejam atendidas simultaneamente as seguintes condições, ilustradas na figura 5:

- a) Furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo  $2h$ , onde  $h$  é a altura da viga;
- b) Dimensão no máximo  $12\text{ cm}$  e  $h/3$ ;
- c) Distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, de no mínimo  $2h$ ;
- d) Cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras;

Nos casos em que estes limites não sejam atendidos, a verificação estrutural pode ser feita pelo método das bielas e tirantes (Silva e Giongo, 1991).

Portanto, é necessário considerar as perturbações das tensões no entorno das aberturas, prevendo armaduras de furos para resistir às tensões de tração e as armaduras no contorno e cantos das aberturas.

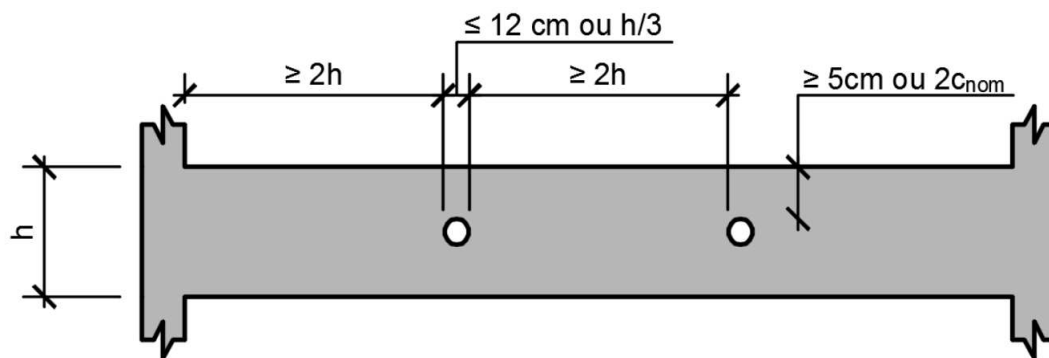


Figura 5: Ilustração critérios de limites de furos em vigas conforme NBR 6118/2023.  
Fonte: Adaptado de Demetrio e Aguiar (2021)

No cenário internacional, documentos amplamente consolidados como o ACI 318 (ACI, 2019) e o Eurocode 2 (CEN, 2004) reconhecem que aberturas configuram regiões de descontinuidade (regiões D) e indicam o uso do Método das Bielas e Tirantes (MBT) como abordagem adequada de verificação. Essa diretriz busca superar as limitações dos modelos simplificados baseados em hipóteses de seções planas, garantindo uma representação mais realista da redistribuição de esforços.

O MBT constitui uma das principais abordagens para a análise local de furos e aberturas em elementos de concreto, fundamentando-se na analogia com treliças estruturais

proposto por Morsch (1909) e Ritter (1899). O método simplifica o comportamento da viga em barras de treliça, e tem como premissa que a carga aplicada na viga percorre um caminho similar ao de uma treliça 2D até chegar aos apoios. Concentrando as tensões em elementos unidimensionais, as regiões de compressão são denominadas bielas e as tensões de tração são denominadas em tirantes, conectando-os por nós (Simão, 2014). O método fundamenta-se no Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade, segundo o qual, uma vez identificado um caminho viável para a ruptura, este fornece uma estimativa segura da carga resistente, assumindo-se que os tirantes atinjam o escoamento antes da ocorrência do colapso global. Também é baseado no princípio de Saint Venant, que afirma que efeitos localizados causados por qualquer carga serão dissipados ou atenuados em regiões suficientemente afastadas do ponto de aplicação (Ladeira, 2019). Para identificar as regiões das estruturas onde é necessária a aplicação do método de bielas e tirantes, a bibliografia divide as regiões entre B e D, conforme supracitado. As regiões “B”, são as regiões onde são aplicáveis as hipóteses de Navier-Bernoulli, onde a distribuição de deformações varia linearmente na seção transversal da estrutura. Já nas regiões “D”, a distribuição das deformações é não linear, devido às descontinuidades estáticas ou geométricas, sugerindo a análise pelo método de bielas e tirantes (Aguilar, 2018).

A norma NBR 6118 (ABNT, 2023) caracteriza as regiões de descontinuidade, conforme hachuradas na Figura 6.

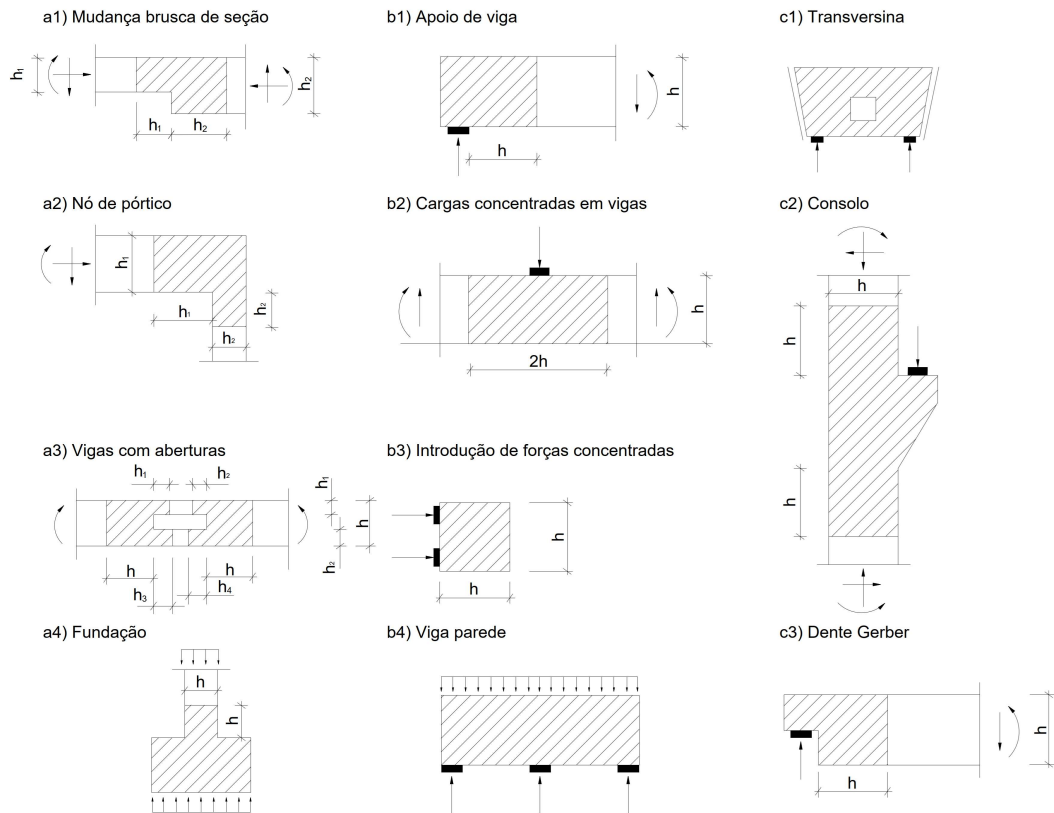


Figura 6: Exemplo de regiões D  
 Fonte: Adaptado de ABNT (2023).

Na prática de projeto, o MBT é amplamente empregado, sobretudo no dimensionamento de regiões descontínuas em estruturas de concreto armado convencional, com suporte em modelos padronizados pelas normas. Contudo, no caso do Concreto de Altíssimo Desempenho ou do Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado por Fibras, sua aplicação torna-se limitada, uma vez que o comportamento pseudo-dúctil introduzido pelas fibras não se enquadra integralmente nos pressupostos simplificadores do método.

Do ponto de vista normativo nacional, observa-se que ainda não há no Brasil regulamentação específica para o UHPC/UHPFRC. A NBR 16938 (ABNT, 2021), dedicada ao concreto reforçado com fibras, estabelece critérios gerais de dimensionamento, mas não contempla situações de descontinuidade estrutural — como furos e aberturas — e tampouco trata dos concretos de Ultra-Alto Desempenho.

Outras normas internacionais abordam de forma direta o UHPC, como o AASHTO Guide Specifications (AASHTO, 2020), nos Estados Unidos, que contempla sua aplicação em obras rodoviárias; a DAfStb Richtlinie UHPC (DAfStb, 2022), na Alemanha, que apresenta recomendações de projeto e execução com ênfase em métodos avançados de análise; e a SIA 2052 (SIA, 2016), na Suíça, que define parâmetros gerais de dimensionamento. Nenhuma dessas,

entretanto, trata explicitamente de descontinuidades.

Nesse conjunto, destaca-se a NF P 18-710 (AFNOR, 2016), publicada na França como complemento ao Eurocode 2, por abordar de forma explícita as regiões de descontinuidade em elementos de UHPFRC, estabelecendo a modelagem por MBT e critérios normativos de dimensionamento aplicáveis a aberturas em vigas e lajes.

Embora essa norma represente um avanço importante ao normatizar o uso do MBT no contexto do UHPFRC, trata-se de uma abordagem de caráter simplificado, adequada ao dimensionamento prático, mas que pode ser complementada, em investigações acadêmicas, por modelos constitutivos mais sofisticados capazes de considerar de forma detalhada os efeitos não lineares do material. Nessa perspectiva, métodos baseados em modelos constitutivos mais sofisticados, como o Concrete Damage Plasticity (CDP), mostram-se complementares e mais adequados para investigações científicas, pois permitem capturar de forma satisfatória os mecanismos de redistribuição de tensões e a resposta global da estrutura. A literatura recente reforça essa visão, indicando que o CDP constitui ferramenta confiável para análises não lineares de concretos de alto e Ultra-Alto Desempenho. Nesse sentido, Gidrão et al. (2024) demonstram que o modelo é capaz de reproduzir consistentemente diferentes cenários de carregamento e ruptura, consolidando sua aplicabilidade em investigações voltadas ao UHPFRC.

## 2.2 MODELO CONSTITUTIVO DO *CONCRETE DAMAGE PLASTICITY*

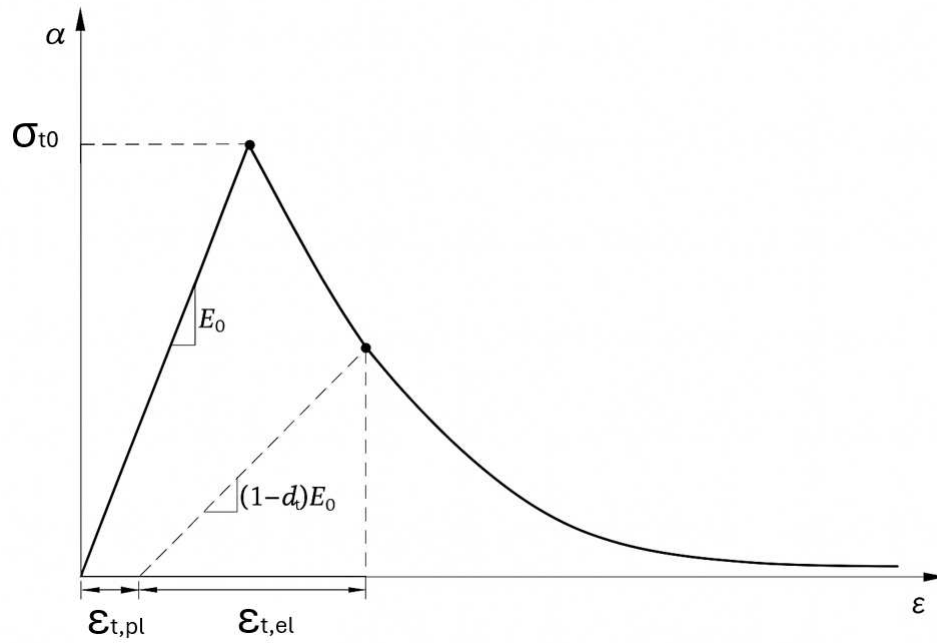
As estruturas de concreto armado apresentam uma complexidade intrínseca na análise numérica, decorrente da sua constituição não linear (Mehta e Monteiro, 2014). Essa não linearidade resulta em fenômenos como microfissuramento, esmagamento, escoamento da armadura, que representam desafios substanciais para a modelagem computacional precisa.

Nesse contexto, o método dos elementos finitos (MEF) destaca-se como ferramenta essencial para a análise de materiais com comportamento não linear, ao permitir a discretização do domínio contínuo e a consideração de leis constitutivas avançadas. Dentre essas leis, o *Concrete Damage Plasticity* (CDP) figura como um dos modelos mais amplamente empregados para representar o concreto e outros materiais frágeis e semirígidos (Farias, Marques e Araújo, 2016).

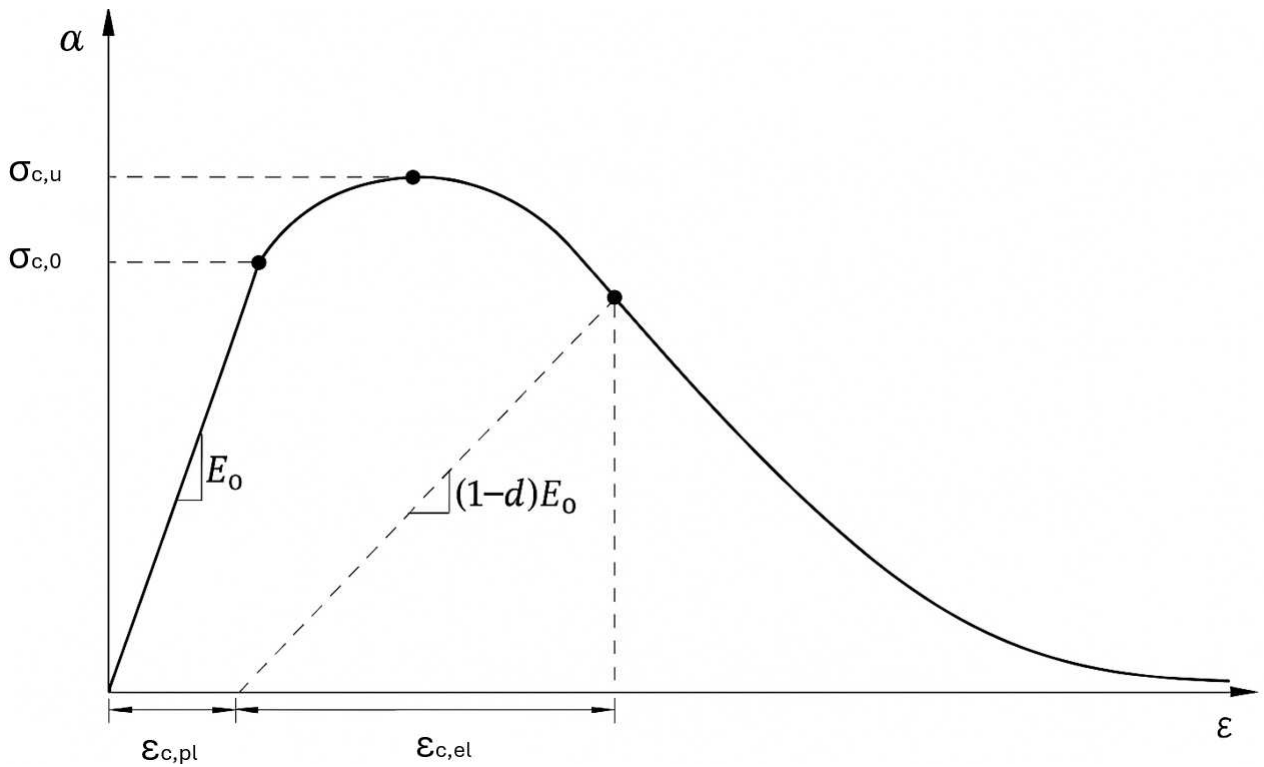
O CDP combina conceitos de plasticidade — responsáveis por descrever as deformações permanentes — e de mecânica do dano, que quantifica a degradação da rigidez do material à medida que ocorrem fissuras e esmagamentos. Essa abordagem permite reproduzir o comportamento não linear do concreto sob diferentes estados de tensão e regimes de carregamento. Implementado no software ABAQUS, o modelo fornece uma plataforma robusta para a execução de simulações tridimensionais avançadas, capazes de capturar os mecanismos de fissuração, confinamento e redistribuição de tensões que governam a resposta estrutural (Simulia, 2016).

Nas figuras 7.a e 7.b são representados os comportamentos à tração e compressão uniaxiais, respectivamente, típicos do CDP, onde:

- $\varepsilon_{t,pl}$  e  $\varepsilon_{c,pl}$  referem-se às deformações plásticas na tração e compressão, respectivamente;
- $\varepsilon_{t,el}$  e  $\varepsilon_{c,el}$  se referem as deformações elásticas na tração e compressão, respectivamente;
- $E_0$  é o módulo de elasticidade inicial;
- $d$  é o índice de dano;
- $\sigma_t$  é a máxima tensão de tração no limite elástico;
- $\sigma_{c,0}$  é o limite de elasticidade na compressão;
- $\sigma_{c,u}$  é a máxima tensão de compressão.



(a)



(b)

Figura 7: Lei constitutiva do CDP  
 Fonte: Simulia (2016).

O modelo CDP é uma modificação da hipótese de resistência de Drucker e Prager (1952).

Sua falha plástica é determinada pela energia de deformação não dilatacional e a superfície limite no estado de tensões assume a forma de um cone. Na modificação, a superfície de falha não precisa ser um círculo e a razão da distância entre o eixo hidrostático e o meridiano de compressão é dado por um coeficiente  $K = 2/3$ . Segundo resultados experimentais de Birtel e Mark (2006), os meridianos são representados por hipérbolas, as quais são corrigidas por uma excentricidade  $\epsilon = 0,1$ . Ressalta-se, contudo, que tanto o valor de  $K$  quanto a excentricidade  $\epsilon$  podem ser ajustados em função do material analisado, de modo a representar de forma mais precisa o comportamento observado experimentalmente.

Outro parâmetro importante para descrever o estado do material é o ponto em que o concreto apresenta falha sob compressão biaxial. Para este, o parâmetro  $f_{b,0}/f_{c,0}$  é a razão das tensões no estado biaxial e uniaxial, e leva em conta o confinamento do material. O manual do usuário do ABAQUS especifica o valor padrão de  $f_{b,0}/f_{c,0} = 1,12$  (Simulia, 2016).

Um parâmetro adicional que caracteriza o desempenho do concreto sob tensão composta é o ângulo de dilatação, ou seja, o ângulo de inclinação da superfície de falha em relação ao eixo hidrostático, medido no plano meridiano. Fisicamente, o ângulo de dilatação  $\Psi$  é interpretado como um ângulo de atrito interno do concreto. Em simulações, geralmente assume-se valores de  $\Psi$  entre  $36^\circ$  e  $55^\circ$  (Simulia, 2016).

Além disso, o parâmetro de viscosidade  $\mu$  representa o tempo de relaxamento do sistema viscoplástico e a deformação plástica avaliada no modelo de referência não viscoso (Kmiecik e Kaminski, 2011; Simulia, 2016).

Para os casos de UHPFRC, os parâmetros exibem variações significativas em relação aos materiais convencionais. A tabela 1 apresenta essa comparação: de um lado, os valores propostos por Birtel e Mark (2006), definidos a partir de calibração numérica do modelo CDP no Abaqus com base em ensaios experimentais de concretos convencionais; de outro, os parâmetros obtidos por Krahl, Carrazedo e Debs (2016), igualmente derivados de resultados experimentais, mas ajustados por meio de análises numéricas para representar o comportamento de elementos em UHPFRC.

Parâmetros	Birtel e Mark (2006)	Krahl, Carrazedo e Debs (2016)
$\Psi$	$30^\circ$	$46,5^\circ$
$f_{b,0}/f_{c,0}$	1,16	1,07
$\epsilon$	0,1	0,1
$K$	0,6667	0,95

Tabela 1: Comparativo entre concreto convencional e UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).

## 2.3 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) é um compósito cimentício avançado, concebido para suprir as demandas de projetos estruturais cada vez mais arrojados, nos quais elevada capacidade resistente, durabilidade prolongada e maior esbeltez se tornam requisitos fundamentais (Cechella et al., 2011). A sua formulação distingue-se pela baixa relação água/cimento ( $a/c < 0,25$ ), pela otimização granulométrica e pelo uso de adições minerais, como sílica ativa, metacaulim e quartzo micronizado, associadas a superplastificantes de alta eficiência. Essa combinação gera uma matriz extremamente densa e homogênea, caracterizada por reduzida porosidade e permeabilidade, o que se traduz em resistências à compressão frequentemente superiores a 150 MPa, resistência à tração direta acima de 5 MPa e módulo de elasticidade elevado (Ullah et al., 2022). Como consequência, o UHPC apresenta desempenho superior ao concreto convencional, sobretudo em ambientes agressivos, nos quais a durabilidade é fator determinante.

Além de suas propriedades mecânicas notáveis, o UHPC destaca-se também pelo comportamento físico-químico diferenciado. A elevada densidade da matriz cimentícia confere ao material resistência superior à penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e dióxido de carbono, prolongando a vida útil das estruturas e reduzindo custos de manutenção ao longo do ciclo de vida. Essas características vêm impulsionando sua aplicação em diferentes frentes da engenharia, como pontes, túneis, edifícios altos, elementos pré-moldados e reforços estruturais, onde se busca simultaneamente desempenho, durabilidade e eficiência construtiva (Silveira, 2025).

Apesar dos avanços do UHPC, sua resposta pós-fissuração permanece predominantemente frágil, uma vez que a matriz densificada restringe a redistribuição de tensões. Para superar essa limitação, foi desenvolvido o Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPRFC), no qual fibras metálicas ou poliméricas atuam no interior da matriz cimentícia como elementos de transferência de esforços, retardando a abertura das fissuras, reduzindo o espaçamento entre elas e aumentando a capacidade de deformação do material. Esse mecanismo confere ao compósito maior tenacidade, capacidade de dissipação de energia e resistência residual após a fissuração (Gidrão et al., 2024; Krahl, Carrazedo e El Debs, 2018).

Ensaio experimentais e numéricos têm demonstrado que a adição de fibras é particularmente eficaz em solicitações de cisalhamento e torção, em que o concreto convencional apresenta degradação precoce. No UHPRFC, a interação entre matriz e fibras proporciona incremento significativo da resistência, estabilizando a resposta estrutural mesmo na presença de descontinuidades como aberturas na alma (Elsayed et al., 2022; Zagon, Matthys e Kiss, 2016; Al-Enezi, Yousef e Tahwia, 2023). Sob ações dinâmicas — como impacto, fadiga ou explosões —, observam-se ganhos adicionais, relacionados à maior absorção de energia e ao

retardo da propagação de fissuras (Liu et al., 2024). Em elementos submetidos à torção, estudos recentes mostraram que o UHPFRC aumenta a resistência última e retarda a formação de fissuras críticas ao longo das diagonais principais (El-Basiouny, Askar e El-Zoughiby, 2025).

Do ponto de vista da modelagem constitutiva, o UHPFRC exige leis de tração mais elaboradas do que aquelas aplicadas ao concreto convencional, incluindo a consideração de um patamar de resistência residual após a fissuração e a representação do ramo descendente calibrado pela energia de fratura, de modo a garantir independência em relação ao tamanho de malha. Além disso, fatores como a orientação e distribuição das fibras durante o lançamento, a geometria e posição das aberturas e a presença de armaduras transversais afetam diretamente o desempenho, podendo potencializar ou reduzir os benefícios do material (Sarah, Hejazi e Ostovar, 2019; Youm e Hong, 2021).

Em síntese, o UHPFRC representa uma evolução decisiva em relação ao UHPC, pois combina elevada resistência mecânica e durabilidade com uma resposta pós-fissuração mais dúctil e segura. Essas propriedades tornam o material particularmente promissor para vigas com aberturas na alma, nas quais as descontinuidades geométricas induzem concentrações de tensões e trajetórias complexas de esforços.

O interesse científico e tecnológico pelo UHPC e pelo UHPFRC tem se intensificado de maneira expressiva nas últimas décadas, acompanhando o aumento das aplicações em obras reais e a expansão da produção científica internacional. Silveira (2025) evidencia a crescente utilização do UHPFRC em empreendimentos de engenharia, enquanto Barbosa (2025), por meio de análise bibliométrica, confirma a tendência exponencial de publicações sobre o tema. As pesquisas recentes abrangem múltiplos eixos: estratégias de sustentabilidade, voltadas à redução de emissões e ao uso de materiais alternativos ou reciclados na matriz cimentícia (Chen et al., 2024; Fan et al., 2024; Perera e Ranjith, 2024); avaliação de diferentes tipologias de fibras, incluindo híbridas e nanoestruturadas, para aprimorar resistência mecânica, tenacidade e durabilidade frente a diferentes condições de solicitação (Yoo, Banthia e Yoon, 2024; V. e J., 2024); e análises sob solicitações dinâmicas, como impacto, fadiga e explosões, que destacam o potencial do material em cenários extremos (Liu et al., 2024). Além disso, cresce o interesse pelo comportamento em longo prazo, investigando fenômenos de retração, fluência e manutenção das propriedades mecânicas e de durabilidade ao longo da vida útil das estruturas (Guo et al., 2024).

Em comparação ao concreto convencional, o UHPC e, em especial, o UHPFRC oferecem vantagens inequívocas, tais como maior capacidade resistente, redução das dimensões estruturais e durabilidade ampliada. Entretanto, persistem limitações importantes: o alto custo de produção, a ausência de normativas consolidadas que orientem seu uso em diferentes

contextos e as incertezas quanto ao desempenho estrutural sob condições não usuais, como no caso de elementos com aberturas (Redaelli e Nseir, 2020; Al-Enezi, Yousef e Tahwia, 2023). No contexto específico das vigas com aberturas na alma, a incorporação de fibras no UHPFRC tem se mostrado eficaz em redistribuir tensões nas regiões de descontinuidade, atenuando a fragilidade característica do UHPC. Ainda assim, os resultados indicam que o comportamento global é altamente condicionado por variáveis de projeto, como geometria e posição da abertura, taxa de armadura longitudinal e presença de estribos, fatores decisivos para a definição da resistência e da ductilidade residual (Bertram, 2015; Zagon, Matthys e Kiss, 2016; Sarah, Hejazi e Ostovar, 2019; Redaelli e Nseir, 2020; Youm e Hong, 2021; Sung-Gul e Hyun-Soo, 2022; Elsayed et al., 2022; Al-Enezi, Yousef e Tahwia, 2023).

Enquanto o UHPC oferece elevada resistência e durabilidade, o UHPFRC acrescenta ductilidade e maior capacidade de redistribuição de tensões, características fundamentais em elementos com descontinuidades, como vigas com aberturas. A consolidação de seu uso estrutural depende da integração entre ensaios experimentais, modelagem numérica avançada e formulação de diretrizes normativas específicas, assegurando desempenho seguro e eficiente em aplicações práticas. As figuras 8, 9 e 10 ilustram exemplos de aplicações práticas de UHPC.



Figura 8: Exemplo de UHPFRC  
Fonte: Maffezzoli (2018).



Figura 9: Detalhes em UHPC museu MUSEM na cidade de Marseille-França  
Fonte: Camargo (2018).



Figura 10: Painéis em UHPC no Stade Jean-Bouin, Paris, France  
Fonte: Müseler (2022).

## 2.4 MODELO CONSTITUTIVO PARA O CONCRETO CONVENCIONAL E UHPFRC/UHPC

### 2.4.1 COMPRESSÃO

Para o comportamento de compressão do concreto, um modelo amplamente reconhecido é o de Carreira e Chu (1985). O modelo é representado pelas equações eq.1 e eq.2.

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 E_{c0}}} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{\beta \frac{\epsilon}{\epsilon_0}}{\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^\beta} \right] \quad (2)$$

Onde  $\sigma$  é a resistência à compressão do concreto,  $E_{c0}$  o módulo de elasticidade,  $\epsilon_0$  a deformação no pico e  $\epsilon$  a de formação na tensão analisada.

Para ambos os concretos (i.e., UHPFRC e Concreto convencional) será utilizado o modelo de Carreira e Chu (1985), conforme Gidrão et al. (2024).

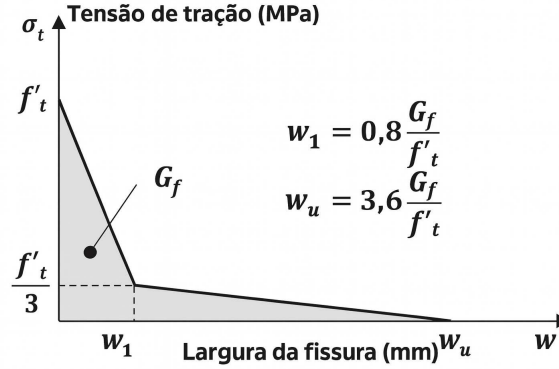
### 2.4.2 TRAÇÃO - CONCRETO CONVENCIONAL

Para descrever o comportamento do concreto sob tração, o presente trabalho adotou um modelo amplamente utilizado: CEB-FIP, *Comité Européen du Béton e a Fédération Internationale de la Précontrainte* (CEB-FIP, 2010). Este modelo é uma referência internacional que oferece diretrizes abrangentes para a caracterização do concreto. O modelo do CEB-FIP é conhecido por sua precisão em capturar a resposta do concreto sob tensões de tração, incluindo a formação e propagação de fissuras. Ele utiliza uma abordagem baseada em parâmetros que refletem a resistência à tração direta e a deformação correspondente, proporcionando uma representação satisfatória do comportamento real do concreto (eq.3, eq.4). A figura 11 demonstra o comportamento dos materiais de acordo com as equações propostas.

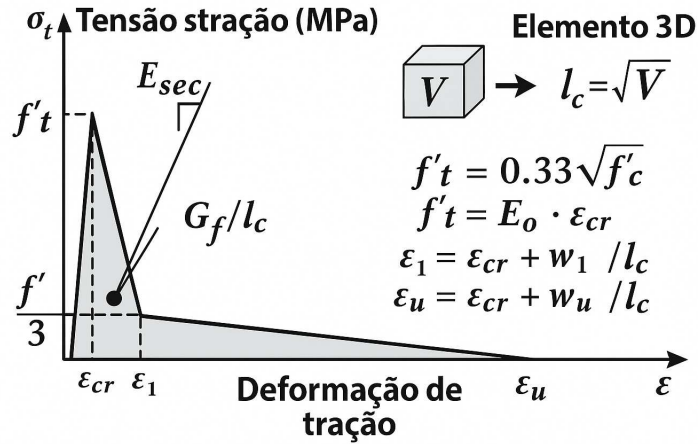
$$f'_t = 0,33\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

$$f'_t = E_0 \epsilon_{cr} \quad (4)$$

Onde  $f'_t$  é a resistência a tração do concreto,  $f'_c$  a resistência à compressão,  $E_c$  o módulo de elasticidade e  $\epsilon_{cr}$  é a deformação no pico.



(a)



(b)

Figura 11: Lei constitutiva para tração concreto convencional  
Adaptado de CEB-FIP (2010)

### 2.4.3 TRAÇÃO - UHPFRC

Para o UHPFRC o comportamento à tração pode ser descrito segundo o modelo proposto por Gidrão et al. (2024), o qual é descrito pela equação 5 e demonstrado na figura 12.

$$\sigma_t(\epsilon) = \frac{W_t}{I_p \sqrt{\pi/2}} e^{\frac{-2(\epsilon - \epsilon_{cr})}{I_p^2}} + \sigma_U \quad (5)$$

Onde  $W_t$  é a energia total,  $I_p$  é a deformação de inflexão,  $\epsilon$  é a deformação total e  $\epsilon_{cr}$  é a deformação observada no pico.

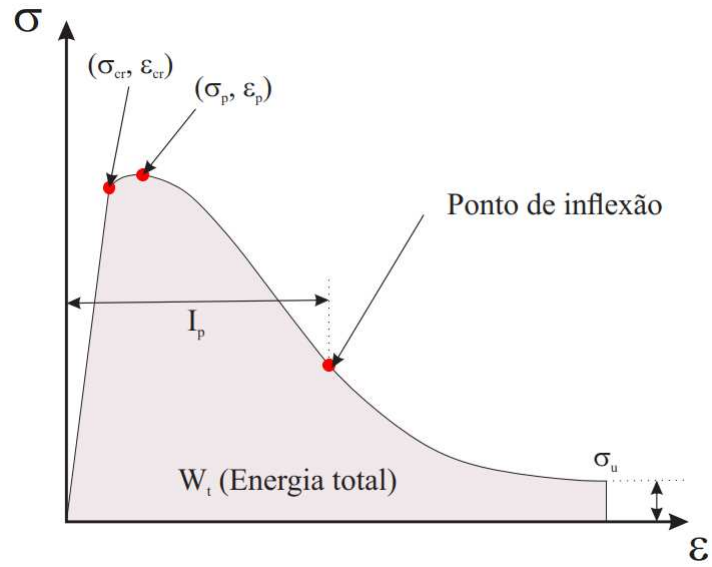


Figura 12: Lei constitutiva para tração - UHPFRC  
Gidrão et al. (2024)

## 2.5 ESTUDO EXPERIMENTAL DE SIMÃO (2014)

Simão (2014) realizou um estudo experimental sobre o comportamento de vigas de concreto armado com aberturas retangulares na alma. O programa foi composto por cinco vigas biapoiadas, identificadas como VGP, VG1, VG2, VG3 e VG4, todas com seção transversal de  $12 \times 30$  cm e vão de 3,0 m e carregamento em oito pontos, conforme o esquema de ensaio apresentado na Figura 13.

A viga VGP foi utilizada como referência, sem abertura na alma. As demais vigas apresentaram aberturas retangulares horizontais de diferentes dimensões (0,5h e 2h) e posições em relação à face do apoio, conforme descrito a seguir:

- VG1 – abertura curta (0,5h) a 0,5h da face do apoio;
- VG2 – abertura longa (2h) a 0,5h da face do apoio;
- VG3 – abertura curta (0,5) a 2h da face do apoio;
- VG4 – abertura longa (2h) a 2h da face do apoio.

O dimensionamento global seguiu a NBR 6118 (ABNT, 2023), e o reforço no entorno das aberturas foi definido pelo MBT. Para apoiar a definição dos modelos de bielas, foram realizadas análises no software *SAP2000*, em regime elástico linear, que permitiram visualizar o fluxo de tensões e as concentrações nos cantos das aberturas, conforme ilustrado na Figura 14.

Todas as vigas foram submetidas a ensaios sob flexão em oito pontos, com instrumentação voltada ao monitoramento das deformações nas armaduras longitudinais e transversais e das flechas no meio do vão. Durante os ensaios, observou-se a formação de fissuras diagonais concentradas nos cantos das aberturas, que se propagaram em direção ao banzo comprimido. Os modos de ruptura registrados confirmaram esse padrão, caracterizando comportamento governado pela flexão, mas com perturbações significativas do fluxo de tensões na região das aberturas.

Entre as vigas com abertura, a VG2, caracterizada por uma abertura longa (2h) próxima ao apoio (0,5h da face), apresentou o comportamento mais crítico quanto à concentração de tensões e deformações localizadas. Apesar disso, manteve resistência última muito próxima à da viga de referência (VGP), atingindo 9.250 kgf frente a 8.833 kgf da referência (+4,7%). Já a deflexão máxima no meio do vão foi de 16,3 mm, aproximadamente 26% superior à registrada na viga VGP (12,9 mm). A redução do índice de rigidez foi inferior a 5% em todos os casos, demonstrando que, de forma global, o desempenho estrutural foi preservado. O comportamento semelhante entre a viga de referência e a VG2 sugere que a presença de

estribos desempenhou papel fundamental na redistribuição dos esforços, atenuando os efeitos negativos das aberturas.

O estudo paramétrico e a análise estatística conduzida por Simão (2014) indicaram que o comprimento da abertura exerceu maior influência na intensificação das tensões nos cantos, enquanto a posição da abertura teve maior impacto na rigidez e na flecha no meio do vão.

Os resultados obtidos forneceram dados experimentais consistentes para a compreensão do efeito de aberturas na alma de vigas, além de confirmar a aplicabilidade do Método das Bielas e Tirantes no detalhamento dos reforços locais. Dessa forma, a viga VG2 foi adotada como referência para a modelagem numérica desenvolvida neste trabalho, servindo de base para a calibração e validação do modelo CDP.



Figura 13: Ensaio experimental realizado por Simão (2014)  
Fonte: Simão (2014)

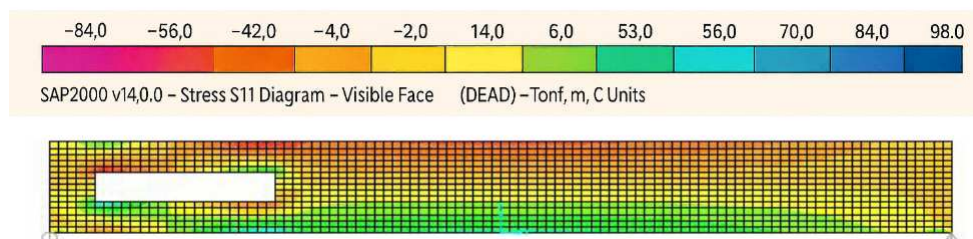


Figura 14: Viga VG2  
Simão (2014)

## **3 MODELAGEM NUMÉRICA**

Após um estudo detalhado da bibliografia disponível, foi selecionada uma viga, com abertura na alma, dimensionada pelo método das bielas e tirantes, que havia sido previamente ensaiada experimentalmente pelo autor Simão (2014), para ser o objeto da modelagem numérica deste trabalho.

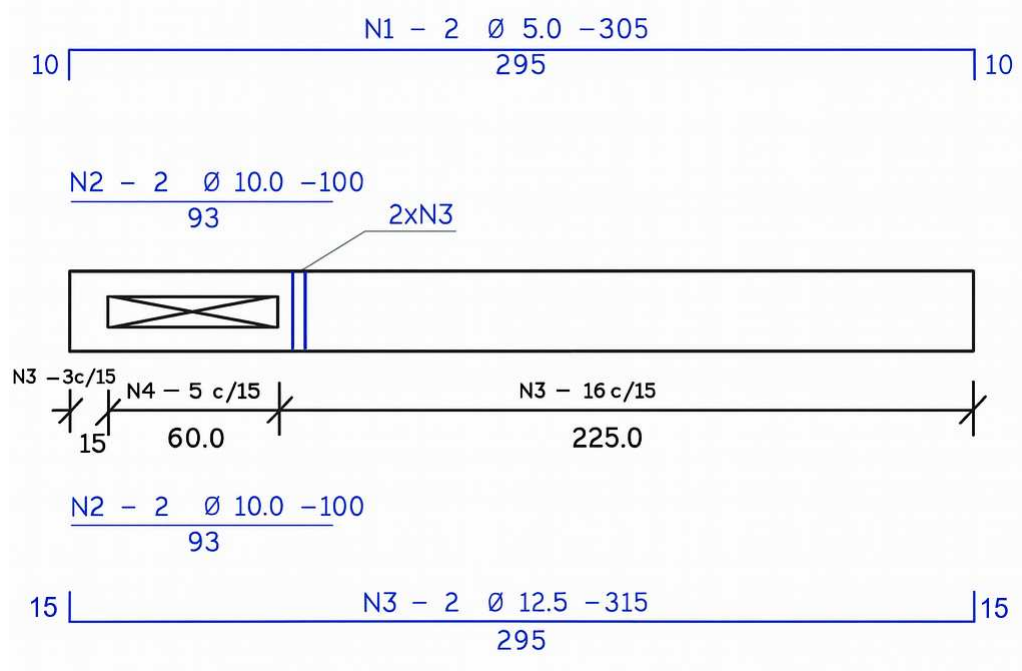
Na subseção 3.1, a viga, denominada pelo autor como VG2, foi validada numericamente utilizando o software de elementos finitos ABAQUS. Nos próximos tópicos, é descrito o passo a passo da modelagem numérica realizada.

Na subseção 3.3, serão variados os parâmetros para o estudo paramétrico.

### **3.1 MODELAGEM NUMÉRICA COM BASE NO MODELO DE SIMÃO (2014)**

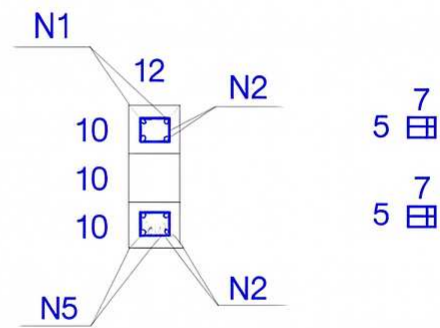
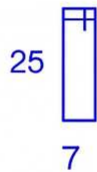
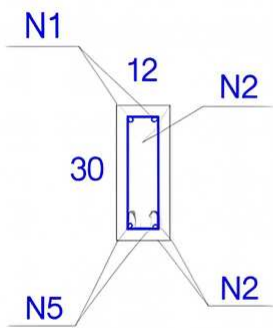
#### **3.1.1 MODELAGEM DA VIGA E DE SEUS COMPONENTES**

A primeira etapa consistiu na criação de um modelo tridimensional da viga VG2. Utilizou-se as dimensões e geometria fornecidas pelo estudo, conforme figura 15, garantindo a precisão do modelo.



Seção Cheia

Seção Vazada



Estribos -N3-19 Ø 5,0-75

Estribos -N4-10 Ø 4,2-75

Figura 15: Detalhamento da VG2  
Fonte: Simão (2014).

Inicialmente foi modelada a seção em concreto de 12 x 30 cm e com comprimento 300 cm. A abertura com dimensões de 10 x 60 cm, localizada no centro em relação à altura e a 15 cm da borda esquerda. A geometria foi subdividida em linhas de referência para facilitar o processo de discretização da malha e a posterior aplicação das condições de contorno, conforme figura 16.

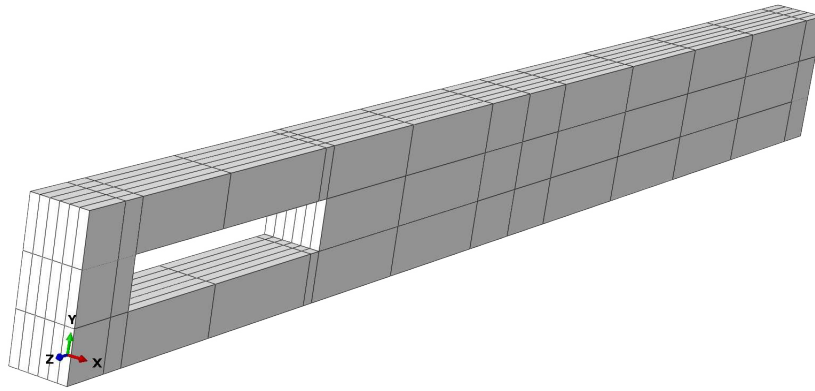


Figura 16: Modelagem do concreto  
Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida modeladas as armaduras N1, N2, N3, N4 e N5. Cada uma das armaduras foi posicionada conforme a distribuição indicada, respeitando quantidades e espaçamentos. Conforme figura 17.

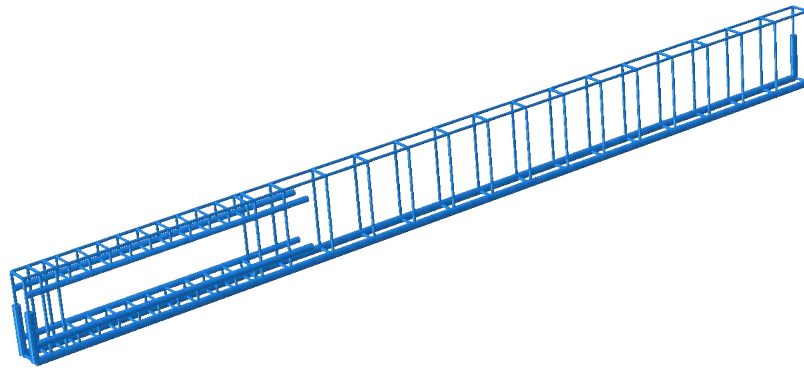


Figura 17: Modelagem das armaduras  
Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.1.2 ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES AO CONCRETO

Os concretos dosados no estudo experimental de Simão (2014) possuem resistência a compressão média de 30 MPa. Para as propriedades elásticas do material foram atribuídas como Módulo de Elasticidade  $E_C = 27.529,70$  MPa e Coeficiente de *Poisson*  $\nu = 0,20$  (CEB-FIP, 2010). Como parâmetros do CDP foram adotados os valores recomendados pelo Simulia

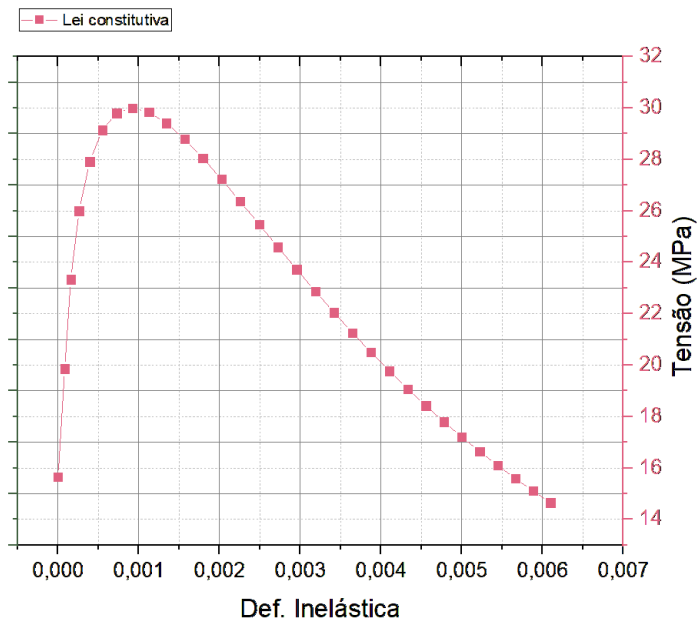
(2016), ângulo de dilatação  $\Psi = 55^\circ$ , excentricidade  $\epsilon = 0,1$ ,  $fb_0/fc_0 = 1,12$ , coeficiente  $K = 0,6667$  e viscosidade  $\mu = 0,00001$ . As propriedades estão resumidas na tabela 2.

Cabe destacar que os valores foram definidos de modo a manter coerência com as referências apresentadas no Capítulo 2.2, assegurando a representatividade do comportamento do concreto de resistência normal no contexto do modelo CDP. Foram ainda realizados ensaios numéricos preliminares de calibração, nos quais se avaliou a influência de diferentes combinações paramétricas. Dentre as alternativas testadas, optou-se por aquela que apresentou maior correlação entre os resultados numéricos e os dados experimentais, especialmente em termos de carga máxima e deflexões características.

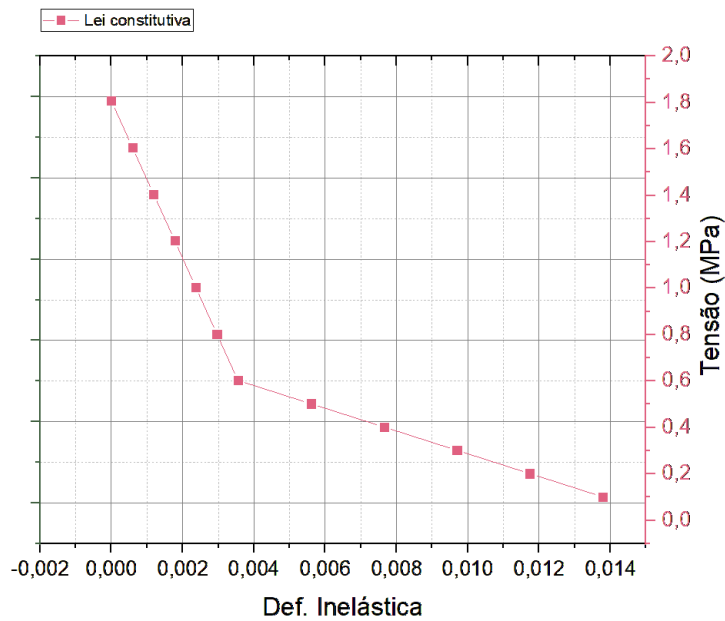
Propriedade	Valor
$E_c$ (MPa)	27.529,70557
$\nu$	0,20
$\Psi$	$55^\circ$
$\epsilon$	0,1
$fb_0/fc_0$	1,12
k	0,6667
$\mu$	0,00001

Tabela 2: Propriedades do Concreto  
 Fonte: Autoria própria (2025).

As propriedades do comportamento à tração e compressão foram inseridas conforme os modelos constitutivos utilizados. Para a compressão utilizou-se o modelo de Carreira e Chu (1985) e para a tração o modelo do CEB-FIP (2010). Neste caso, a resistência à tração não foi obtida por ensaio direto, mas calculada a partir da correlação com a resistência à compressão prevista pelo modelo, conforme relatado no Capítulo 2.4.1. As leis constitutivas dos materiais são representadas na figura 18.



(a) Lei constitutiva para a compressão



(b) Lei constitutiva para a tração

Figura 18: Leis constitutivas do concreto C30  
 Fonte: Autoria própria (2025).

Para a curva de tração, aplicou-se a correção de malha em função do tamanho médio dos elementos finitos, conforme modelo CEB-FIP (2010).

### 3.1.3 ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES AO AÇO

No modelo experimental, foram adotadas barras de aço do tipo CA50 e CA60, variando do diâmetro de 4,2 a 12,5 mm. Para todas as barras foram atribuídos os parâmetros Módulo de Elásticidade  $E_C = 200.000,00$  MPa e Coeficiente de Poisson  $\nu = 0,30$ . O aço foi modelado considerando-se o comportamento plástico, definido no Abaqus a partir da curva tensão–deformação disponível na literatura. Todos os elementos de aço tiveram a seção atribuída como tipo treliça com as áreas e tensão de escoamento conforme tabela 3.

Posição	Diâmetro (mm)	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	Tensão de Escoamento (MPa)
N1	5,0	19,63	600
N2	10,0	78,53	500
N3	12,5	122,71	500
N4	5,0	19,63	600
N5	4,2	13,85	600

Tabela 3: Propriedades do aço  
Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.1.4 APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesta fase, foram definidas as condições de contorno, para simular o comportamento real da viga durante o ensaio. O modelo do ensaio é representado na figura 19, onde a viga está biapoiada e recebe a carga por 8 pontos de contato.

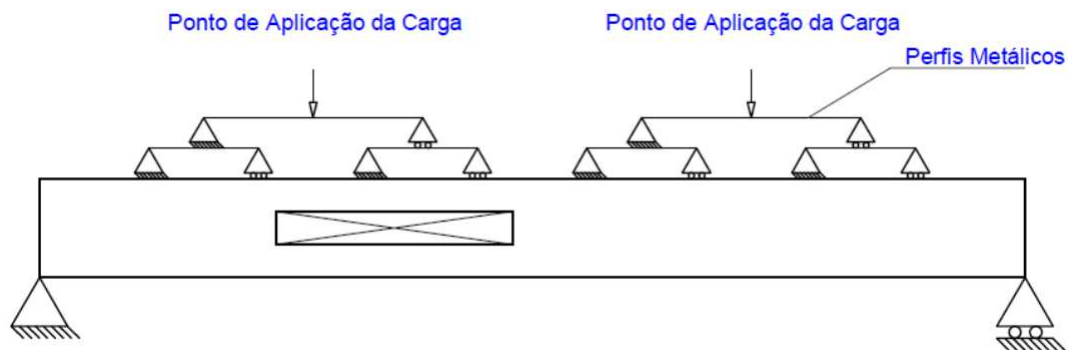


Figura 19: Detalhe esquemático do ensaio  
Fonte: Simão (2014).

Para aproximar o comportamento numérico ao real, ambos os apoios da viga foram modelados como molas que conectam o ponto até o eixo X (figura 20), simulando assim a

flexibilização inerente das estruturas de transferência de carga, evitando a idealização de apoios perfeitamente rígidos. O coeficiente de mola considerado para os apoios foi de 25000 N/m. O coeficiente foi definido a partir de um processo iterativo de calibração, no qual diferentes valores foram testados até que se obtivesse a melhor correspondência entre a resposta numérica e o comportamento observado experimentalmente, especialmente no trecho de deformações iniciais da curva força–deflexão. O apoio mais distante da abertura também foi restringido em relação ao eixo Z.

Para que a armadura receba os esforços de forma solidária ao concreto, empregou-se a ferramenta *Embedded Region* do software Abaqus para toda a armadura.

Nos pontos de aplicação dos carregamentos, também adotou-se a modelagem por meio de elementos de mola, com o objetivo de simular a flexibilidade do sistema de transferência de carga entre o ponto de aplicação e a força correspondente. Para a representação dos apoios, foi atribuído um coeficiente de rigidez de 50 N/m, igualmente adotado a partir de valor de referência e ajustado numericamente. Em cada ponto de aplicação, impôs-se um deslocamento controlado de 50 mm no sentido negativo do eixo Y, de forma a reproduzir a condição de carregamento estabelecida.

A viga com as condições de contorno pode ser observada na figura 20.

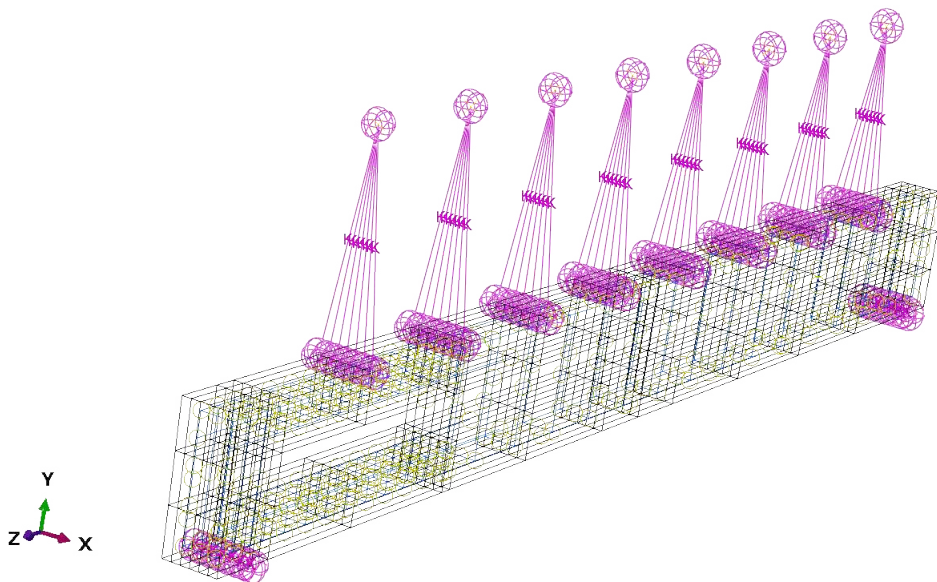


Figura 20: Viga com as condições de contorno aplicadas  
Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.1.5 DEFINIÇÃO DAS MALHAS

A definição da malha envolveu a discretização do modelo tridimensional em elementos finitos. A qualidade e a densidade da malha interferem diretamente na precisão e no custo computacional do modelo.

O concreto foi modelado como elemento sólido tipo C3D8, que são elementos hexaédricos lineares, isoparamétricos, com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, totalizando 24 graus de liberdade por elemento. Esses elementos possuem formulação adequada para análises não lineares em regime de deformações moderadas, sendo compatíveis com o modelo constitutivo CDP implementado no Abaqus. A escolha pelo C3D8 foi baseada em recomendações da literatura (Krahl, Carrazedo e Debs, 2016; Birtel e Mark, 2006; Gidrão et al., 2024; Simulia, 2016).

A etapa de discretização foi avaliada com diferentes tamanhos de elemento. A malha de 10 mm foi interrompida por inviabilidade computacional, com tempo estimado superior a 90 horas por modelo, tornando-se impraticável. As malhas de 25 mm e 50 mm demandaram cerca de 225 e 50 minutos por execução, respectivamente, e apresentaram resultados muito semelhantes em termos de carga máxima e deformações características. Já a malha de 75 mm reduziu o tempo para aproximadamente 50 minutos, mas apresentou perda sensível de precisão. Dessa forma, a malha de 50 mm foi considerada a mais equilibrada, conciliando boa convergência dos resultados e baixo custo computacional, sendo adotada nas simulações subsequentes.

As simulações foram executadas em um notebook equipado com processador *Intel Core i5-8300H* (2,30 GHz), 24 GB de memória *RAM* e *GPU NVIDIA GeForce* (4 GB VRAM).

O modelo possui 1980 elementos do tipo C3D8, representado na figura 21. Após a definição da malha, o tamanho médio dos elementos foi utilizado na etapa de implementação da lei constitutiva de tração, conforme descrito no item 2.4.2.

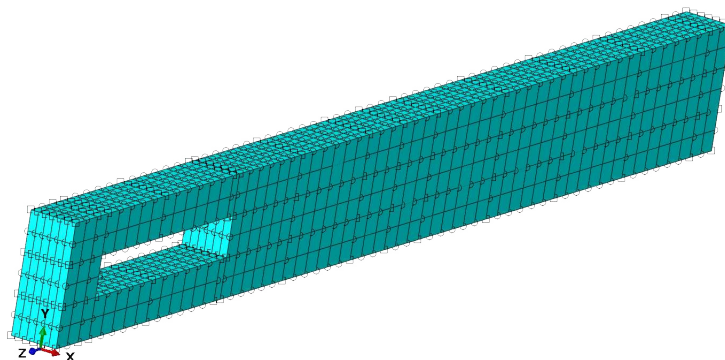


Figura 21: Malha do concreto  
Fonte: Autoria própria (2025).

O aço, tanto da armadura longitudinal quanto dos estribos, foi modelado por meio de elementos de treliça do tipo T3D2, elementos lineares, uniaxiais, com 2 nós e 3 graus de liberdade por nó, totalizando 6 graus de liberdade por elemento. Essa escolha está em conformidade com recomendações do manual do Abaqus (Simulia, 2016) e com aplicações reportadas na bibliografia (Birtel e Mark, 2006; Gidrão et al., 2024).

Adotou-se uma discretização de 50 mm para as armaduras, valor que se mostrou adequado para validar os resultados, conciliando custo computacional reduzido e precisão satisfatória. No total, o modelo apresentou 640 elementos T3D2.

### 3.1.6 CONFIGURAÇÃO DO *STEP*

No Abaqus, um *STEP* (passo) define uma fase de análise específica dentro de um modelo. Neste trabalho, o *STEP* foi configurado como "*Static General*", adequado para simulações estáticas onde os efeitos dinâmicos não são considerados. A opção "*Nlgeom*" foi desativada, indicando que a análise não incorpora efeitos de geometria não linear, o que pode simplificar a solução e reduzir o esforço computacional. O período de tempo foi definido como 1 segundo, e o processo foi configurado para permitir até 100.000 incrementos. Os tamanhos dos incrementos foram ajustados para um valor inicial de  $10^{-7}$ , um mínimo de  $10^{-9}$  e um máximo de 1, permitindo uma adaptação automática durante a análise para capturar as respostas do modelo.

O software utiliza o método de *Newton-Raphson*, uma técnica iterativa para resolver sistemas de equações não lineares, no processo de solução. Esse método ajusta iterativamente as estimativas da solução com base nas forças residuais e na matriz tangente, até que a solução apresente convergência satisfatória em relação ao equilíbrio definido.

## 3.2 RESULTADOS PRELIMINARES

Após a modelagem, os resultados da simulação foram comparados com os dados experimentais de referência de Simão (2014). O principal parâmetro de comparação foi a resposta de força-deflexão no meio do vão. O modelo experimental atingiu a força máxima de 9.250 Kgf ( $\approx 90,7$  kN) e 16,3 mm de deflexão. Já o modelo numérico atingiu 9.299 Kgf ( $\approx 91,2$  kN) e 15,5 mm de deflexão. A diferença percentual é de 0,53% na força máxima e de 4,9% na deflexão, demonstrando uma concordância entre os resultados experimental e numérico. O gráfico comparativo dos modelos é apresentado na figura 22.

Na análise do ponto de transição entre o regime linear e o início da plastificação, o ensaio experimental indicou valores de 1.949 kgf ( $\approx 19,1$  kN) de força e 1,15 mm de deflexão, enquanto o modelo numérico apresentou 1.605 kgf ( $\approx 15,7$  kN) e 0,91 mm, respectivamente. Para fins de caracterização, a deflexão última, no ponto de máximo carregamento, foi denotada por  $\delta u$ , e a deflexão no limite do comportamento elástico por  $\delta y$ .

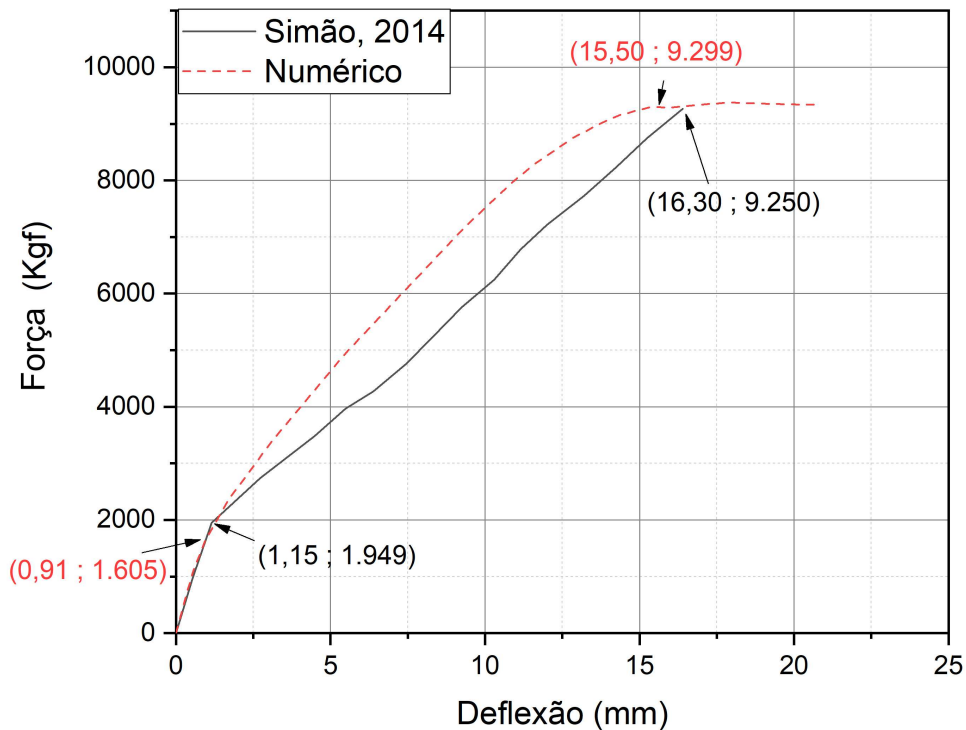


Figura 22: Gráfico comparativo força-deflexão  
Fonte: Autoria própria (2025).

Os dados apresentados no gráfico estão dispostos na Tabela 4.

	REFERÊNCIA	DEFLEXÃO $\delta u$ (mm)	FORÇA MÁXIMA (Kgf)
1	Simão (2014)	16,30	9.250,00
2	Numérico	15,50	9.299,21
	Diferença %	4,91%	0,53%

Tabela 4: Comparativo de dados Experimental x Numérico  
 Fonte: Autoria própria (2025).

A análise da deformação plástica no modelo numérico permitiu identificar a ocorrência de plastificação nas proximidades dos cantos, figura 23, da abertura, em conformidade com as observações experimentais. O acúmulo de deformações plásticas nessas regiões decorre da concentração de tensões de cisalhamento, que promove o aumento significativo das solicitações locais.

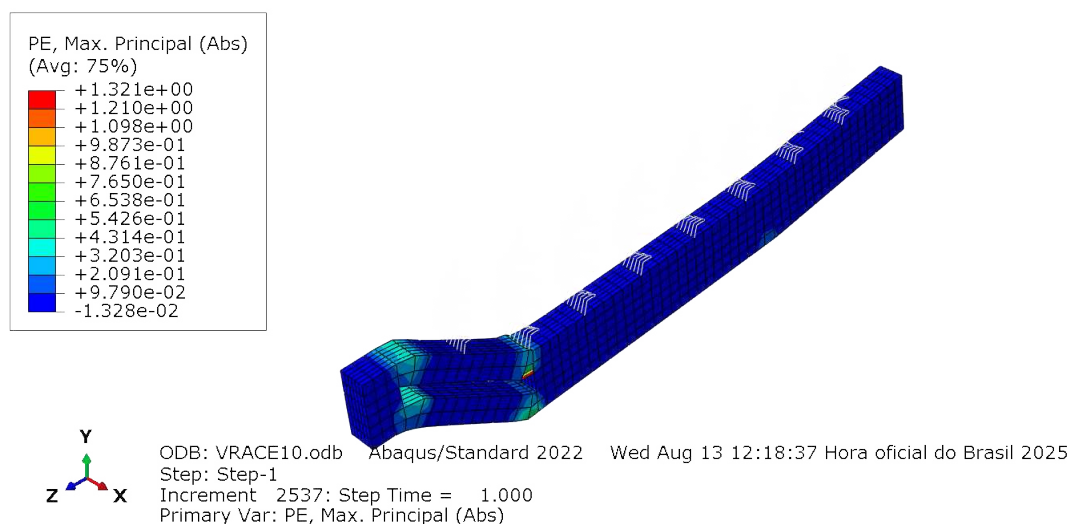


Figura 23: Deformação plástica no concreto  
 Fonte: Autoria própria (2025).

De forma análoga ao concreto, os pontos de plastificação da armadura de aço podem ser observados na Figura 24.

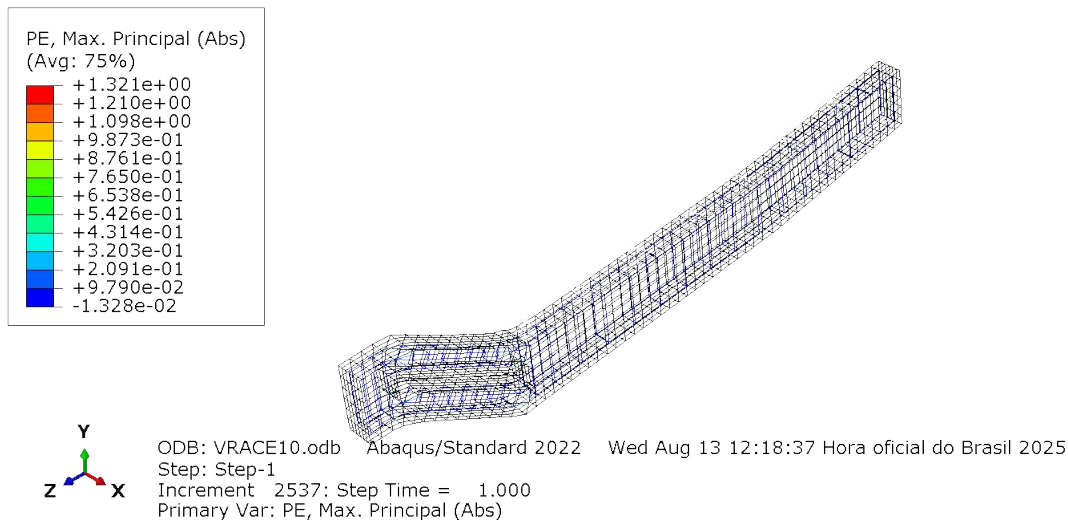


Figura 24: Deformação plástica da armadura  
Fonte: Autoria própria (2025).

Após a validação do modelo de referência, procedeu-se à aplicação do mesmo arranjo numérico em outras geometrias, com o objetivo de avaliar a consistência dos parâmetros calibrados e a capacidade do modelo em reproduzir diferentes configurações estruturais sem ajustes adicionais. Para isso, foram analisadas as vigas VGP e VG1, também descritas por Simão (2014), mantendo-se inalteradas as propriedades de material, o refinamento de malha e as condições de contorno, variando-se apenas as dimensões geométricas.

Os resultados comparativos entre os valores experimentais e numéricos estão apresentados nas Figuras 25 e 26. Observa-se que, para a viga VGP, a diferença entre os resultados foi de 4,7% na força máxima e 12,8% na deflexão última ( $\delta_u$ ), indicando excelente concordância entre os modelos.

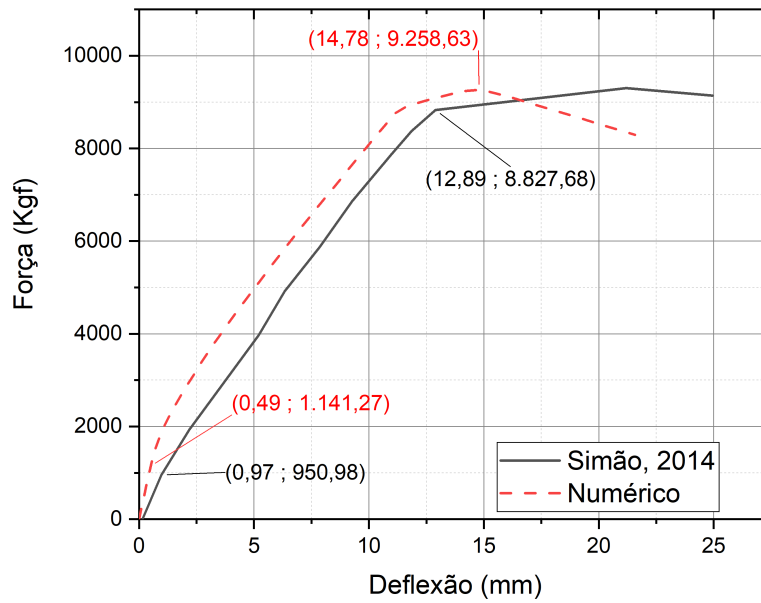


Figura 25: Gráfico força-deflexão para viga VGP

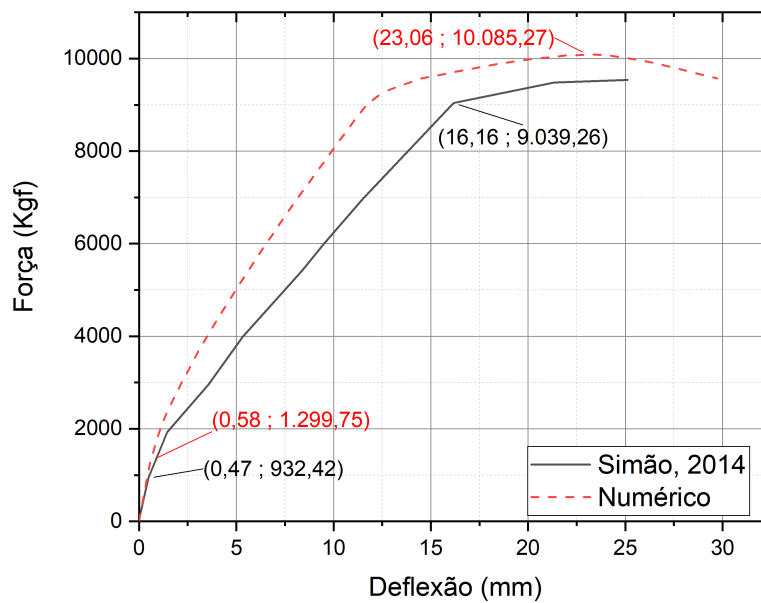


Figura 26: Gráfico força-deflexão para viga VG1

Para a viga VG1, as discrepâncias se mantiveram em níveis igualmente aceitáveis, com diferenças de 10,4% na força máxima e 29,9% na deflexão última. Esses resultados reforçam a boa representatividade do modelo calibrado, sobretudo na previsão da força máxima.

De modo geral, os resultados obtidos evidenciam que o arranjo calibrado apresenta desempenho robusto e capacidade de generalização, reproduzindo de forma coerente o comportamento de diferentes geometrias de viga sem necessidade de novos ajustes paramétricos. Essa consistência confere confiabilidade ao modelo numérico para prosseguir às análises comparativas entre concretos convencionais e de ultra-alto desempenho, apresentadas nos capítulos subsequentes.

### 3.3 EXTRAPOLAÇÃO DO MODELO PARA CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

Após a calibração satisfatória do modelo, as propriedades do concreto foram modificadas para representar o UHPFRC, com base nos dados apresentados por Gidrão et al. (2024). Para as propriedades elásticas do material foram atribuídos como Módulo de Elasticidade  $E_C = 43.000$  MPa e Coeficiente de *Poisson*  $\nu = 0,20$ . Como parâmetros do CDP foram adotados os valores de ângulo de dilatação  $\Psi = 50^\circ$ , excentricidade  $\epsilon = 0,1$ ,  $fb_0/fc_0 = 1,07$ , coeficiente  $K = 0,666$  e viscosidade  $\mu = 0,00005$ . Em relação ao parâmetro de dano, em função da instabilidade numérica observada nos resultados, optou-se por suprimir a consideração do dano no modelo do UHPFRC nesta etapa. Para assegurar a consistência nas comparações, o mesmo procedimento foi aplicado ao concreto convencional (C30). Considerando que se trata de um ensaio monotônico, essa simplificação é metodologicamente aceitável e não compromete a representatividade dos resultados. As propriedades estão resumidas na tabela 5.

Propriedade	Valor
$E_c$ (MPa)	43000
$\nu$	0,20
$\Psi$	50 <sup>o</sup>
$\epsilon$	0,1
fb0/fc0	1,07
k	0,666
$\mu$	0,00005

Tabela 5: Propriedades do Concreto  
Fonte: Adaptado de Gidrão et al. (2024)

As curvas constitutivas para compressão e tração foram inseridas de acordo com os modelos adotados. Para o comportamento à compressão, empregou-se o modelo proposto por Carreira e Chu (1985), enquanto para a tração utilizou-se o modelo de Gidrão et al. (2024). As respectivas leis constitutivas encontram-se representadas nas figuras 27 e 28.

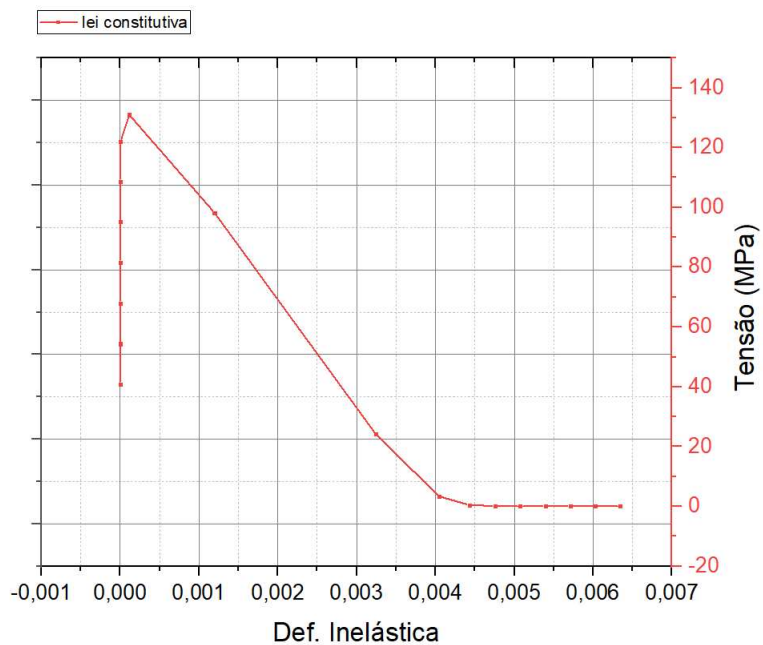


Figura 27: Lei constitutiva para a compressão UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).

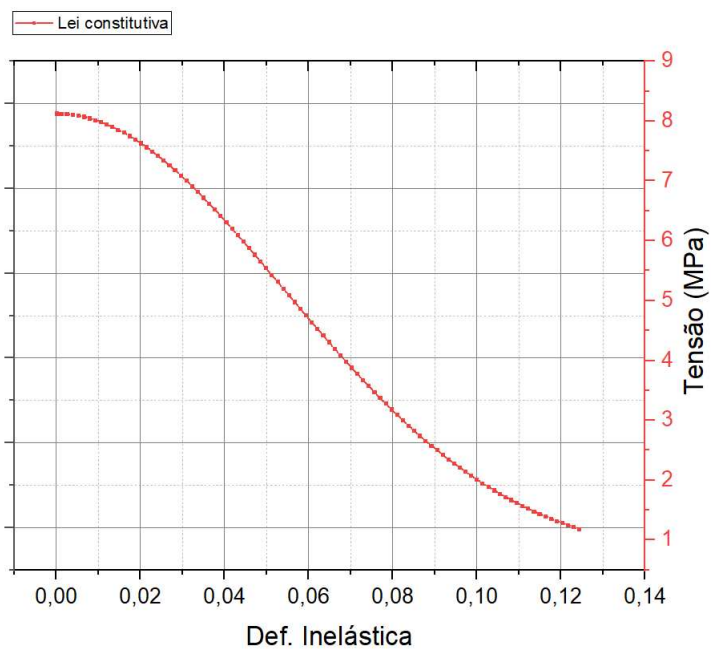


Figura 28: Lei constitutiva para a tração UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).

Com o objetivo de facilitar a análise comparativa, apresentam-se nas Figuras 29 e 30 os resultados do concreto C30 e do UHPFRC, respectivamente para compressão e tração.

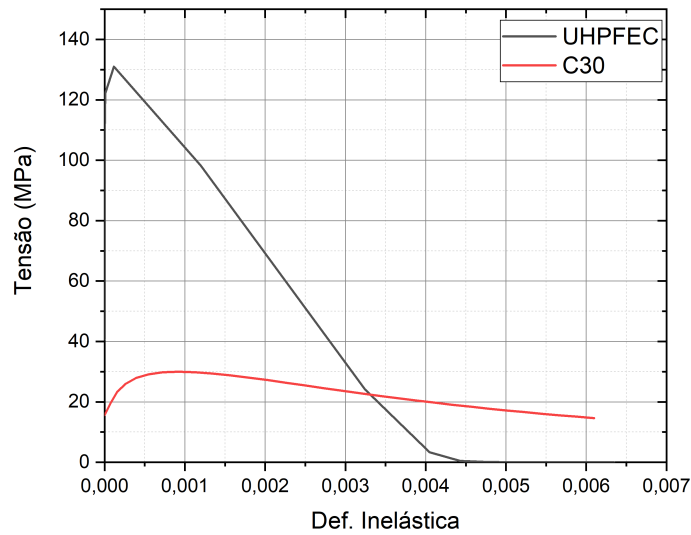


Figura 29: Comparativo lei constitutiva de compressão  
Fonte: Autoria própria (2025).

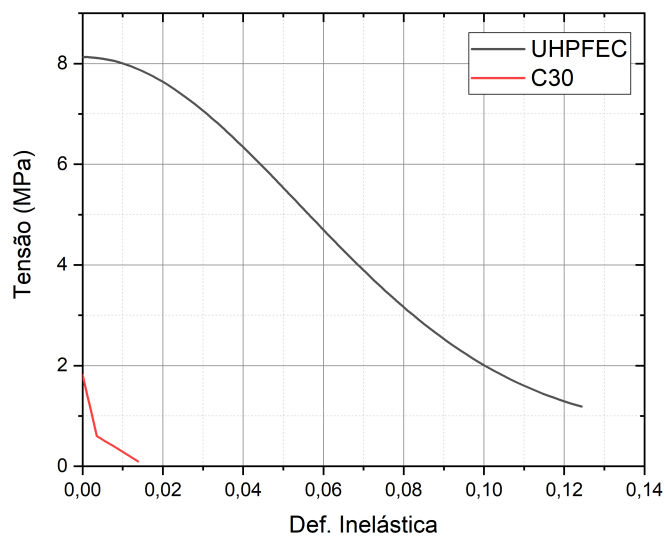


Figura 30: Comparativo lei constitutiva de tração  
Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados obtidos para os gráficos de força-deflexão estão demonstrados na figura 31. Os modelos numéricos foram definidos como C30 e UHPFRC.

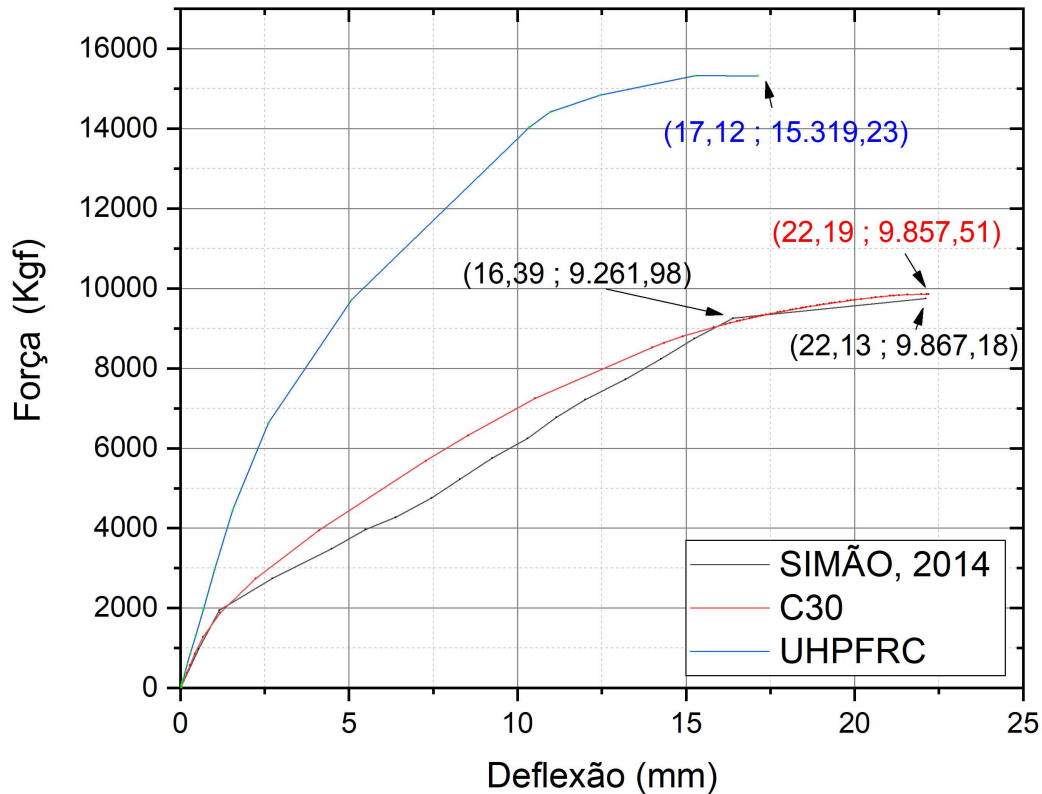


Figura 31: Comparativo força-deflexão C30 e UHPFRC

Fonte: Autoria própria (2025).

Para o modelo em UHPFRC, a análise numérica resultou em força máxima de 15.106,50 kgf ( $\approx 148,2$  kN) e deflexão de 15,23 mm, evidenciando um desempenho significativamente superior em termos de resistência última, ainda que associado a menor deformabilidade.

A Figura 32 apresenta informações adicionais relevantes para a comparação entre os modelos. No ponto de transição do regime elástico para o comportamento não linear, o modelo em C30 registrou força de 1.279 kgf ( $\approx 12,5$  kN) e deflexão de 0,67 mm, enquanto o UHPFRC apresentou 5.015 kgf ( $\approx 49,2$  kN) e 1,77 mm, revelando uma capacidade inicial de absorção de esforços consideravelmente maior para o concreto de Ultra-Alto Desempenho.

Em termos de tenacidade, os valores calculados foram de 1.476 J para o modelo em C30 e 1.899 J para o UHPFRC, representando um incremento aproximado de 28% na energia absorvida. A tenacidade ( $U_T$ ) foi determinada pela integração da curva força-deflexão desde o início do carregamento até o ponto de ruptura, correspondendo ao trabalho total realizado sobre o elemento estrutural. Esse parâmetro é amplamente reconhecido como um indicador da capacidade do sistema em absorver e dissipar energia mecânica até a falha, refletindo diretamente na segurança e na resiliência da estrutura frente a carregamentos repetidos, impactos ou variações súbitas de solicitação.

Além disso, foram determinadas as deflexões características: a deflexão no limite do comportamento elástico ( $\delta y$ ), e a deflexão última ( $\delta u$ ), correspondente ao deslocamento registrado no ponto de máximo carregamento.

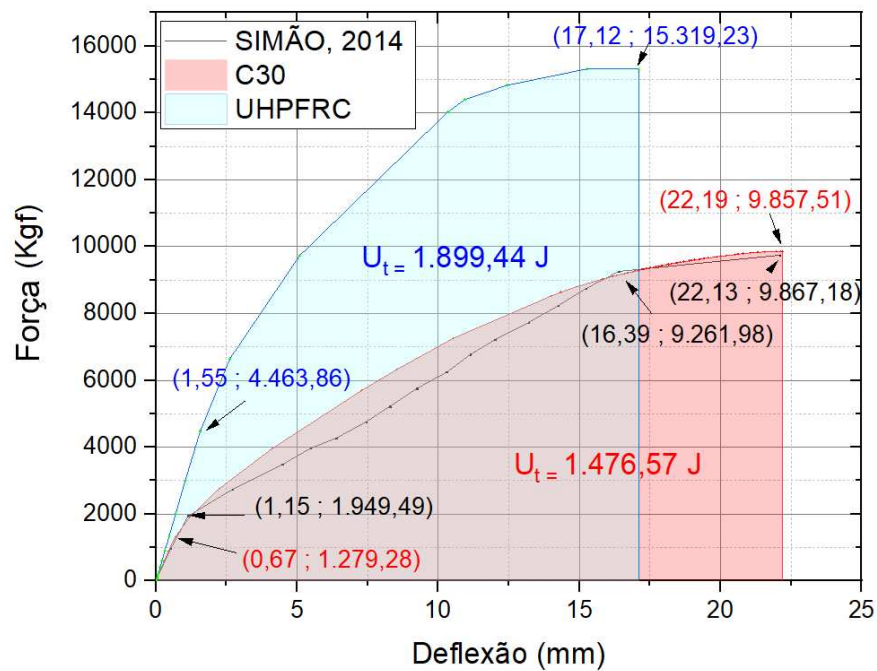


Figura 32: Comparativo de dados C30-UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).

Os valores comparativos estão organizados na Tabela 6.

	REFERÊNCIA	$\delta u$ (mm)	$\delta y$ (mm)	Fmáx (Kgf)	$U_T$ (J)
1	C30	22,19	0,67	9.857,51	1.476,57
2	UHPFRC	17,12	1,55	15.319,24	1.899,44

Tabela 6: Comparativo de dados C30-UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).

Quanto ao tipo de ruptura, observou-se comportamento bastante semelhante em ambos os casos. Houve concentração de plastificação próxima aos cantos da abertura, tanto no concreto, figura 33, quanto nas armaduras, figura 34, caracterizando regiões de elevada deformação. No concreto, essa concentração de tensões nos cantos da abertura resultou em fissuração localizada, enquanto nas armaduras adjacentes ocorreu escoamento plástico. A distribuição das deformações indica que a ruptura se desenvolveu de forma progressiva, combinando a fissuração do concreto com o escoamento localizado do aço, sem ocorrência de deformação generalizada ao longo da seção.

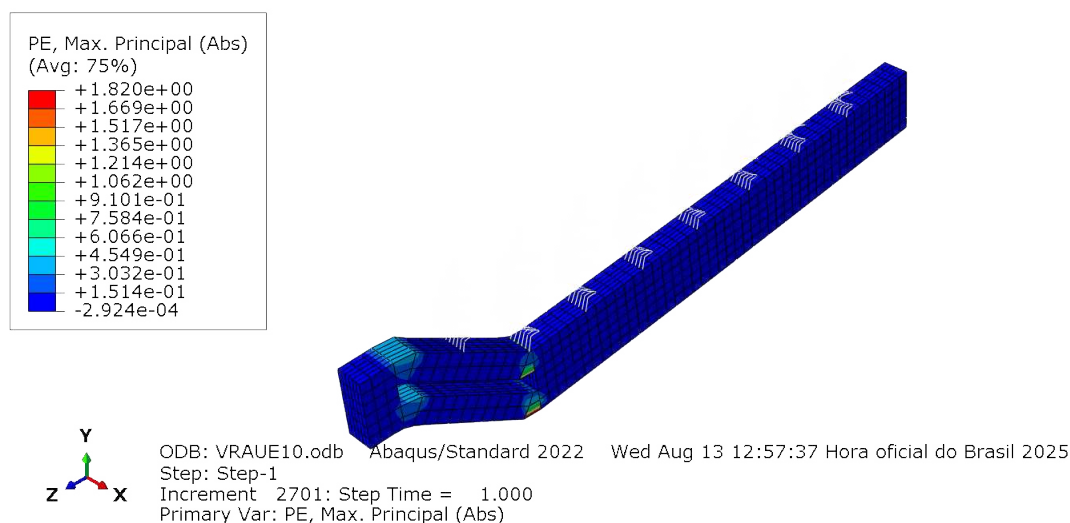
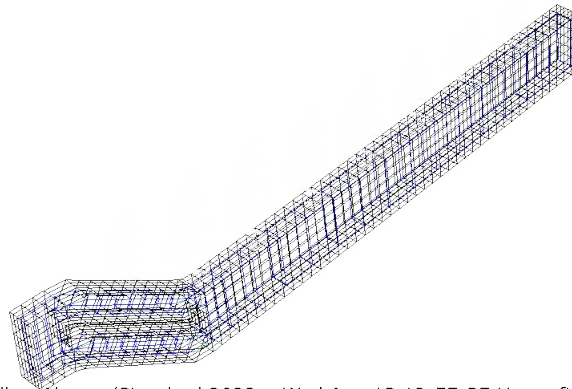
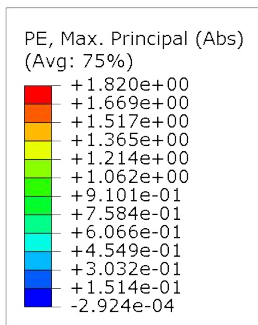


Figura 33: Deformação plástica no UHPFRC  
 Fonte: Autoria própria (2025).



ODB: VRAUE10.odb    Abaqus/Standard 2022    Wed Aug 13 12:57:37 Hora oficial do Brasil 2025  
 Step: Step-1  
 Increment 2701: Step Time = 1.000  
 Primary Var: PE, Max. Principal (Abs)

Figura 34: Deformação plástica na armadura (UHPFRC)  
 Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Para investigar de forma sistemática a influência das aberturas e de outros parâmetros no comportamento estrutural das vigas, elaborou-se um estudo paramétrico. Nesse estudo, foram analisadas diferentes variações, contemplando:

1. Localização da abertura: posicionada no meio do vão (centralizada) ou próxima ao apoio, conforme referência no modelo de Simão (2014), além da configuração sem abertura.
2. Presença de estribos: modelos com estribos e modelos sem estribos, mantendo apenas as armaduras longitudinais.

O tamanho da abertura foi mantido constante em relação ao modelo original, de modo a isolar o efeito da sua posição e da presença de estribos. As Figuras 35, 36, 37, 38 e 39 apresentam as variações dos modelos.

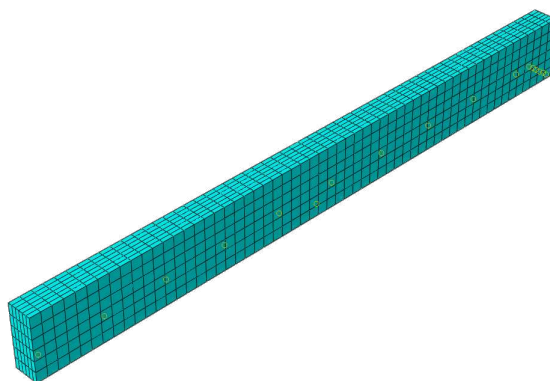


Figura 35: Sem abertura  
Fonte: Autoria própria (2025).

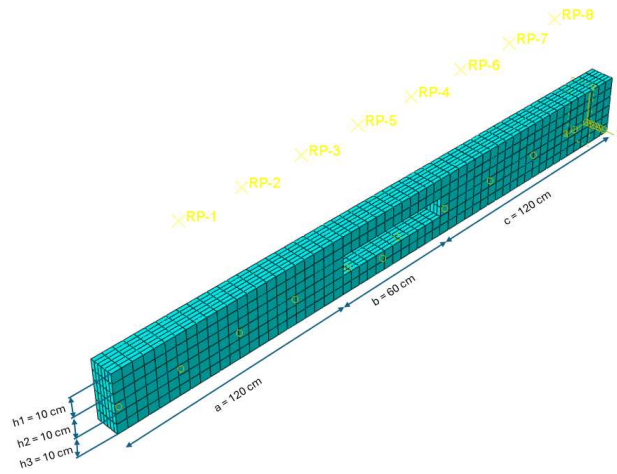


Figura 36: Abertura no centro do vão  
 Fonte: Autoria própria (2025).

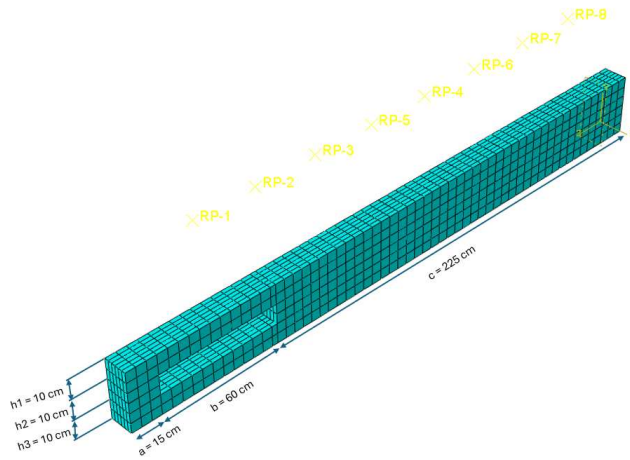


Figura 37: Abertura próxima ao apoio  
 Fonte: Autoria própria (2025).

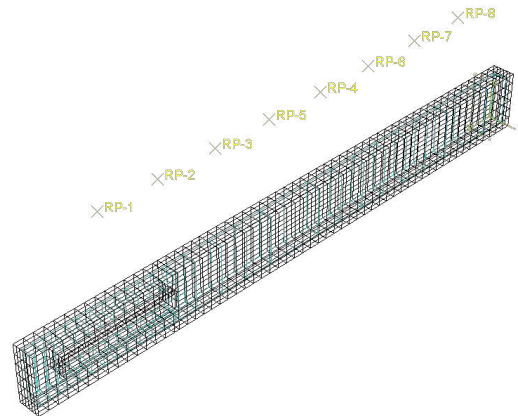


Figura 38: Com estribo  
Fonte: Autoria própria (2025).

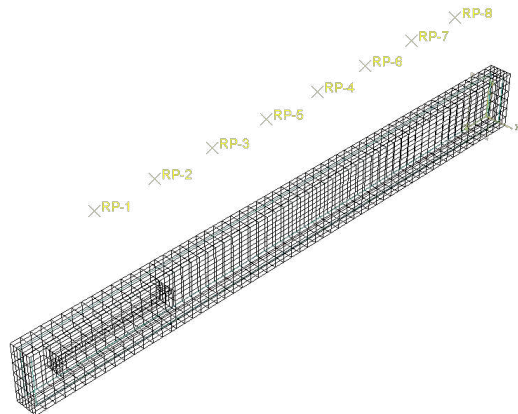


Figura 39: Sem estribo  
Fonte: Autoria própria (2025).

Combinando-se as diferentes condições, foram obtidos 12 modelos distintos, abrangendo todas as variações para os concretos UHPFRC e C30, conforme descrito na Tabela 7.

	REFERÊNCIA	CONCRETO	ABERTURA	ESTRIBO
1	C30-S/AB-C/EST	C30	SEM	COM
2	UHPFRC-S/AB-C/EST	UHPFRC	SEM	COM
3	C30-APOIO-C/EST	C30	PRÓXIMO AO APOIO	COM
4	UHPFRC-APOIO-C/EST	UHPFRC	PRÓXIMO AO APOIO	COM
5	C30-MEIO-C/EST	C30	NO MEIO DO VÃO	COM
6	UHPFRC-MEIO-C/EST	UHPFRC	NO MEIO DO VÃO	COM
7	C30-S/AB-S/EST	C30	SEM	SEM
8	UHPFRC-S/AB-S/EST	UHPFRC	SEM	SEM
9	C30-APOIO-S/EST	C30	PRÓXIMO AO APOIO	SEM
10	UHPFRC-APOIO-S/EST	UHPFRC	PRÓXIMO AO APOIO	SEM
11	C30-MEIO-S/EST	C30	NO MEIO DO VÃO	SEM
12	UHPFRC-MEIO-S/EST	UHPFRC	NO MEIO DO VÃO	SEM

Tabela 7: Variações de modelos estudados  
Fonte: Autoria própria (2025).

Os 12 modelos numéricos apresentados foram avaliados por meio da análise das curvas de força-deflexão no meio do vão, representadas na Figura 40. Essas curvas evidenciam a evolução do comportamento das vigas ao longo do carregamento, permitindo identificar a rigidez inicial e as fases de plastificação. Ressalta-se, contudo, que os ensaios foram interrompidos no ponto de força máxima, de modo que não foi considerada a resposta pós-pico do material. Assim, a análise desenvolvida limita-se à caracterização da capacidade resistente e da deformabilidade até a força última, sem avançar para a investigação do comportamento pós-pico, marcado pela redução de rigidez e redistribuição de esforços que poderiam ocorrer após a solicitação máxima.

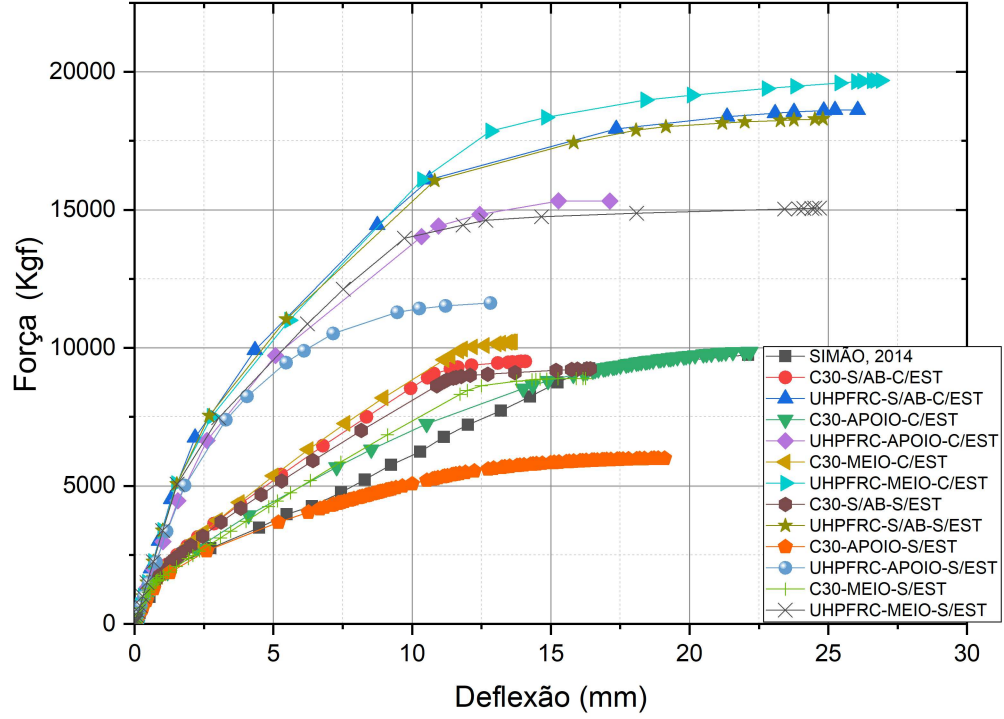


Figura 40: Resultados em formato gráfico  
 Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados sistematizados na Tabela 8 apresentam os valores de força máxima e deflexão máxima para cada configuração de viga, possibilitando a comparação do desempenho estrutural entre os modelos. A partir das curvas força-deflexão, foram obtidos os valores de tenacidade, da deflexão no início do escoamento ( $\delta_y$ ) e da deflexão última ( $\delta_u$ ), que permitem a caracterização do comportamento global dos elementos até a força máxima.

	REFERÊNCIA	$\delta u$ (mm)	$\delta y$ (mm)	$U_T$ (J)	Fmáx (Kgf)	Fmáx* %
1	C30-S/AB-C/EST	14,09	0,64	865,64	9.506,64	51,97%
2	UHPFRC-S/AB-C/EST	26,06	2,17	3.751,56	18.620,92	101,79%
3	C30-APOIO-C/EST	22,20	0,67	1.476,57	9.857,51	53,88%
4	UHPFRC-APOIO-C/EST	17,12	1,55	1.899,44	15.319,23	83,74%
5	C30-MEIO-C/EST	13,63	0,70	854,81	10.222,24	55,88%
6	UHPFRC-MEIO-C/EST	26,90	1,49	4.039,68	19.686,75	107,61%
7	C30-S/AB-S/EST	16,42	0,70	1.037,39	9.243,77	50,53%
8	UHPFRC-S/AB-S/EST	24,81	1,52	3.483,55	18.293,83	100%
9	C30-APOIO-S/EST	19,09	0,68	842,05	5.999,69	32,80%
10	UHPFRC-APOIO-S/EST	12,82	1,80	1.108,27	11.625,59	63,55%
11	C30-MEIO-S/EST	16,25	0,68	940,07	8.889,57	48,59%
12	UHPFRC-MEIO-S/EST	24,69	1,53	3.013,29	15.061,72	82,33%

Tabela 8: Resultados tabelados

Fonte: Autoria própria (2025).

\* Comparativo de Força Máxima dos modelos em relação ao modelo 8 UHPFRC-S/AB-S/EST.

Por fim, no gráfico de barras da Figura 41 são apresentados, de forma comparativa, todos os resultados obtidos, facilitando a visualização das diferenças de desempenho entre as configurações analisadas.

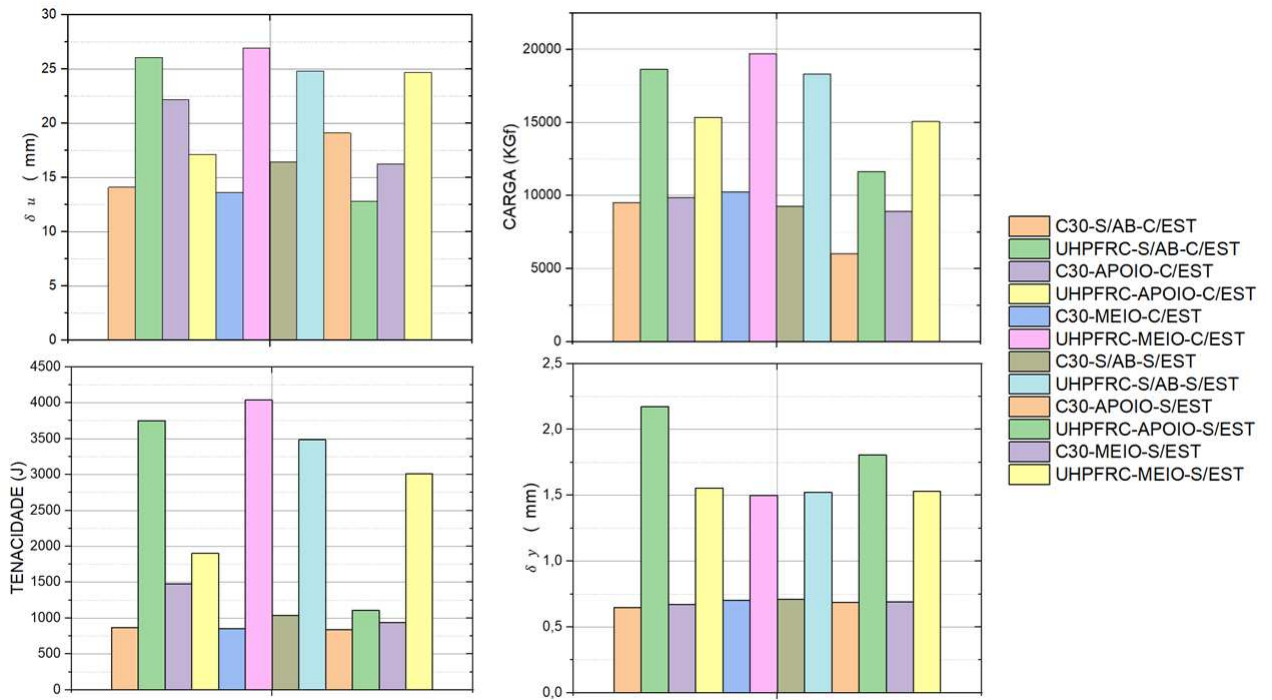


Figura 41: Resultados em gráficos de barra  
 Fonte: Autoria própria (2025).

## **4 DISCUSSÕES**

### **4.1 ANÁLISE DOS MODELOS**

#### **4.1.1 MODELO 1 (C30-SEM ABERTURA-COM ESTRIBOS)**

O modelo em concreto convencional sem abertura e com estribos atingiu carga máxima de 9.506,64 kgf, com deflexão última de 14,09 mm, tenacidade de 865,64 J e a deflexão no início do escoamento foi de 0,64 mm. O modo de ruptura ocorreu por flexão, figuras 42 e 43, coerente com a configuração do elemento estrutural, em que a ausência de aberturas e a presença de estribos garantiram resistência adequada ao cisalhamento.

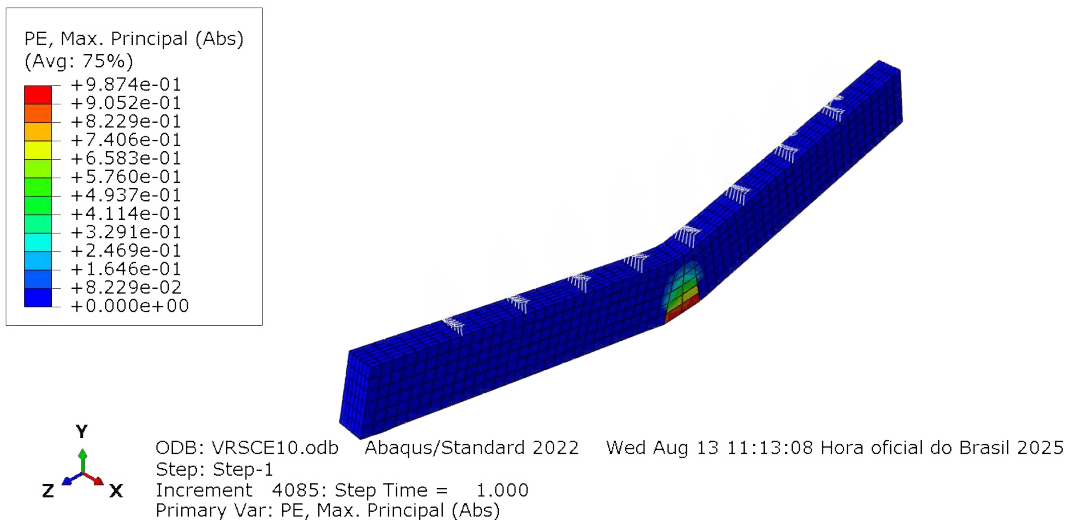


Figura 42: C30-S/AB-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

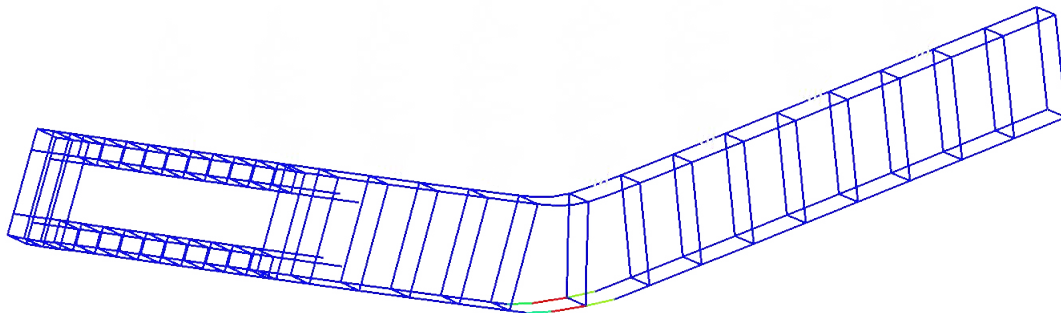


Figura 43: C30-S/AB-C/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### **4.1.2 MODELO 2 (UHPFRC-SEM ABERTURA-COM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC, sem abertura e com estribos, apresentou carga máxima de 18.620,92 kgf, correspondendo a um aumento de 95,8% em relação ao modelo em C30 equivalente. A tenacidade atingiu 3.751,56 J, incremento de 333% em comparação ao concreto convencional. A deflexão última foi de 26,06 mm e a deflexão no início do escoamento de 2,17 mm, valores que representam aumentos de 85% e 239%, respectivamente. O modo de ruptura ocorreu por flexão, sem indícios de falha por cisalhamento, figuras 44 e 45.

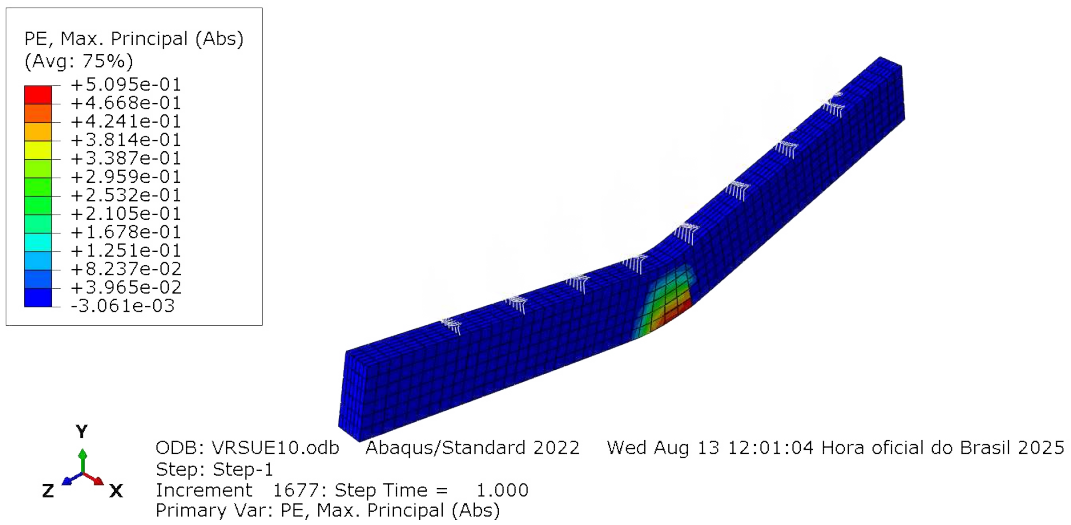


Figura 44: UHPFRC-S/AB-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Autoria própria (2025).

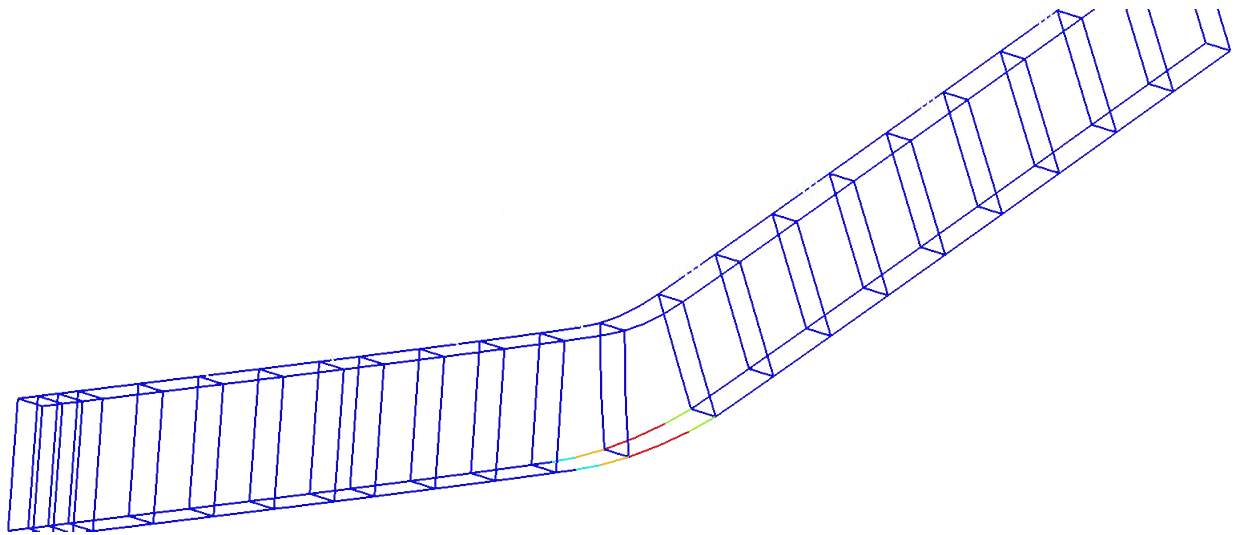


Figura 45: UHPFRC-S/AB-C/EST - AÇO  
Fonte: Autoria própria (2025).

### 4.1.3 MODELO 3 (C30-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-COM ESTRIBOS)

O modelo em concreto convencional com abertura próxima ao apoio e presença de estribos apresentou carga máxima de 9.857,51 kgf, valor próximo ao obtido no modelo sem abertura. A deflexão última foi de 22,20 mm, representando incremento de 58% em relação ao modelo de referência, enquanto a deflexão no início do escoamento manteve-se praticamente constante em 0,67 mm. A tenacidade atingiu 1.476,57 J, cerca de 70% superior a do modelo sem abertura, resultado explicado pela maior deformabilidade global registrada.

A presença combinada dos estribos transversais e das barras de reforço ao redor da abertura mostrou-se fundamental para redistribuir as tensões de cisalhamento e tração na região descontinuada, aumentando o confinamento do concreto e proporcionando maior capacidade de deformação global. Essa configuração resultou em incremento na energia dissipada durante o carregamento.

O modo de ruptura foi de cisalhamento localizado na região da abertura junto ao apoio, sendo que a presença dos estribos contribuiu para conter o desenvolvimento do mecanismo de cisalhamento, mas não eliminou a influência negativa da descontinuidade, figuras 46 e 47.

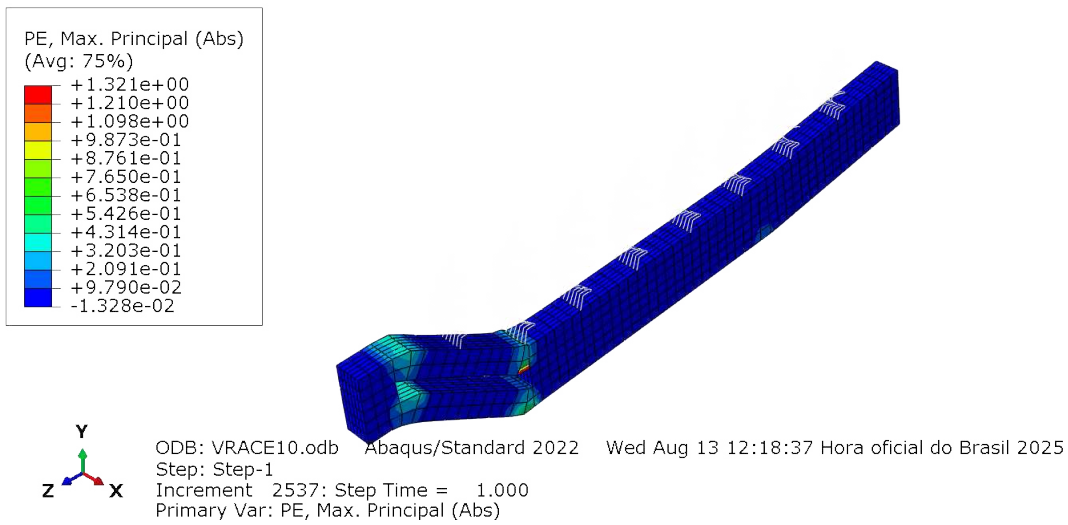


Figura 46: C30-APOIO-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

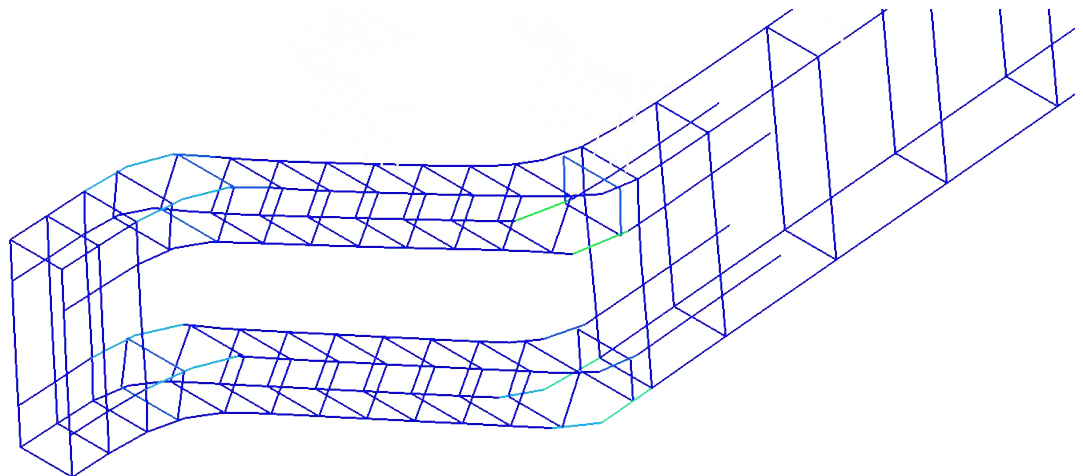


Figura 47: C30-APOIO-C/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### **4.1.4 MODELO 4 (UHPFRC-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-COM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC com abertura próxima ao apoio e presença de estribos apresentou carga máxima de 15.319,23 kgf, 55% superior ao modelo em C30 equivalente. A deflexão última foi de 17,12 mm, redução de 23% em relação ao concreto convencional, enquanto a deflexão no início do escoamento atingiu 1,55 mm, aumento de 131%. A tenacidade foi de 1.899,44 J, cerca de 28% maior que no C30. O modo de ruptura ocorreu por cisalhamento na região da abertura junto ao apoio, confirmando a descontinuidade como ponto crítico do elemento, figuras 48 e 49. Assim, embora tenha havido ganho expressivo de carga máxima, a presença da abertura nessa posição reduziu a deformação registrada até a ruptura, tanto quando comparado ao modelo em C30 equivalente quanto em relação ao modelo em UHPFRC sem abertura.

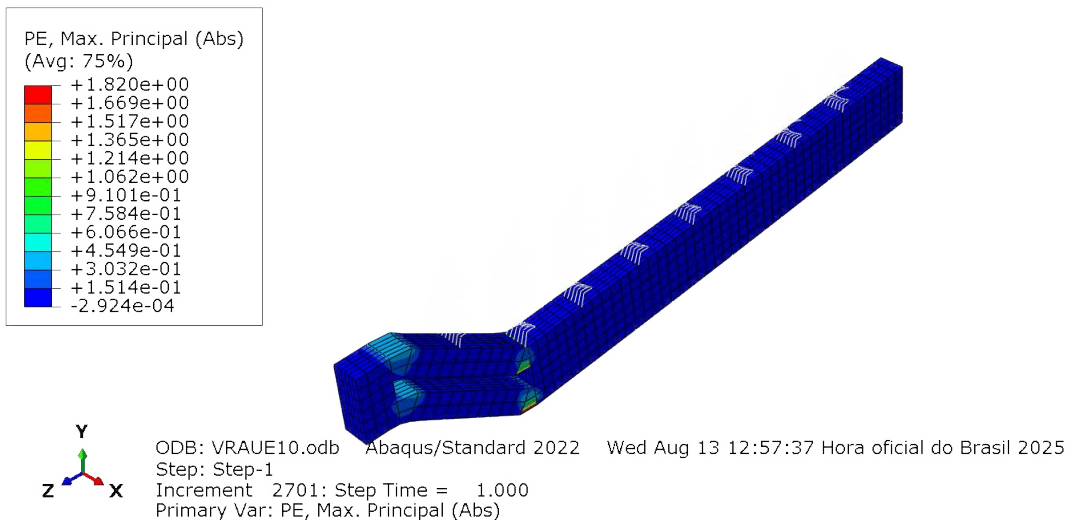


Figura 48: UHPFRC-APOIO-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

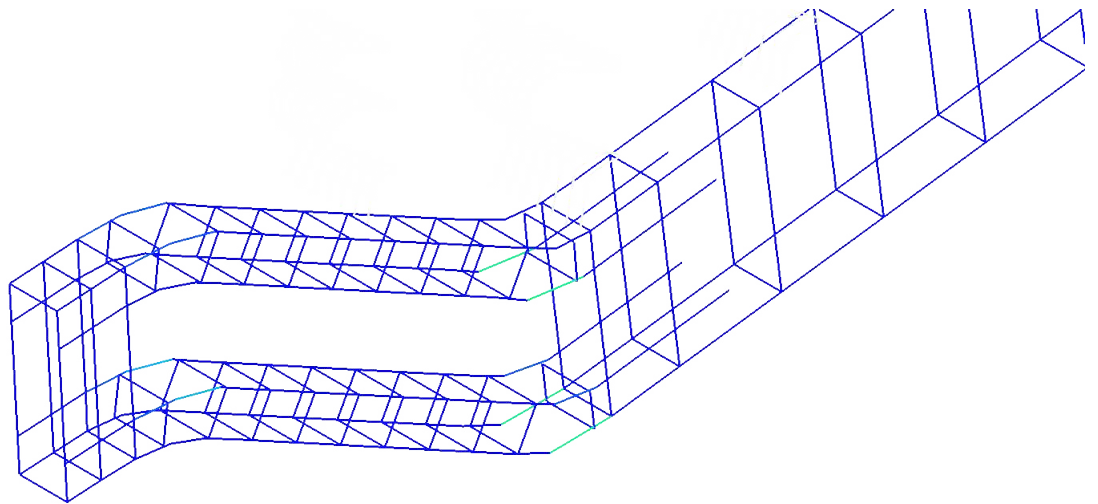


Figura 49: UHPFRC-APOIO-C/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### 4.1.5 MODELO 5 (C30-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-COM ESTRIBOS)

O modelo em concreto convencional com abertura no meio do vão e estribos apresentou carga máxima de 10.222,24 kgf, valor próximo ao obtido no modelo sem abertura (+7,5%). A deflexão última foi de 13,63 mm, representando redução de 3% em relação ao modelo de referência, enquanto a deflexão no início do escoamento manteve-se em 0,70 mm, sem alteração significativa. A tenacidade foi de 854,81 J, valor equivalente ao caso sem abertura, indicando que o desempenho global da viga foi preservado.

A presença combinada dos estribos transversais e das barras de reforço perimetral à abertura mostrou-se essencial para redistribuir as tensões de cisalhamento e tração na região descontinuada, confinando o concreto adjacente e mantendo a continuidade da transferência de esforços entre os banzos. Essa configuração contribuiu para preservar a rigidez global e evitar reduções significativas na capacidade resistente, mesmo com a introdução da abertura.

O modo de ruptura foi caracterizado por cisalhamento localizado no entorno da abertura, com concentração de deformações nos cantos da descontinuidade, figuras 50 e 51.

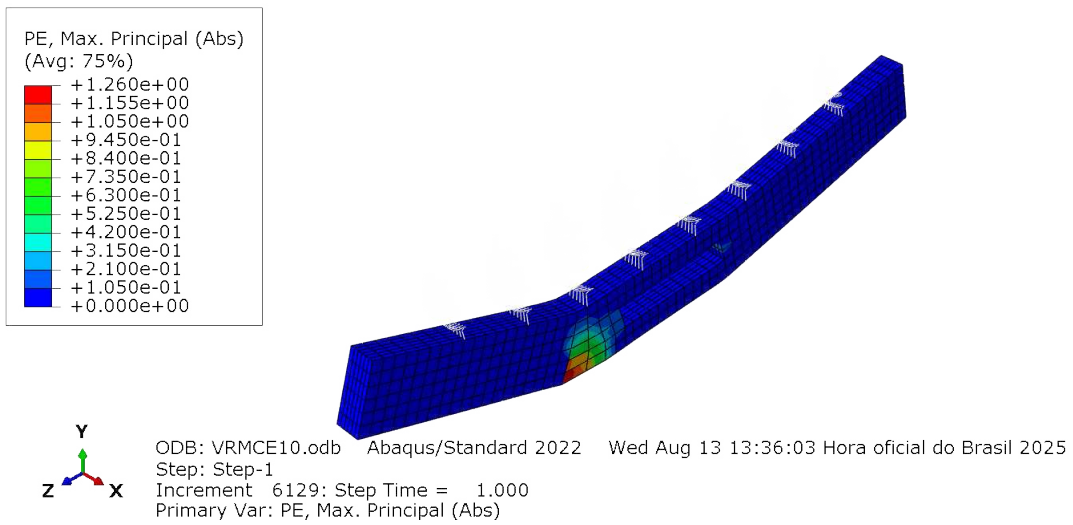


Figura 50: C30-MEIO-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Autoria própria (2025).

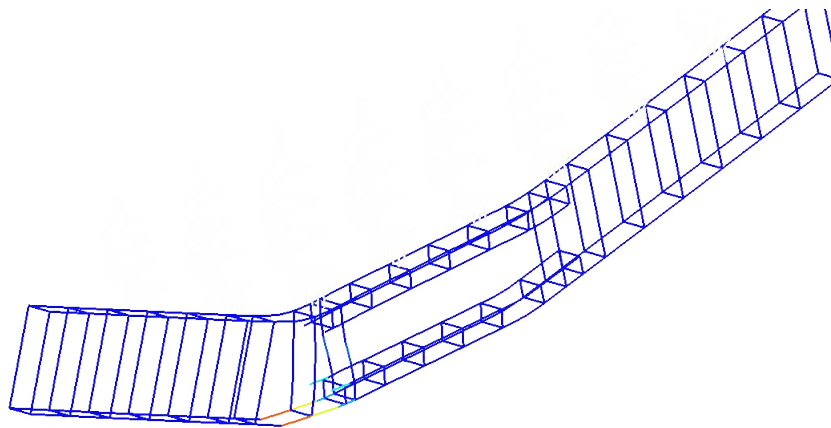


Figura 51: C30-MEIO-C/EST - AÇO  
Fonte: Autoria própria (2025).

#### **4.1.6 MODELO 6 (UHPFRC-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-COM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC com abertura no meio do vão e presença de estribos apresentou carga máxima de 19.686,75 kgf, representando incremento de 92% em relação ao modelo em C30 equivalente. A deflexão última foi de 26,90 mm, aumento de 57% em relação ao concreto convencional, enquanto a deflexão no início do escoamento foi de 1,49 mm, incremento de 113% em relação ao C30. A tenacidade atingiu 4.039,68 J, valor 372% superior ao concreto convencional. O modo de ruptura foi governado pelo cisalhamento na região da abertura, figuras 52 e 53. Em comparação com o modelo em UHPFRC com abertura junto ao apoio, o posicionamento no meio do vão resultou em incremento de 28% na carga máxima, 57% na deformação última e 113% na tenacidade, evidenciando que a localização da abertura influenciou de forma significativa o desempenho estrutural.

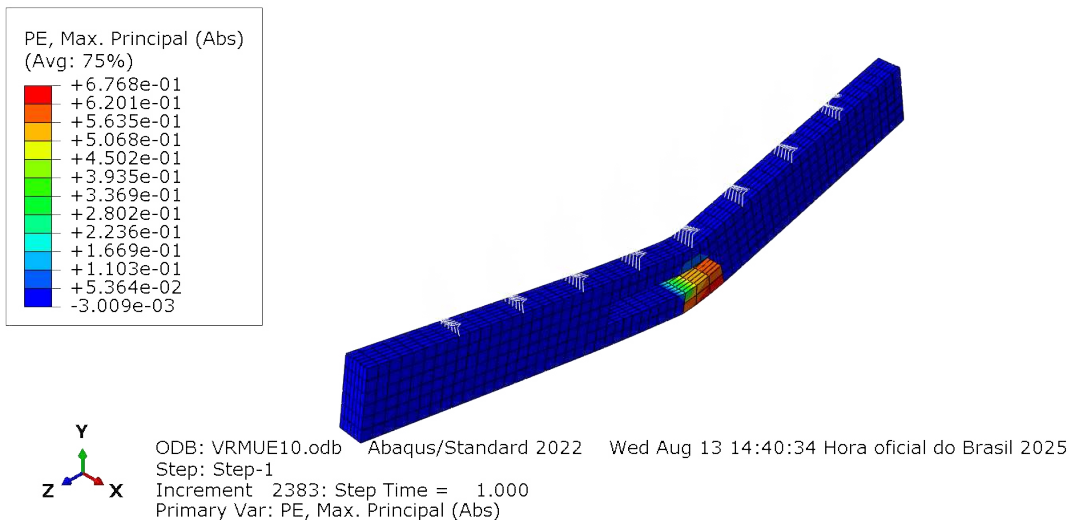


Figura 52: UHPFRC-MEIO-C/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

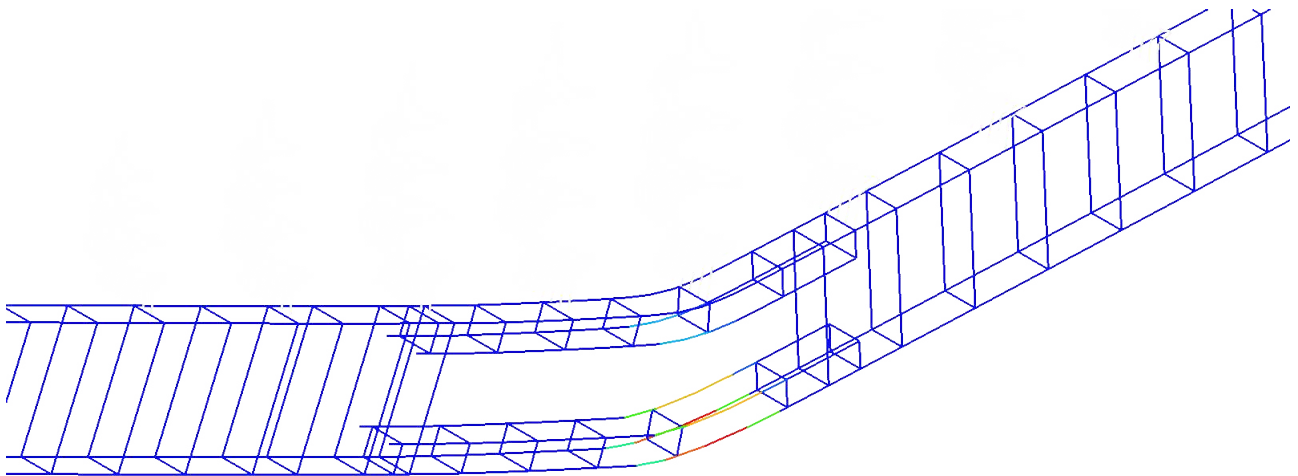


Figura 53: UHPFRC-MEIO-C/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### **4.1.7 MODELO 7 (C30-SEM ABERTURA-SEM ESTRIBOS)**

O modelo em concreto convencional, sem abertura e sem estribos, apresentou carga máxima de 9.243,77 kgf, valor 3% inferior ao modelo equivalente com estribos. A deflexão última foi de 16,42 mm, aumento de 17% em relação ao modelo com estribos, enquanto a deflexão no início do escoamento foi de 0,70 mm, valor semelhante ao de referência. A tenacidade atingiu 1.037,39 J, correspondendo a um incremento de 20% em relação ao modelo com estribos. O modo de ruptura foi caracterizado pela atuação da flexão, figuras 54 e 55, sem a restrição transversal proporcionada por estribos, o que resultou em maior deformabilidade, mas em menor capacidade resistente global.

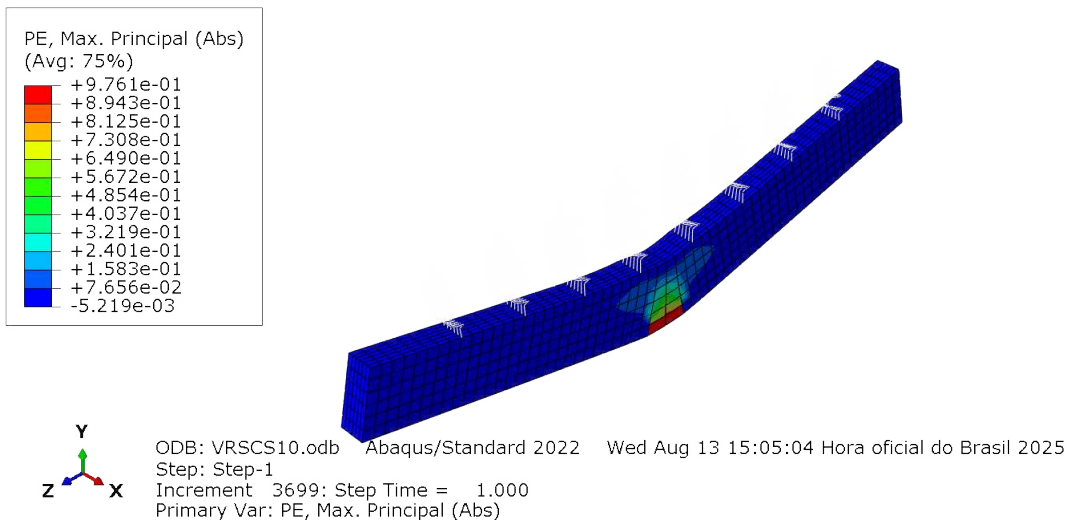


Figura 54: C30-S/AB-S/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

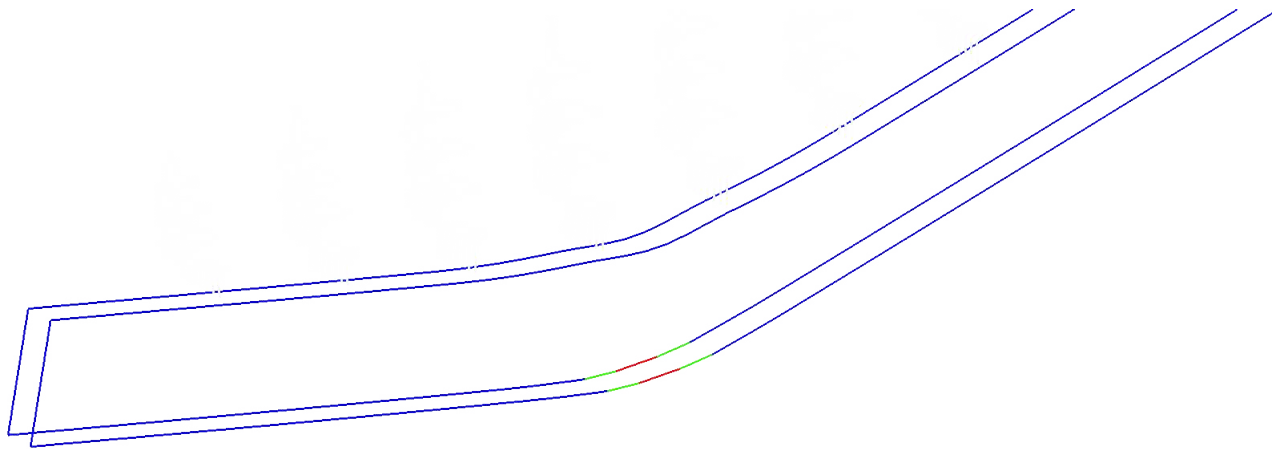


Figura 55: C30-S/AB-S/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### **4.1.8 MODELO 8 (UHPFRC-SEM ABERTURA-SEM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC, sem abertura e sem estribos, apresentou carga máxima de 18.293,83 kgf, aproximadamente 98% superior ao modelo em C30 equivalente. A deflexão última foi de 24,81 mm, incremento de 51% em relação ao C30, enquanto a deflexão no início do escoamento foi de 1,52 mm, aumento de 117%. A tenacidade foi de 3.483,55 J, cerca de 236% maior que a do concreto convencional. O modo de ruptura ocorreu por flexão, figuras 56 e 57, destacando que, mesmo sem a presença de estribos, o UHPFRC apresentou elevada resistência e capacidade de dissipação de energia.

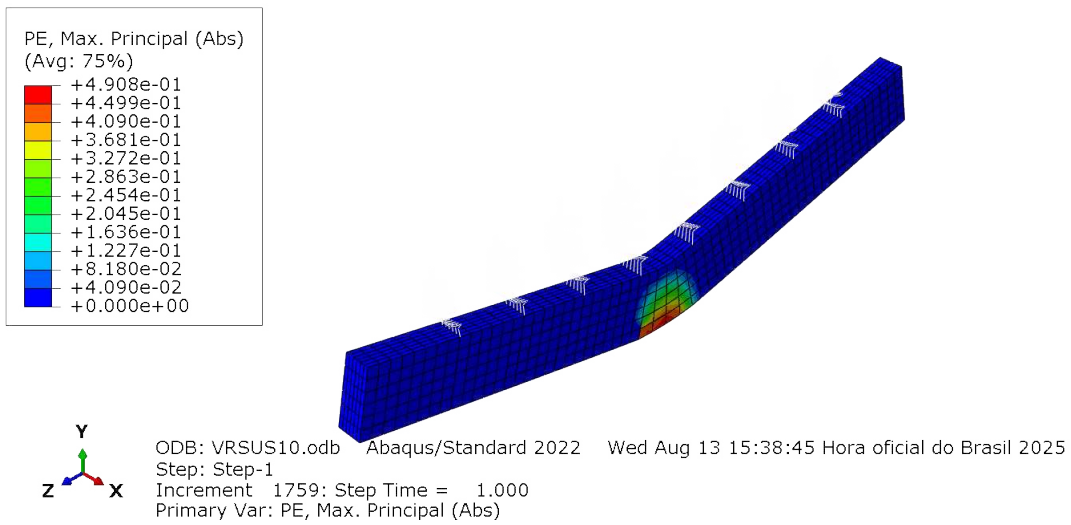


Figura 56: UHPFRC-S/AB-S/EST - CONCRETO  
 Fonte: Autoria própria (2025).

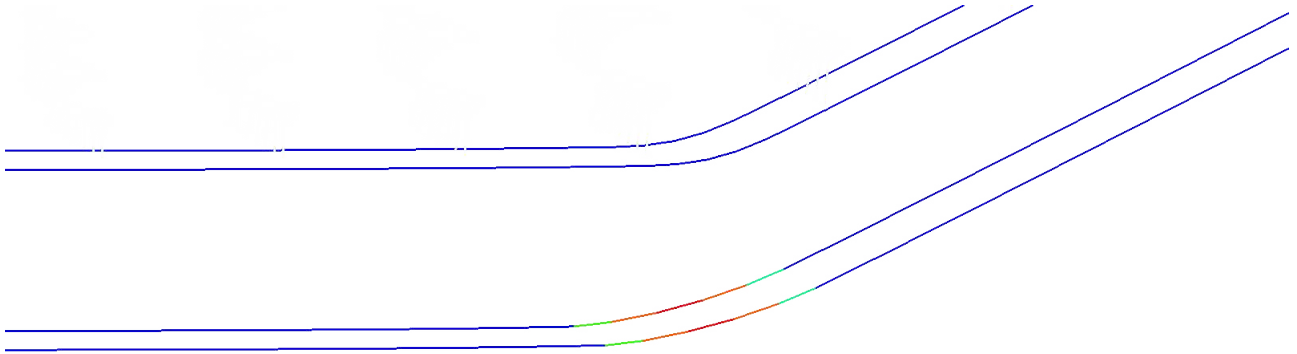


Figura 57: UHPFRC-S/AB-S/EST - AÇO  
 Fonte: Autoria própria (2025).

#### **4.1.9 MODELO 9 (C30-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-SEM ESTRIBOS)**

O modelo em concreto convencional com abertura próxima ao apoio e sem estribos apresentou carga máxima de 5.999,69 kgf, redução de 35% em relação ao modelo de referência sem abertura e de 39% em relação ao modelo equivalente com estribos. A deflexão última foi de 19,09 mm, superior em 16% à do modelo com estribos e em 16% à do modelo sem abertura, enquanto a deflexão no início do escoamento manteve-se em 0,68 mm, sem variação relevante. A tenacidade foi de 842,05 J, representando redução de 19% em relação ao modelo sem abertura e de 43% em relação ao modelo com estribos. O modo de ruptura foi governado pelo cisalhamento na região da abertura junto ao apoio, figuras 58 e 59, acompanhado de esmagamento do concreto no contorno comprimido da descontinuidade, como indicado pelos campos de deformação. A ausência de estribos comprometeu o confinamento e agravou o efeito da abertura, resultando em queda significativa de resistência e de energia dissipada em comparação às vigas íntegras.

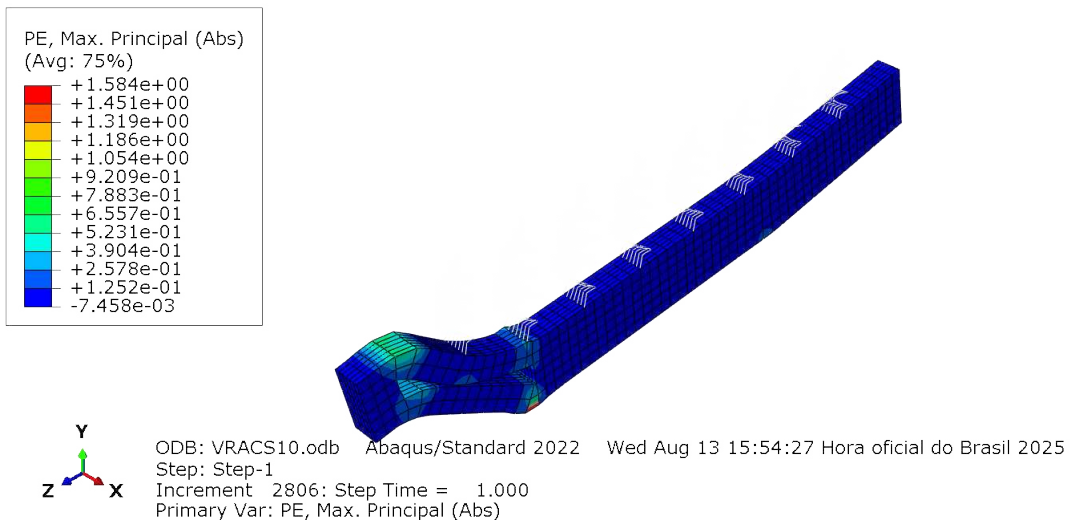


Figura 58: C30-APOIO-S/EST - CONCRETO  
Fonte: Autoria própria (2025).

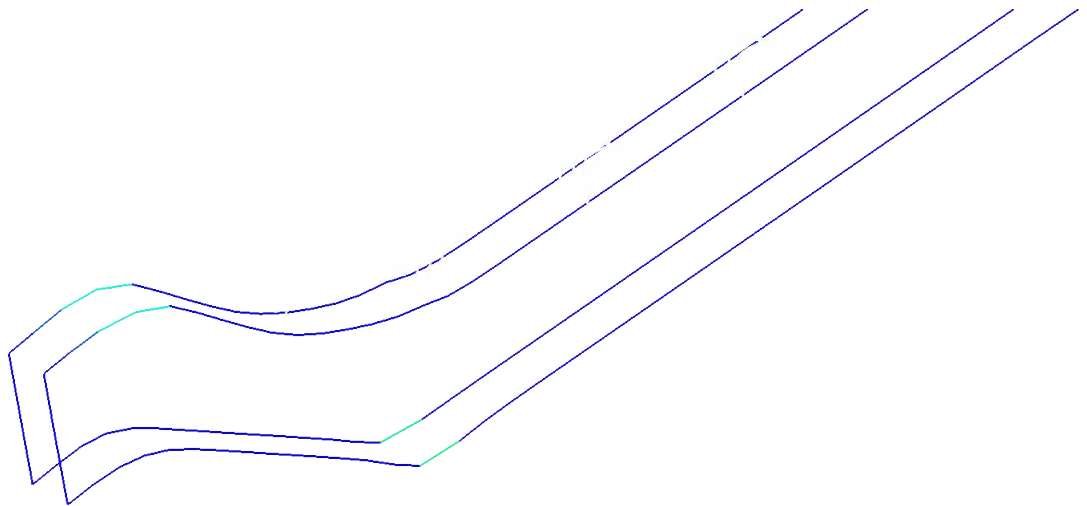


Figura 59: C30-APOIO-S/EST - AÇO  
Fonte: Autoria própria (2025).

#### **4.1.10 MODELO 10 (UHPFRC-ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO-SEM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC com abertura próxima ao apoio e sem estribos apresentou carga máxima de 11.625,59 kgf, incremento de 94% em relação ao modelo em C30 equivalente. A deflexão última foi de 12,82 mm, redução de 25% em relação ao C30, enquanto a deflexão no início do escoamento atingiu 1,80 mm, valor 165% superior ao concreto convencional. A tenacidade foi de 1.108,27 J, correspondendo a um aumento de 32% em relação ao C30. O modo de ruptura ocorreu por cisalhamento concentrado na região da abertura junto ao apoio, figuras 60 e 61, sem indícios de esmagamento do concreto, comportamento coerente com a maior resistência à compressão do UHPFRC. A ausência de estribos reduziu o confinamento local, mas a presença das fibras contribuiu para a manutenção da capacidade resistente e para o aumento da energia dissipada em comparação ao concreto convencional.

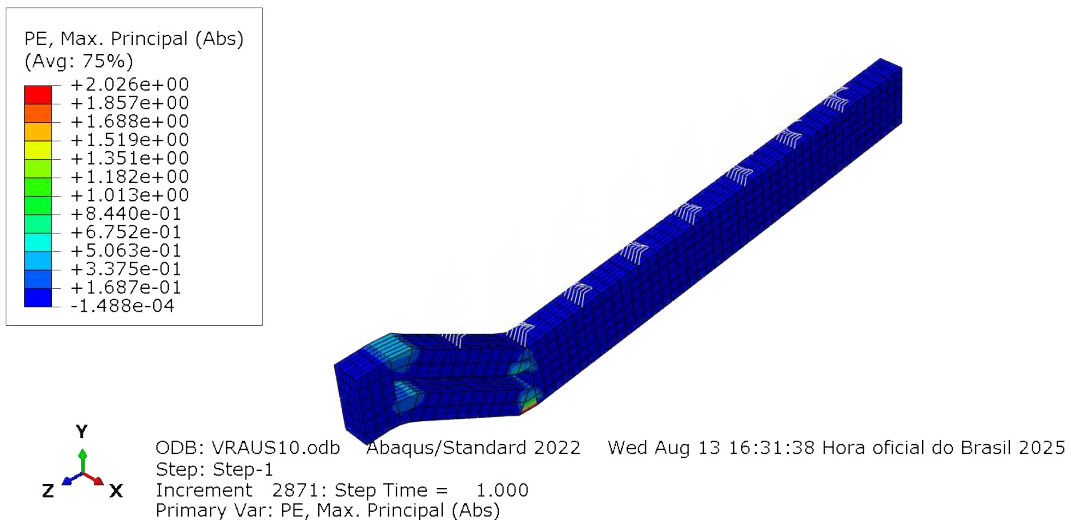


Figura 60: UHPFRC-APOIO-S/EST - CONCRETO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

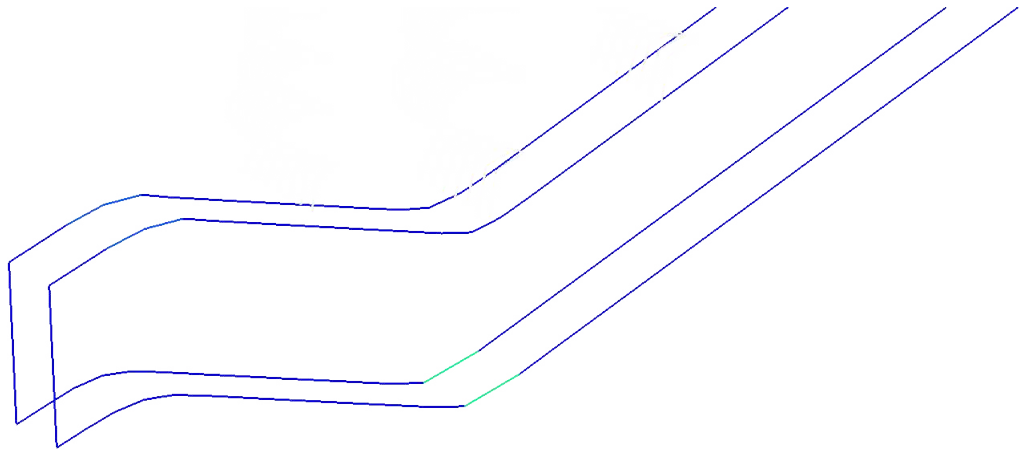


Figura 61: UHPFRC-APOIO-S/EST - AÇO  
Fonte: Aatoria própria (2025).

#### 4.1.11 MODELO 11 (C30-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-SEM ESTRIBOS)

O modelo em concreto convencional com abertura no meio do vão e sem estribos apresentou carga máxima de 8.889,57 kgf, redução de 4% em relação ao modelo de referência sem abertura e de 13% em relação ao modelo equivalente com estribos. A deflexão última foi de 16,25 mm, valor próximo ao do modelo sem abertura (-1%) e ao do modelo com estribos, enquanto a deflexão no início do escoamento manteve-se em 0,68 mm, sem alteração significativa. A tenacidade atingiu 940,07 J, redução de 9% em relação ao modelo sem abertura e de 11% em relação ao modelo com estribos. O modo de ruptura foi condicionado pelo cisalhamento no contorno da abertura, figuras 62 e 63, caracterizado pela abertura progressiva da descontinuidade central da viga. A ausência de armaduras transversais reduziu a capacidade resistente e a energia dissipada, confirmando o papel dos estribos no confinamento e evidenciando que a abertura no meio do vão comprometeu o desempenho em relação à viga íntegra.

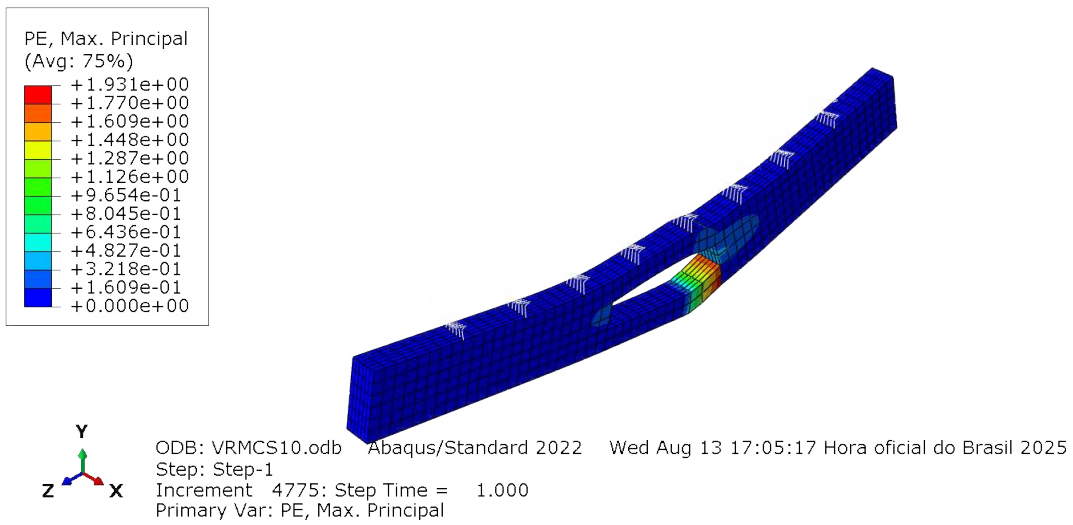


Figura 62: C30-MEIO-S/EST - CONCRETO  
Fonte: Autoria própria (2025).

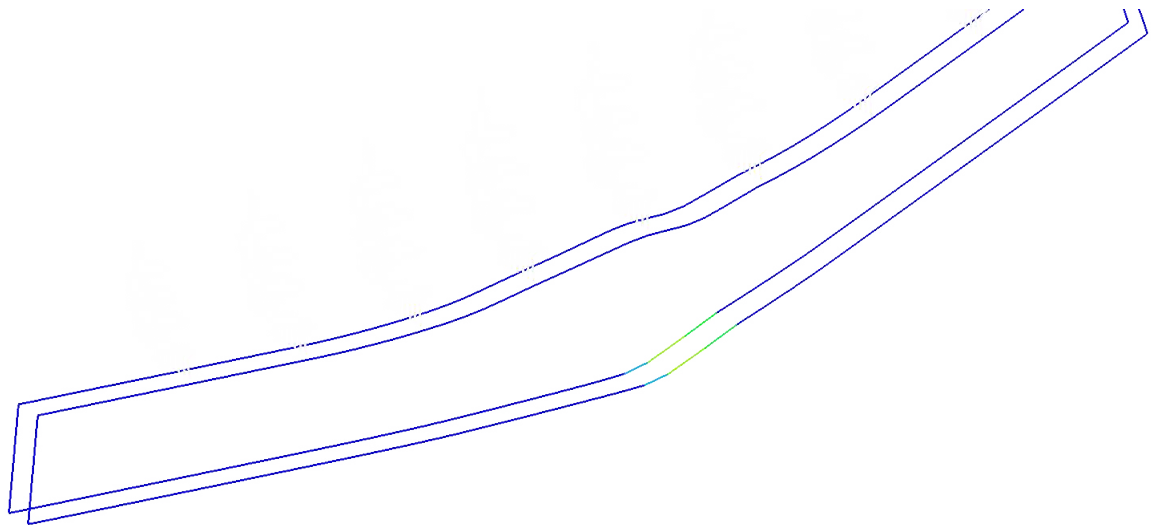


Figura 63: C30-APOIO-S/EST - AÇO

#### **4.1.12 MODELO 12 (UHPFRC-ABERTURA NO MEIO DO VÃO-SEM ESTRIBOS)**

O modelo em UHPFRC com abertura no meio do vão e sem estribos apresentou carga máxima de 15.061,72 kgf, incremento de 69% em relação ao modelo em C30 equivalente. A deflexão última foi de 24,69 mm (+52%) e a deflexão no início do escoamento atingiu 1,53 mm (+125%). A tenacidade foi de 3.013,29 J (+220%). O modo de ruptura ocorreu por flexão, com concentração das deformações na região inferior da seção ao redor da abertura, figuras 64 e 65, sem indícios de esmagamento. Em comparação com o modelo UHPFRC com abertura junto ao apoio, o posicionamento no meio do vão resultou em aumentos de 30% na carga máxima, 93% na deformação última e 172% na tenacidade, confirmando que a posição da abertura foi determinante para o desempenho, sendo menos crítica no meio do vão que no apoio.

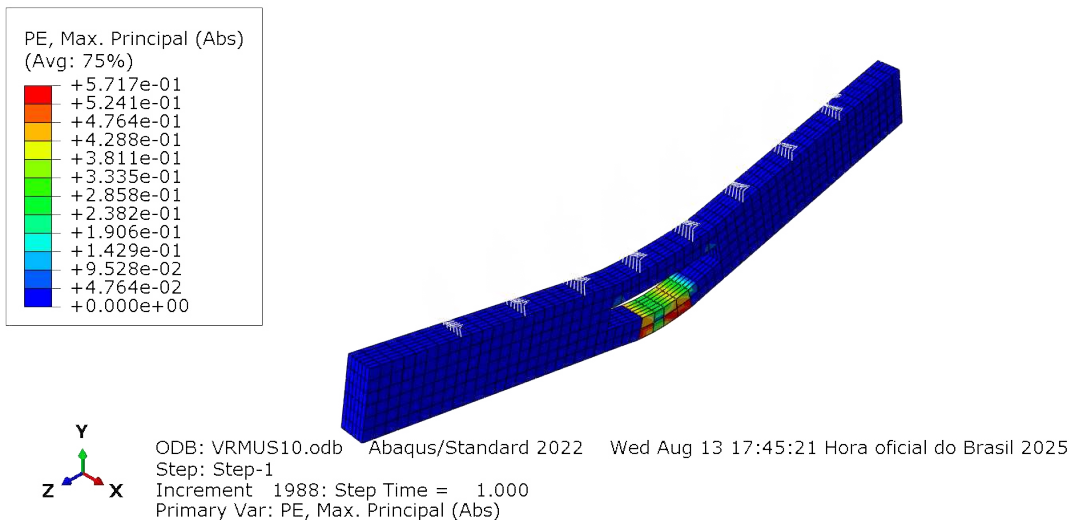


Figura 64: UHPFRC-MEIO-S/EST - CONCRETO  
Fonte: Autoria própria (2025).

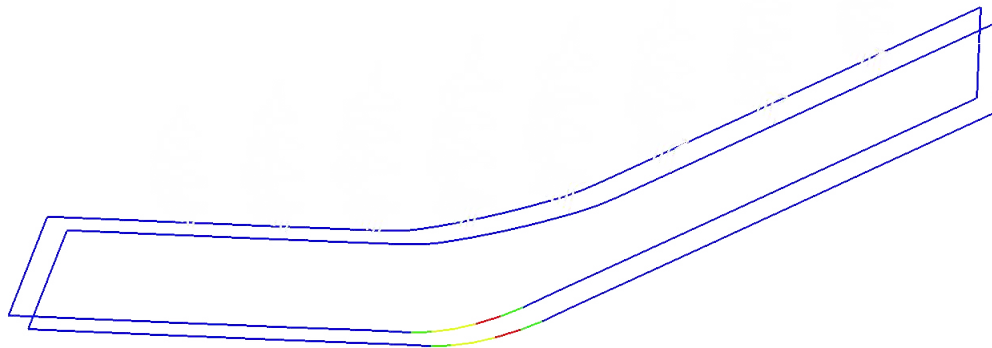


Figura 65: UHPFRC-MEIO-S/EST - AÇO

## 4.2 EFEITO DO MATERIAL (UHPFRC E C30)

A comparação entre os concretos C30 e UHPFRC evidencia ganhos expressivos em termos de desempenho estrutural quando adotado o material de Ultra-Alto Desempenho. Em todos os cenários analisados, o UHPFRC apresentou incremento significativo da resistência última, alcançando valores próximos ao dobro da força máxima suportada pelas vigas de concreto convencional (ex.: 18.620,92 kgf para o modelo UHPFRC-S/AB-C/EST contra 9.506,64 kgf para C30-S/AB-C/EST). Além disso, a tenacidade ( $U_t$ ) foi consideravelmente ampliada, com aumentos que superaram 200% em alguns casos, refletindo a maior capacidade do UHPFRC em absorver energia antes da ruptura.

Destaca-se ainda o comportamento em termos de deflexão no início do escoamento ( $\delta y$ ), que apresentou elevações superiores a 200% em todos os modelos, indicando maior extensão do regime elástico.

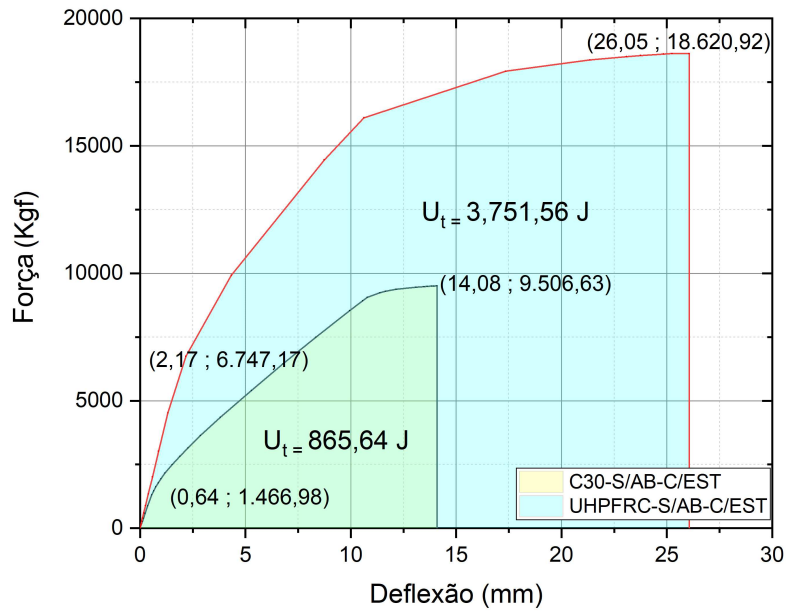
## 4.3 EFEITO DA POSIÇÃO DA ABERTURA

### 4.3.1 VIGAS SEM ABERTURA

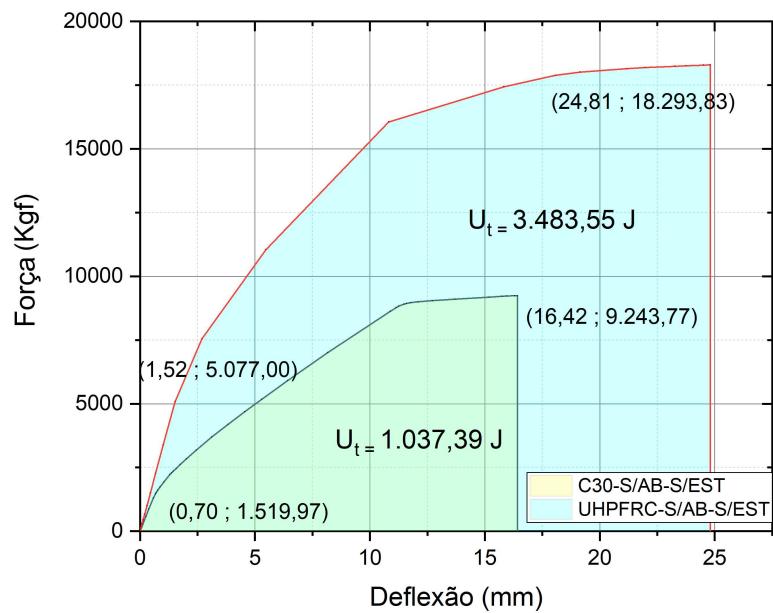
A análise das vigas sem abertura evidencia diferenças marcantes de desempenho entre o concreto convencional (C30) e o UHPFRC. Para o C30 com estribos, registrou-se carga máxima de 9.506,64 kgf, tenacidade de 865,64 J e deflexão última de 14,09 mm, parâmetros que caracterizam comportamento predominantemente frágil, com regime pós-elástico pouco expressivo. A retirada dos estribos resultou em redução de aproximadamente 3% na resistência última (9.243,77 kgf), mas promoveu incremento da deflexão última (16,42 mm) e da tenacidade (1.037,39 J), o que indica maior redistribuição de esforços associada à fissuração inclinada não contida.

No UHPFRC, os resultados confirmaram desempenho substancialmente superior. Na presença de estribos, a resistência última alcançou 18.620,92 kgf, valor próximo ao dobro do obtido no C30, enquanto a tenacidade atingiu 3.751,56 J, representando acréscimo superior a 300%. As deflexões também foram significativamente ampliadas, com  $\delta_u = 26,06$  mm e  $\delta_y = 2,17$  mm, evidenciando ductilidade mais pronunciada. Na condição sem estribos, ainda que tenha ocorrido discreta redução da resistência (18.293,83 kgf) e da tenacidade (3.483,55 J), os valores permaneceram muito acima dos observados para o concreto convencional, ressaltando a contribuição das fibras metálicas na contenção da fissuração e na redistribuição das tensões internas. Os gráficos estão demonstrados na figura 66.

A influência dos estribos mostrou-se relevante para o concreto convencional, enquanto no UHPFRC esse efeito foi menos pronunciado, uma vez que a presença de fibras atuou de forma eficaz na estabilização do processo de fissuração.



(a) Com estribo



(b) Sem estribo

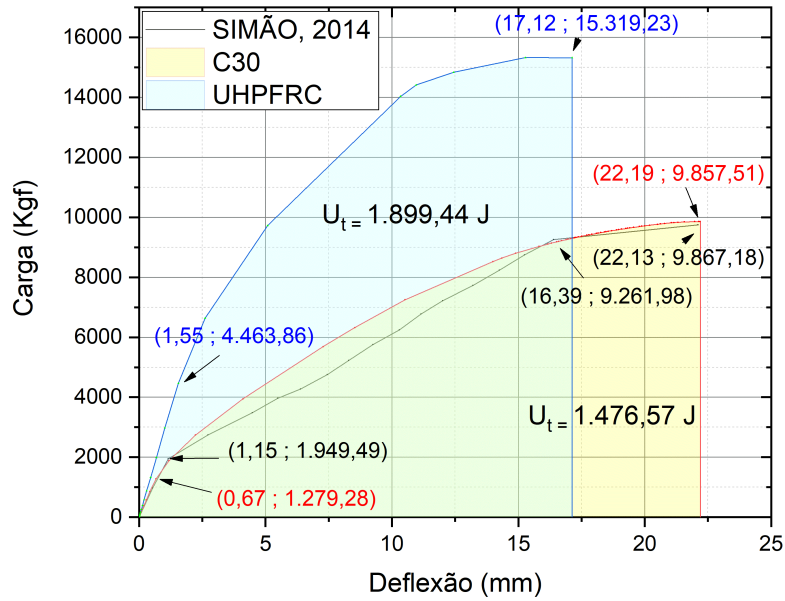
Figura 66: Gráfico comparativo UHPFRC-C30 sem abertura  
Fonte: Autoria própria (2025).

### 4.3.2 VIGAS COM ABERTURA PRÓXIMA AO APOIO

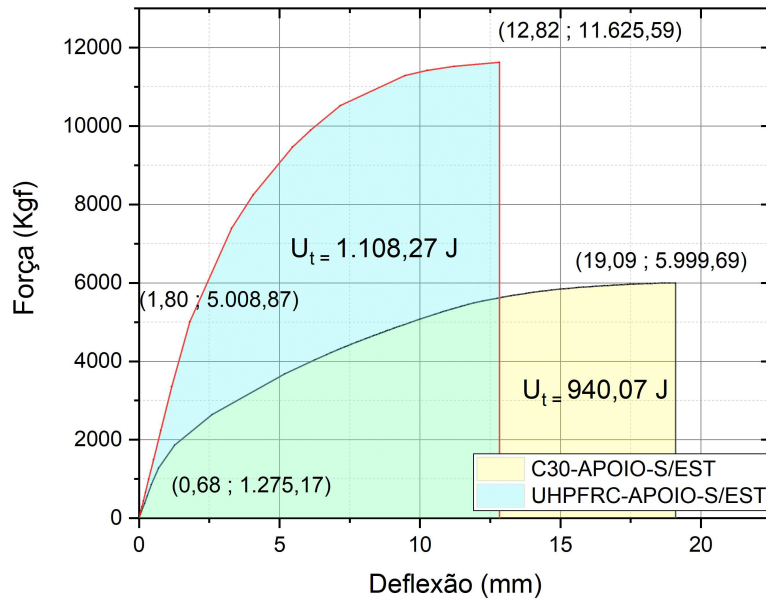
A presença de aberturas próximas ao apoio mostrou-se particularmente crítica para o comportamento estrutural das vigas, em virtude da concentração de tensões nesta região. Para o concreto convencional com estribos, a resistência última foi de 9.857,51 kgf, com deflexão última de 22,19 mm e tenacidade de 1.476,57 J. Embora a carga máxima seja semelhante à das vigas sem abertura, observou-se aumento expressivo da deformabilidade, evidenciado pela maior deflexão última, o que indica redistribuição parcial dos esforços em torno da descontinuidade. Na ausência de estribos, entretanto, houve redução acentuada da capacidade resistente, com carga máxima limitada a 5.999,69 kgf e tenacidade de apenas 842,05 J, caracterizando perda significativa de desempenho estrutural.

No caso do UHPFRC, ainda que o material tenha proporcionado ganhos substanciais em relação ao C30, os resultados também indicaram elevada sensibilidade à abertura nesta posição. Com estribos, a carga máxima atingiu 15.319,24 kgf, aproximadamente 55% superior ao C30 equivalente, acompanhada de tenacidade de 1.899,44 J e  $\delta_y = 1,56$  mm. Contudo, a deflexão última foi de apenas 17,12 mm, valor inferior ao observado no concreto convencional, sugerindo que a elevada rigidez da matriz reduziu a capacidade de deformação até a ruptura. Na ausência de estribos, a resistência caiu para 11.625,59 kgf e a tenacidade para 1.108,27 J, mantendo-se, ainda assim, superiores ao C30 sem estribos. A deflexão última reduziu-se para 12,82 mm, reforçando a limitação do UHPFRC em condições de descontinuidade localizada em zonas críticas. Os gráficos estão demonstrados na figura 67.

Em síntese, a abertura próxima ao apoio reduziu de forma significativa a capacidade resistente e a dissipação de energia das vigas em ambas as tipologias de concreto. O UHPFRC manteve desempenho global superior ao C30, porém com menor capacidade de deformação, especialmente na ausência de estribos, o que evidencia a influência decisiva da posição da descontinuidade na resposta estrutural.



(a) Com estribo



(b) Sem estribo

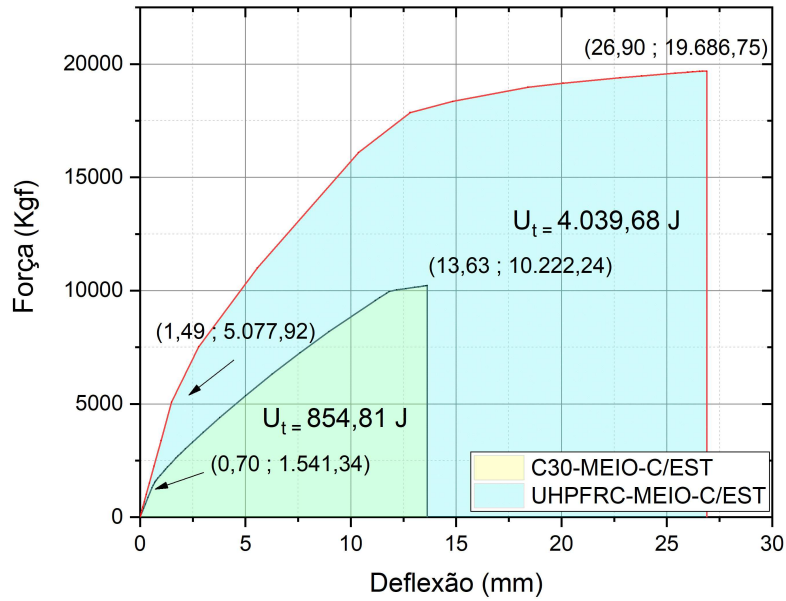
Figura 67: Gráfico comparativo UHPFRC-C30 abertura próxima ao apoio  
 Fonte: Autoria própria (2025).

### 4.3.3 VIGAS COM ABERTURA NO MEIO DO VÃO

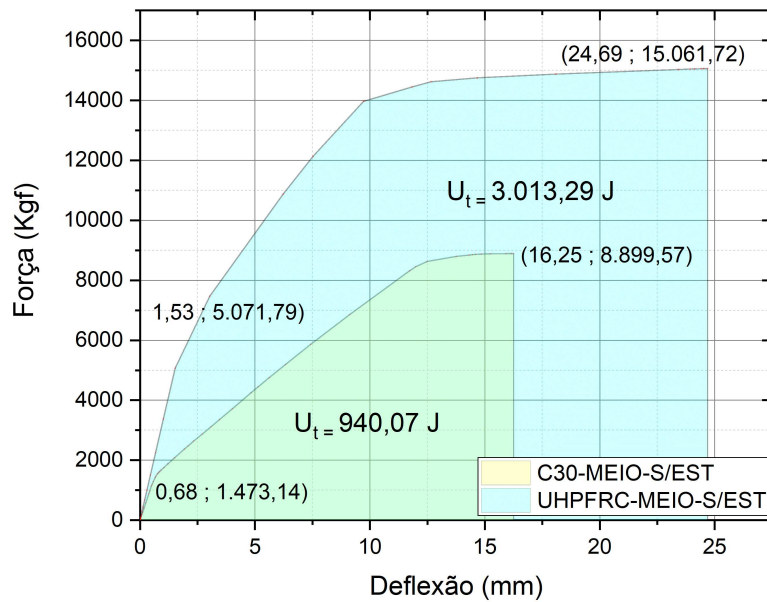
A análise das vigas com abertura posicionada no meio do vão evidencia que esta configuração, embora represente uma descontinuidade estrutural relevante, apresentou desempenho menos crítico que a abertura junto ao apoio. Para o concreto convencional com estribos, a resistência última foi de 10.222,24 kgf, acompanhada de tenacidade de 854,81 J e deflexão última de 13,63 mm. Os valores são próximos aos observados na condição sem abertura, sugerindo que, para o C30, a descontinuidade no meio do vão afetou de forma moderada a resposta estrutural. Na ausência de estribos, a resistência reduziu-se para 8.889,57 kgf e a tenacidade apresentou pequeno aumento (940,07 J), associada a uma deflexão última de 16,25 mm, indicando maior redistribuição de esforços com perda de capacidade resistente.

No UHPFRC, o desempenho foi significativamente superior. Com estribos, a resistência última atingiu 19.686,75 kgf, aproximadamente o dobro do valor obtido no C30, e a tenacidade alcançou 4.039,68 J, correspondendo a incremento expressivo na capacidade de dissipação de energia. As deflexões também foram substancialmente ampliadas, com  $\delta_u = 26,90$  mm e  $\delta_y = 1,50$  mm, denotando maior ductilidade. Na condição sem estribos, observou-se redução da carga máxima para 15.061,72 kgf e da tenacidade para 3.013,29 J, mas os valores permaneceram muito superiores aos do concreto convencional. A deflexão última (24,69 mm) manteve-se elevada, reforçando a contribuição das fibras no controle da fissuração e na redistribuição das tensões. Os gráficos estão demonstrados na figura 68.

De forma geral, a abertura no meio do vão ocasionou redução da capacidade resistente em ambas as tipologias de concreto, porém em intensidade inferior à observada nas vigas com abertura próxima ao apoio. O UHPFRC demonstrou desempenho global amplamente superior ao C30, com maior resistência, maior energia dissipada e deflexões mais elevadas, ainda que com redução relativa na ausência de estribos.



(a) Com estribo



(b) Sem estribo

Figura 68: Gráfico comparativo UHPFRC-C30 abertura no meio do vão  
 Fonte: Autoria própria (2025).

## 4.4 REGRESSÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o objetivo de aprofundar a compreensão dos resultados obtidos e estabelecer relações quantitativas entre os parâmetros geométricos e mecânicos das vigas e suas respostas estruturais, procedeu-se à aplicação de modelos de regressão acompanhados de análises estatísticas complementares. Foram considerados como variáveis independentes a resistência à compressão do concreto ( $F_{ct}$ ), a resistência à tração ( $F_t$ ), bem como parâmetros geométricos associados à posição e às dimensões das aberturas. Nessa definição,  $a$  corresponde ao comprimento da borda até o início da abertura,  $b$  ao comprimento da própria abertura e  $c$  ao comprimento da borda entre o término da abertura e a extremidade da viga. Em vigas sem abertura, convencionou-se  $b = 0$  e  $c = 0$ . A altura total da seção transversal é representada por  $h$ . Na figura 69 são demonstrados os parâmetros geométricos. Para melhor comparação entre diferentes geometrias, foram adotadas as razões adimensionais  $\frac{a}{h}$ ,  $\frac{b}{h}$  e  $\frac{c}{h}$ , as quais permitem avaliar o efeito relativo da abertura em relação à altura da viga.



Figura 69: Parâmetros geométricos associados à posição e à dimensão da abertura  
Fonte: Autoria própria (2025).

Como variáveis dependentes, foram analisadas a força máxima ( $F_{MÁX}$ ), a deflexão última ( $\delta_u$ ), a deflexão no início do escoamento ( $\delta_y$ ) e a tenacidade ( $U_t$ ). além das propriedades do material e razões geométricas da abertura, incluiu-se ainda a variável indicadora da presença de estribos transversais ( $E$ ), a qual assume valor 1 para vigas com estribos e 0 para vigas sem estribos,

A fim de assegurar a robustez dos modelos ajustados, foram empregados indicadores estatísticos clássicos de validação. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi utilizado para quantificar a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo, enquanto o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) corrige esse valor em função do número de variáveis independentes empregadas, evitando a superestimação da qualidade do ajuste em modelos com múltiplos termos. A análise da variância (ANOVA) permitiu verificar a significância global e individual dos termos incluídos, confirmando se a regressão apresentou contribuição estatisticamente relevante. O erro médio absoluto (MAE) foi adotado como métrica da mag-

nitide média das diferenças entre valores previstos e observados, enquanto o erro percentual médio absoluto (MAPE) expressou essa discrepância em termos relativos, permitindo avaliar a precisão do modelo independentemente da escala da variável analisada. Adicionalmente, foram calculados o desvio-padrão e a variância dos resíduos, de forma a mensurar a dispersão dos erros em torno da média, e realizada a inspeção individual dos resíduos, com o intuito de identificar potenciais *outliers* e avaliar a consistência do ajuste.

#### 4.4.1 REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $F_{MÁX}$

A regressão aplicada aos resultados de carga máxima ( $F_{MÁX}$ ) teve como objetivo identificar a influência conjunta dos parâmetros mecânicos, geométricos e estruturais sobre a capacidade resistente das vigas. O modelo mais representativo foi obtido pela combinação da resistência à tração do material ( $F_t$ ), da razão adimensional  $\frac{c}{h}$  em termos linear e quadrático, e da variável indicadora de presença de estribos ( $E$ ). O modelo resultante apresentou coeficiente de determinação  $R^2 = 0,930$ , evidenciando elevado grau de explicação da variabilidade dos dados. A equação final obtida é expressa por:

$$F_{\max} [\text{kgf}] = 6858,02 + 1183,77 F_t - 90,28 \left(\frac{c}{h}\right)^2 + 2349,86 E + 248,30 \left(\frac{c}{h}\right)$$

Os indicadores de erro reforçam a adequação do ajuste, com erro médio absoluto (MAE) de 939,8 kgf e erro percentual médio absoluto (MAPE) de 7,8%. Os resíduos apresentaram desvio-padrão de 1198,5 kgf e variância de  $1,44 \times 10^6 \text{ kgf}^2$ , com distribuição aproximadamente simétrica em torno de zero. Embora alguns casos isolados tenham apresentado discrepâncias mais elevadas, especialmente em vigas com aberturas próximas ao apoio, a equação demonstrou robustez para representar a capacidade resistente em função dos parâmetros considerados. Ressalta-se ainda que o termo referente a  $E$  confirmou de forma quantitativa a relevância da presença de estribos, associando-a a um incremento médio superior a 2300 kgf na carga máxima das vigas. A figura 70 e tabela 9 demonstram os valores obtidos numericamente comparados com os obtidos pelas equações.

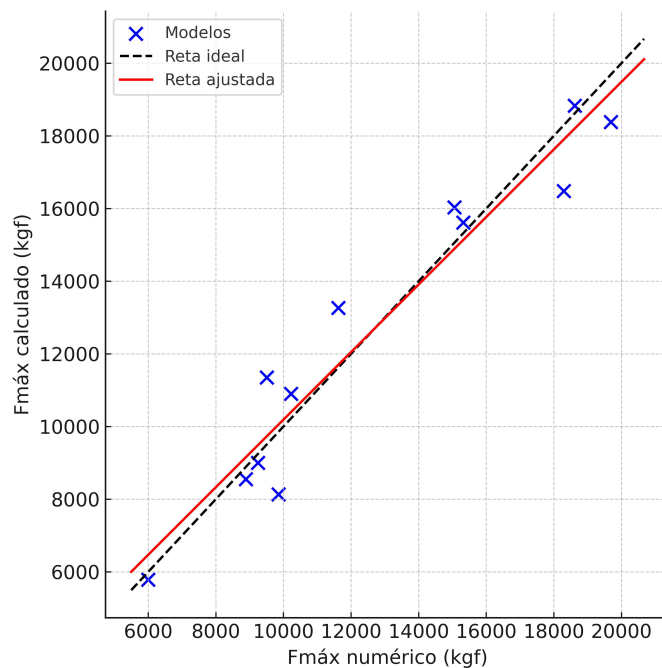


Figura 70: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $F_{MÁX}$

MODELO	$F_{MÁX}$ (Kgf)	$F_{MÁX-CALC}$ (Kgf)	Erro percentual
1	9.506,63	11.346,95	19,36%
2	18.620,92	18.831,93	1,13%
3	9.857,51	8.130,95	17,52%
4	15.319,24	15.615,93	1,94%
5	10.222,24	10.895,67	6,59%
6	19.689,75	18.380,65	6,63%
7	9.243,77	8.997,09	2,67%
8	18.293,83	16.482,07	9,90%
9	5.999,69	5.781,09	3,64%
10	11.625,59	13.266,07	14,11%
11	8.889,57	8.545,81	3,87%
12	15.061,72	16.030,79	6,43%

Tabela 9: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $F_{MÁX}$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

#### 4.4.2 REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $\delta_u$

A regressão aplicada aos valores de deflexão última ( $\delta_u$ ) foi conduzida considerando como variáveis independentes a resistência à tração do concreto ( $F_t$ ), as razões geométricas da abertura ( $\frac{a}{h}$ ,  $\frac{b}{h}$  e  $\frac{c}{h}$ ) e a variável indicadora  $E$  que indica a presença ou não de estribos.

O modelo resultante, obtido por regressão penalizada do tipo Lasso, apresentou desempenho estatístico elevado, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,922$ , erro médio absoluto (MAE) de 1,17 mm, erro percentual médio absoluto (MAPE) de 7,2%. A equação ajustada foi expressa da seguinte forma:

$$\hat{\delta}_u = 11,7816 + 0,1633 \left( F_t \cdot \frac{a}{h} \right) + 1,4119 \left( F_t \cdot \frac{b}{h} \right) - 0,4869 \left( F_t \cdot \frac{c}{h} \right) - 0,2632 \left( \frac{a}{h} \cdot \frac{b}{h} \right) + 0,1686 \left( \frac{c}{h} \right)^2 + 0,9080 E.$$

A análise dos resíduos indicou distribuição aproximadamente simétrica em torno de zero, sem identificação de outliers significativos, reforçando a consistência do ajuste. Observou-se ainda elevada correlação entre os valores numéricos e os calculados, com a reta ajustada próxima da reta ideal. O termo associado à variável  $E$  evidencia que a presença de estribos contribui positivamente para a deflexão última, com acréscimo médio estimado em aproximadamente 0,9 mm, resultado coerente com a interpretação estrutural de que a armadura transversal aumenta a ductilidade e favorece a redistribuição dos esforços nas regiões críticas da viga. A figura 71 e tabela 10 demonstram os valores obtidos numericamente comparados com os obtidos pelas equações.

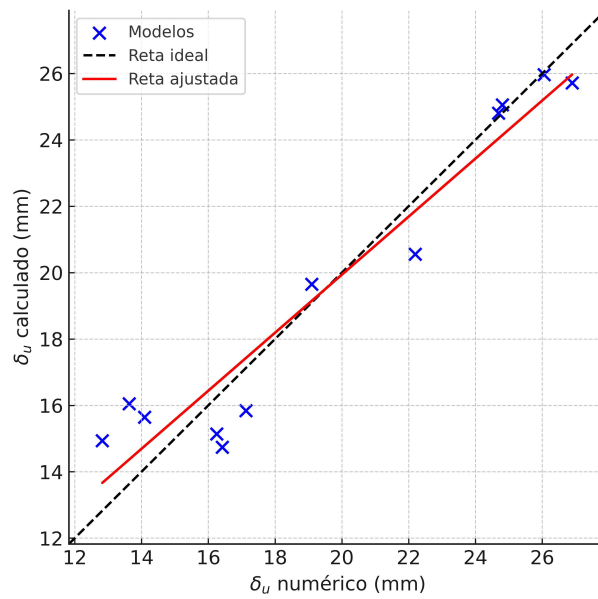


Figura 71: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $\delta_u$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

MODELO	$\delta_u$ (mm)	$\delta_{u-CALC}$ (mm)	Erro porcentual
1	14,08	15,64	11,01%
2	26,05	25,97	0,36%
3	22,19	20,56	7,36%
4	17,12	15,84	7,51%
5	13,62	16,05	17,73%
6	26,89	25,72	4,39%
7	16,42	14,73	10,28%
8	24,80	25,06	1,02%
9	19,09	19,65	2,93%
10	12,82	14,93	16,46%
11	16,25	15,14	6,85%
12	24,69	24,81	0,47%

Tabela 10: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $\delta_u$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

#### 4.4.3 REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $\delta_y$

No caso da deflexão no limite elástico ( $\delta_y$ ), foi ajustado um modelo de regressão múltipla considerando como variáveis independentes a resistência à tração direta ( $F_t$ ) e as razões geométricas  $\frac{a}{h}$ ,  $\frac{b}{h}$  e  $\frac{c}{h}$ , em como a presença de estribos transversais, representada pela variável indicadora  $E$ . Após a avaliação de diferentes alternativas (modelos lineares, polinomiais e com interações), o melhor desempenho foi obtido por meio de uma regressão linear com termos de interação entre  $F_t$  e as razões geométricas, além do termo independente associado aos estribos. O modelo final apresentou coeficiente de determinação  $R^2 = 0,931$ , evidenciando capacidade explicativa elevada em relação aos dados experimentais. A equação ajustada é expressa por:

$$\begin{aligned} \delta_y = & 0,0159 + 0,001842 F_t + 0,031527 \left(\frac{a}{h}\right) + 0,125914 \left(\frac{b}{h}\right) + 0,012886 \left(\frac{c}{h}\right) \\ & + 0,017934 F_t \left(\frac{a}{h}\right) - 0,024756 F_t \left(\frac{b}{h}\right) + 0,025617 F_t \left(\frac{c}{h}\right) + 0,08231 E \end{aligned}$$

A inclusão do termo  $E$  permitiu captar o efeito médio positivo da presença de estribos, resultando em incremento de aproximadamente 0,08 mm em  $\delta_y$ . A análise estatística indicou erro médio absoluto (MAE) de 0,078 mm, erro percentual médio absoluto (MAPE) de 5,1% e desvio-padrão dos resíduos de 0,142 mm, valores que confirmam baixa dispersão em torno da equação. A ANOVA evidenciou a forte significância da razão  $\frac{a}{h}$  e de sua interação com  $F_t$ , além de significância secundária para  $\frac{c}{h}$  e para o termo de estribos. Já os parâmetros  $\frac{b}{h}$  e  $F_t \cdot \left(\frac{b}{h}\right)$  mostraram influência pouco expressiva. A distribuição dos resíduos manteve-se aproximadamente simétrica em torno de zero, sem viés sistemático, ainda que duas observações referentes a vigas em UHPFRC sem abertura tenham se destacado como potenciais outliers. De forma geral, a equação demonstrou-se robusta e confiável, capaz de representar a variação de  $\delta_y$  em função das propriedades do material, das proporções geométricas e do detalhamento transversal adotado. A figura 72 e tabela 11 demonstram os valores obtidos numericamente comparados com os obtidos pelas equações.

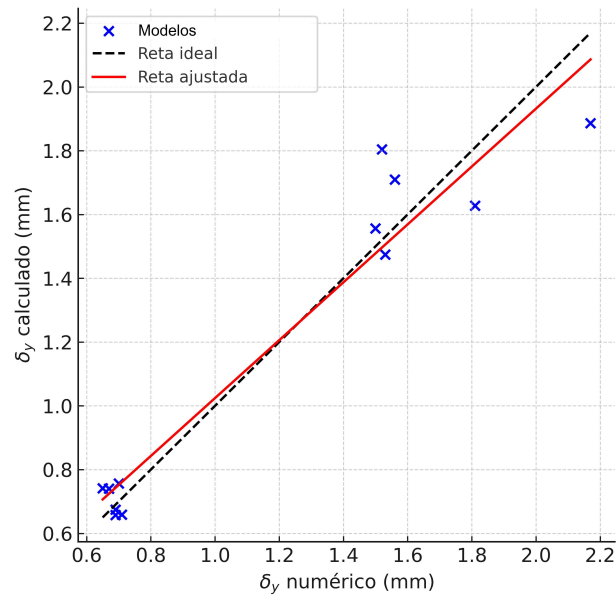


Figura 72: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $\delta_y$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

MODELO	$\delta_y$ (mm)	$\delta_{y-CALC}$ (mm)	Erro percentual
1	0,65	0,74	14,52%
2	2,17	1,88	13,18%
3	0,67	0,74	10,23%
4	1,56	1,71	9,90%
5	0,70	0,75	7,65%
6	1,50	1,55	3,85%
7	0,71	0,65	7,12%
8	1,52	1,80	18,45%
9	0,69	0,65	4,46%
10	1,81	1,62	9,92%
11	0,69	0,67	2,25%
12	1,53	1,47	3,78%

Tabela 11: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $\delta_y$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

#### 4.4.4 REGRESSÃO APLICADA AOS RESULTADOS DE $U_t$

Com o objetivo de compreender a relação entre a tenacidade ( $U_t$ ) e os parâmetros mecânicos e geométricos das vigas analisadas, foi ajustado um modelo de regressão múltipla. Para a formulação, consideraram-se como variáveis independentes a resistência máxima ( $F_{MÁX}$ ), a deflexão última ( $\delta_u$ ) e o indicador da presença de estribos ( $E$ ).

O modelo resultante apresentou excelente desempenho estatístico, com coeficiente de determinação de  $R^2 \approx 0,998$ , erro médio absoluto (MAE) em torno de 51 J e erro percentual médio absoluto (MAPE) de apenas 3,6%. A equação ajustada é expressa por:

$$U_t = -412,6066 + 0,007275 (F_{\max} \cdot \delta_u) + 0,019859 F_{\max} \\ + 12,688 \delta_u - 113,810 E$$

Os resultados demonstram que a combinação de variáveis mecânicas diretamente associadas à resposta estrutural permitiu capturar de forma consistente o comportamento das vigas. O termo  $F_{MÁX} \cdot \delta_u$  destacou-se como o de maior influência, confirmando sua interpretação física como estimativa da energia dissipada.

A análise dos resíduos evidenciou baixa dispersão e ausência de outliers significativos, reforçando a confiabilidade do modelo. Assim, a regressão proposta constitui uma ferramenta satisfatória para a previsão da tenacidade, conciliando coerência estatística com fundamentação física. A figura 73 e tabela 12 demonstram os valores obtidos numericamente comparados com os obtidos pelas equações.

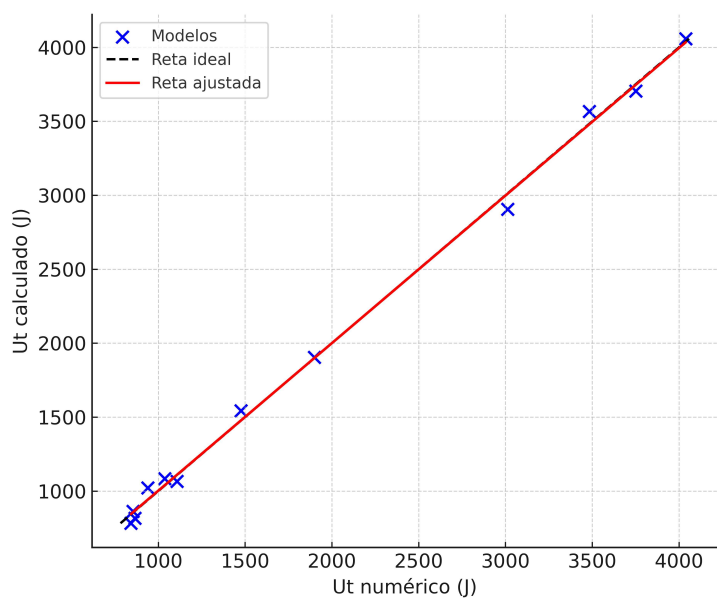


Figura 73: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $U_t$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

MODELO	$U_t(J)$	$U_t - CALC (J)$	Erro percentual
1	865,64	815,56	5,79%
2	3.751,56	3.704,16	1,26%
3	1.476,57	1.542,74	4,48%
4	1.899,44	1.904,13	0,25%
5	854,81	863,07	0,97%
6	4.039,68	4.058,14	0,46%
7	1.037,39	1.083,60	4,45%
8	3.483,55	3.566,69	2,39%
9	842,05	782,27	7,10%
10	1.108,27	1.065,57	3,85%
11	940,07	1.021,12	8,62%
12	3.013,29	2.905,44	3,58%

Tabela 12: Comparativo entre valores numéricos e calculados de  $U_t$   
 Fonte: Autoria própria (2025).

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O objetivo geral deste trabalho foi analisar e comparar, por meio de modelagem numérica com o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* (CDP) implementado no software ABAQUS, o comportamento estrutural de vigas de concreto com aberturas na alma, considerando o concreto convencional (C30) e o concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC). Esse objetivo foi alcançado, permitindo compreender os efeitos da posição da abertura e da presença de estribos sobre a resistência, a deformabilidade e a capacidade de dissipação de energia nos 12 modelos analisados.

Em relação aos objetivos específicos, as conclusões são:

1. Validação do modelo numérico: a calibração realizada com base no estudo de Simão (2014) demonstrou elevada coerência entre resultados experimentais e numéricos, com diferenças inferiores a 5% em termos de carga máxima e deflexão. Isso confirmou a capacidade do CDP de representar a não linearidade física do concreto, validando sua utilização neste estudo.
2. Ampliação para o UHPFRC: a adaptação do modelo mostrou ganhos expressivos em relação ao C30. O UHPFRC praticamente dobrou a resistência última ( $F_{MÁX}$ ), ampliou em mais de 300% a tenacidade ( $U_t$ ) e aumentou significativamente as deflexões  $\delta_y$ , evidenciando maior deformabilidade elástica inicial. Tais resultados demonstram que o emprego do UHPFRC contribui para o melhor desempenho em serviço das vigas com aberturas.
3. Influência da posição da abertura: verificou-se que a abertura no meio do vão resultou em comportamento intermediário, ainda com ganhos relevantes para o UHPFRC, enquanto a abertura próxima ao apoio representou o cenário mais crítico, com reduções de  $\delta_u$  e ganhos limitados em tenacidade. Já as vigas sem abertura obtiveram os melhores resultados absolutos em resistência e energia dissipada.
4. Efeito da presença de estribos: os modelos com reforço transversal apresentaram maiores valores de resistência e dissipação de energia. Destacou-se o UHPFRC com abertura no meio do vão, no qual os estribos proporcionaram acréscimo superior a 30% em  $F_{MÁX}$  e ampliaram significativamente a tenacidade, confirmando a importância desse reforço na redistribuição de tensões e na contenção da fissuração.
5. Metodologia de modelagem numérica: foi demonstrada a viabilidade do CDP como ferramenta para análise de vigas com aberturas, tanto em concreto convencional quanto

em UHPFRC. O modelo mostrou-se robusto para representar os efeitos do material, da geometria e do reforço transversal, consolidando-se como recurso confiável para investigações comparativas e paramétricas.

De forma integrada, os resultados confirmam que o UHPFRC é alternativa superior ao concreto convencional para vigas com aberturas, desde que a posição da descontinuidade e a necessidade de estribos sejam criteriosamente avaliadas. Assim, o estudo contribui para a compreensão da interação entre material, geometria e detalhamento construtivo, além de reforçar a aplicabilidade do CDP como ferramenta de análise em estruturas de alta complexidade.

## 5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente trabalho apresenta avanços na compreensão do comportamento estrutural de vigas em Concreto de Ultra-Alto Desempenho com aberturas na alma. Contudo, algumas limitações devem ser reconhecidas, tanto no âmbito numérico quanto na aplicabilidade prática dos resultados:

1. Supressão do dano no modelo numérico: a formulação empregada no ABAQUS, baseada no modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), foi conduzida com restrições associadas ao processo de convergência, o que implicou a supressão do dano. Dessa forma, os resultados se restringem ao trecho pré-pico das curvas força-deflexão, sem capturar o comportamento pós-pico característico da fissuração progressiva e da degradação da rigidez.
2. Ausência de validação experimental direta: embora os resultados numéricos tenham apresentado coerência com a literatura, o estudo não foi acompanhado de uma campanha experimental específica com protótipos físicos dedicados ao UHPFRC. Essa ausência limita a calibração refinada dos parâmetros do modelo CDP e ao comportamento pós-fissuração.
3. Simplificações geométricas e de carregamento: a modelagem incorporou hipóteses de carregamento e vínculo simplificadas, porém com a inclusão de coeficientes de mola equivalentes, de modo a representar a flexibilidade dos apoios e a interação com o sistema estrutural. Essa abordagem permitiu considerar, ainda que de forma aproximada, os efeitos de deslocabilidade dos vínculos, conferindo maior aderência do modelo ao comportamento esperado.

Em síntese, as limitações aqui destacadas não invalidam os resultados obtidos, mas reforçam que eles devem ser interpretados como uma análise paramétrica de caráter comparativo.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados obtidos neste trabalho tenham demonstrado relevância para a compreensão do comportamento estrutural de vigas de concreto com aberturas, algumas limitações foram identificadas e apontam caminhos promissores para pesquisas futuras.

Uma vertente importante é a validação experimental ampliada. O presente estudo baseou-se na calibração com um único modelo de referência, mas a aplicação do método a um conjunto mais diversificado de ensaios — incluindo diferentes geometrias de aberturas, taxas de armadura e condições de carregamento — permitiria consolidar estatisticamente a confiabilidade das simulações.

Além disso, a análise concentrou-se em carregamentos monotônicos estáticos. Investigações futuras poderiam incluir efeitos dinâmicos e cíclicos, considerando solicitações de impacto, fadiga e ações sísmicas, nas quais o UHPFRC apresenta potencial de desempenho superior.

A sustentabilidade do UHPFRC também se apresenta como campo emergente. Estudos que incorporem a utilização de adições minerais alternativas, fibras recicladas ou estratégias de otimização da matriz cimentícia podem ampliar a viabilidade do material em larga escala, mantendo as propriedades mecânicas de interesse. Nesse contexto, destaca-se ainda o conceito de desmaterialização, em que o uso de concretos de Ultra-Alto Desempenho possibilita a redução do volume de material empregado nas estruturas, favorecendo projetos mais esbeltos e ambientalmente eficientes.

Outra possibilidade de avanço consiste em estudar a aplicabilidade do Método das Bielas e Tirantes (MBT) em elementos de UHPFRC, de forma a avaliar a adequação de seus pressupostos quando aplicados a um material de alto desempenho e identificar eventuais ajustes necessários para sua utilização em contextos de projeto.

Por fim, recomenda-se explorar a integração entre modelagem numérica e métodos de otimização estrutural, permitindo propor diretrizes práticas de projeto que auxiliem projetistas e fabricantes na tomada de decisão sobre o emprego de aberturas em elementos de UHPFRC, inclusive no contexto das normas brasileiras.

## Referências

- AASHTO (2020). *Guide Specifications for Highway Construction*. 10<sup>a</sup> ed. Com revisões intermediárias de 2022. Washington, DC: American Association of State Highway e Transportation Officials (AASHTO). ISBN: 978-1-56051-731-3.
- Abdellatief, M., W. Hamla e H. Hamouda (2025). “AI driven prediction of early age compressive strength in ultra high performance fiber reinforced concrete”. Em: *Scientific Reports* 15, p. 20316. DOI: 10.1038/s41598-025-06725-z.
- ABNT (2021). *NBR 16938: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Requisitos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- (2023). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. ABNT. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ACI (2019). *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete*. ACI. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (ACI).
- AFNOR (2016). *NF P 18-710: Complément national à l’Eurocode 2 — Règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP)*. Norma francesa. AFNOR. Paris: Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Aguiar, Caio Cesar Pereira de (2018). “Dimensionamento de estruturas especiais de concreto armado pelo método de bielas e tirantes”. Português. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas.
- Ahmed, A. et al. (set. de 2012). “Reinforced Concrete Beams with Web Openings: A State of the Art Review”. Em: *Materials and Design* 40, pp. 90–102. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.001.
- Al-Enezi, Meshal S., Ahmed M. Yousef e Ahmed M. Tahwia (jul. de 2023). “Shear Capacity of UHPFRC Deep Beams with Web Openings”. Em: *Case Studies in Construction Materials* 18, e02105. ISSN: 22145095. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02105.
- Ali, L. H., R. F. Hassan e H. H. Hussein (2024). “Experimental and analytical investigations of torsional strength in ultra-high-performance concrete beams with transverse openings”. Em: *Buildings* 14, p. 2315. DOI: 10.3390/buildings14082315.
- Amador, Railson Braga (2025). *Estudo de compatibilização de projetos em uma instituição pública na cidade de Monte Horebe-PB*. Português. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Orientador: Prof. Me. Cicero Joelson Vieira Silva. Cajazeiras.
- Azanaw, Girmay Mengesha (2025). “Ultra-high-performance concrete (UHPC/UHPFRC) for civil structures: a comprehensive review of material innovations, structural applications,

- and future engineering perspectives”. Em: *i-manager’s Journal on Civil Engineering* 15.1, pp. 21–30. DOI: 10.26634/jce.15.1.21792.
- Barbosa, Felipe Augusto da Silva (2025). “Investigação computacional do comportamento a flexão de vigas de UHPFRC e vigas de armado reforçadas com UHPFRC”. Defesa em: 18 fev. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.2025.tde-08082025-091630. URL: <https://doi.org/10.11606/T.3.2025.tde-08082025-091630>.
- Beer, F. P. et al. (2015). *Mecânica dos Materiais*. 7<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: AMGH.
- Bertram, C. (2015). “Experimental Investigations on the Shear Behavior of Pretensioned Beams Made of UHPC with and Without Web Openings”. Em: *Bauingenieur* 90.September, pp. 444–455.
- Birtel, V. e P. Mark (2006). “Parameterised Finite Element Modelling of RC Beam Shear Failure”. Em: *Abaqus User’s Conference*, pp. 95–108.
- Camargo, Ana Luiza (2018). *Detalhes da conexão dos elementos de concreto na fachada do MUCEM*. Fotografia. Disponível em: <https://blog.archtrends.com/mucem>. Acesso em: 10 set. 2025.
- Carreira, D. J. e K. C. Chu (1985). “Stress-strain relationship for plain concrete in compression”. Inglês. Em: *ACI Journal* 82.6, pp. 797–804.
- CEB-FIP (2010). *Model Code 2010*. Inglês. Bulletin 65/66. Comité Euro-International du Béton; Fédération Internationale de la Précontrainte. Lausanne: fib – Fédération internationale du béton.
- Cechella, Geraldo et al. (2011). *Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho*.
- CEN (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Inclui corrigenda até 2010 e revisão em 2023. CEN. Brussels: Comité Européen de Normalisation (CEN).
- Chen, Gai et al. (2024). “Fracture behavior of environmentally friendly high-strength concrete using recycled rubber powder and steel fibers: Experiment and modeling”. Em: *Case Studies in Construction Materials* 21.
- DAfStb (2022). *DAfStb Richtlinie Ultrahochfester Beton (UHPC) — Empfehlungen für die Planung, Bemessung und Ausführung*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb).
- Demetrio, Karolayne da Silva e Caio Cesar Pereira de Aguiar (2021). *Dimensionamento de vigas de concreto armado com abertura pelo método de bielas e tirantes*. Português. São Paulo.
- Drucker, Daniel C. e William Prager (1952). “Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design”. Em: *Quarterly of Applied Mathematics* 10.2, pp. 183–190.

- El-Basiouny, A. M., H. S. Askar e M. E. El-Zoughiby (2025). “Experimental and numerical study on the effect of web openings on the torsional behavior of pre-compressed hollow UHPC beams”. Em: *Scientific Reports* 15.1, p. 32258. DOI: 10.1038/s41598-025-17420-4.
- Elsayed, Mahmoud et al. (2022). “Shear Behaviour of Ultra-High Performance Concrete Beams with Openings”. Em: *Structures* 43, pp. 546–558.
- Fan, Jin et al. (2024). “Sustainable reinforced concrete design: The role of ultra-high performance concrete (UHPC) in life-cycle structural performance and environmental impacts”. Em: *Engineering Structures* 3161. Open Access.
- Farias, Eduardo Alcino de, Tereza Marques e Denyse Pereira de Araújo (2016). *Modelagem numerica do comportamento de pilares de concreto armado reforçados com prfc usando o modelo constitutivo concrete damaged plasticity*.
- Gidrão, Gustavo de Miranda Saleme, Pablo Augusto Krahl e Ricardo Carrazedo (2021). “Numerical modeling and design of precast prestressed UHPFRC I beams”. Em: *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 14.3, e14310. ISSN: 1983-4195. DOI: 10.1590/S1983-41952021000300010. URL: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000300010>.
- Gidrão, Gustavo de Miranda Saleme et al. (2024). “A Comprehensive Study of Prestressed UHPFRC I-Beams under Cyclic Loading”. Em: *Engineering Structures* 304, p. 117598.
- Guo, Yixuan et al. (2024). “Self-sensing ultra-high performance concrete: a review”. Em: *Measurement Science and Technology* 35.3.
- Khaleel, B. A. e E. T. Dawood (2025). “Evolution of ultra high performance concrete using hybrid fibers: a review”. Em: *Discover Concrete & Cement* 1, p. 2. DOI: 10.1007/s44416-025-00001-z.
- Kmiecik, P. e Mieczyslaw Kaminski (dez. de 2011). “Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken into Consideration”. Em: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 11, 623–636. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60105-8.
- Krahl, Pablo, Ricardo Carrazedo e Mounir Debs (2016). “Lateral buckling analysis of precast UHPFRC beams”. Inglês. Em: *Proceedings of the International fib Symposium*. Cape Town: fib – Fédération internationale du béton.
- Krahl, Pablo Augusto (2018). “Lateral stability of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with emphasis in transitory phases”. Acesso em: 2024-08-11. Tese (Doutorado em Estruturas). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606/T.18.2018.tde-27082018-125631. URL: <https://doi.org/10.11606/T.18.2018.tde-27082018-125631>.

- Krahl, Pablo Augusto, Ricardo Carrazedo e Mounir Khalil El Debs (2018). “Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation”. Em: *Engineering Structures* 170, pp. 63–77. ISSN: 0141-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.064>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617316000>.
- Kunzler, Paulo Schmeling (2013). “Análise paramétrica por elementos finitos de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma”. Português. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Ladeira, Artur Hallack (2019). *Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Análise de Estruturas de Concreto Armado via Modelos de Bielas e Tirantes e Técnicas de Otimização Topológica*.
- Lande, I. et al. (2025). “Full-scale production and material properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) for rehabilitation of bridge decks in Norway”. Em: *Frontiers in Built Environment* 11. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1570920.
- Lee, Jeeho e Gregory L. Fenves (1998). “Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures”. Inglês. Em: *Journal of Engineering Mechanics* 124.8, pp. 892–900. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- Leonhardt, Fritz e Eduard Monnig (1978). *Construções de concreto: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado*. Vol. 3. Tradução de Volesungen über Massivbau, Dritter Teil - Dritte Auflage. Rio de Janeiro: Interciência.
- Liu, Jian et al. (2024). “A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads”. Em: *Cement and Concrete Composites* 148. Open Access.
- Maffezzoli, Bianca Paola (2018). *UHPFRC – Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*. Fotografia. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UHPFRC\\_-\\_Ultra-High\\_Performance\\_Fiber\\_Reinforced\\_Concrete.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UHPFRC_-_Ultra-High_Performance_Fiber_Reinforced_Concrete.jpg). Acesso em: 18 ago. 2025. Licença: Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).
- Mahmood, O. e W. Abdullah (2025). “Behavior of reinforced concrete beams with openings: a review”. Em: *Emerging Technologies and Engineering Journal* 2, p. 5. DOI: 10.53898/etej2025215.
- Mehta, P. Kumar e Paulo J. M. Monteiro (2014). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2ª edição. Nicole Pagan Hasparyk. ISBN: 978-85-98576-21-3.
- Morsch, Emil (1909). *Concrete-Steel Construction: Der Eisenbetonbau*.

- Müseler, Arne (2022). *Stade Jean-Bouin, Paris, France*. Fotografia. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris\\_Stade\\_Jean-Bouin\\_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_Stade_Jean-Bouin_(cropped).jpg). Acesso em: 10 set. 2025. Licença: CC BY-SA 3.0.
- Oliveira Ribeiro, Paula de, Pablo Augusto Krahl e Ricardo Carrazedo (2022). “Calibration of group effect parameters through genetic algorithms for micromechanical modeling of UHPFRC”. Em: *Composite Structures* 280, p. 114933. ISSN: 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114933>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321013659>.
- Perera, M. A. G. P. e P. G. Ranjith (2024). “Eco-friendly cementitious composites for enhanced strength: Emerging trends and innovations”. Inglês. Em: *Journal of Cleaner Production* 468, p. 142962. DOI: [10.1016/j.jclepro.2024.142962](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142962).
- Redaelli, Dario e Joanna Yared Nseir (2020). “Structural Behavior of Prestressed Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Beams with and Without Openings: Comparison Between Experimental Results and Finite Element Modelling Techniques”. Em: *3rd ACI-fib-RILEM International Workshop on Fibre Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications, FRC 2018*. Vol. SP-343. Desenzano, pp. 474–483.
- Redžić, N., N. Grgić e G. Baloević (2025). “A review on the behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) under long-term loads”. Em: *Buildings* 15, p. 571. DOI: [10.3390/buildings15040571](https://doi.org/10.3390/buildings15040571).
- Ritter (1899). *Ritter and Co. Annual Seed Catalogue*. Inglês. New York: Ritter e Company.
- Saad, A. G., M. A. Sakr, T. M. Khalifa et al. (2024). “Shear behavior of RC beams with openings under impact loads: unveiling the effects of HSC and RECC”. Em: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 24, p. 236. DOI: [10.1007/s43452-024-01041-1](https://doi.org/10.1007/s43452-024-01041-1).
- Saint-Venant, A. J. C. B. de (1855). “Mémoire sur la torsion des prismes”. Em: *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* 10, pp. 225–305.
- Sarah, Jabbar, Farzad Hejazi e Nima Ostovar (nov. de 2019). “Effect of Using High-Strength Concrete and Ultra-High-Performance Concrete Material on Reinforced Concrete Beam with Opening under Flexural Load”. Em: vol. 357. Institute of Physics Publishing, p. 012022. DOI: [10.1088/1755-1315/357/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012022).
- Shnait, M. A. e A. F. Izzet (2024). “Flexural behavior of reinforced concrete beams with steel-plate reinforced vertical opening”. Em: *Civil Engineering Journal* 10.9, pp. 2820–2838. DOI: [10.28991/CEJ-2024-010-09-04](https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-09-04).
- SIA (2016). *SIA 2052: Bemessung von Tragwerken aus Ultrahochleistungs-Faserbeton (UHFB)*. Norma suíça. SIA. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA).
- Silva, Reginaldo Carneiro da e José Samuel Giongo (1991). “Concreto armado: aplicacoes de modelos de bielas e tirantes”. Diss. de mestr. Universidade de São Paulo.

- Silveira, G. Santos da et al. (2024). “Exploring strength and ductility responses of beam-column joints using UHPC and UHPFRC employing Concrete Damaged Plasticity”. Em: *Frattura ed Integrità Strutturale* 18.68, pp. 77–93. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.05.
- Silveira, Guilherme Santos da (2025). “Contribuição sobre o comportamento do concreto de altíssimo desempenho reforçado por fibras hibridizadas (HyUHPFRC)”. PB - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. URL: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/36247>.
- Simulia, Dassault Systèmes (2016). *Abaqus/CAE User's Guide*. Available at: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/index.html>. Dassault Systèmes.
- Simão, David Williams da Glória (2014). “Análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas na alma”. Português. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.
- Soares, Renan et al. (jan. de 2021). “Análise numérica via elementos finitos em vigas de concreto armado quando submetidas a descontinuidades não previstas na etapa de projeto”. Em: *Brazilian Journal of Development* 7, pp. 20445–20461. DOI: 10.34117/bjdv7n2-608.
- Souza, Rafael Alves (2004). “Concreto estrutural: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades”. Português. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Brasília: Universidade de Brasília – UnB, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Sung-Gul, Hong e Youm Hyun-Soo (2022). “Shear Strength of UHPC Beams with Web Openings for Lightweight Modular Floor Systems”. Em: *6th fib International Congress on Concrete Innovation for Sustainability*. Oslo, pp. 1351–1359.
- Tang, X., C. Feng, B. Ren et al. (2025). “Experimental study on the triaxial compressive properties of UHPC with coarse aggregate steel slag micro powder under different confining pressures”. Em: *Scientific Reports* 15, p. 12343. DOI: 10.1038/s41598-025-96723-y.
- Ullah, Rahat et al. (jun. de 2022). “Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review”. Em: *Materials* 15 (12), p. 1231. ISSN: 19961944. DOI: 10.3390/ma15124131.
- V., Anish e Logeshwari J. (2024). “A review on ultra high-performance fibre-reinforced concrete with nanomaterials and its applications”. Em: *Journal of Engineering and Applied Science* 71.1. Open Access.
- Wan, J. et al. (2025). “Calculation analysis and design on flexural capacity of partially encased steel-concrete composite beam with web opening”. Em: *Scientific Reports* 15, p. 27010. DOI: 10.1038/s41598-025-13009-z.

- Xu, L. et al. (2025). “Prediction of ultra-high-performance concrete (UHPC) compressive strength based on convolutional neural networks”. Em: *Materials (Basel)* 18.12, p. 2851. DOI: 10.3390/ma18122851.
- Yoo, Doo-Yeol, Nemkumar Banthia e Young-Soo Yoon (2024). “Recent development of innovative steel fibers for ultra-high-performance concrete (UHPC): A critical review”. Em: *Cement and Concrete Composites* 145.
- Youm, Hyun-Soo e Sung-Gul Hong (2021). “Effects of Reinforcement Details on Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Beams with Web Openings”. Em: *Journal of the Korea Concrete Institute* 33.6, pp. 637–648.
- Zagon, Raul, Stijn Matthys e Zoltan Kiss (out. de 2016). “Shear Behaviour of SFR-UHPC I-Shaped Beams”. Em: *Construction and Building Materials* 124, pp. 258–268. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.075.