

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Davi Costa de Castro**

**Otimização de vigas protendidas de concreto de altíssimo  
desempenho com foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub>**

Juiz de Fora  
2026

**ufjf**

**Davi Costa de Castro**

**Otimização de vigas protendidas de concreto de altíssimo desempenho com  
foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub>**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovado em 30 de janeiro de 2026.

Orientadora: Profa. Dra. Paula de Oliveira Ribeiro

Coorientadora: Profa. Dra. Julia Castro Mendes

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl

Juiz de Fora

2026

Castro, Davi Costa de.

Otimização de vigas protendidas de concreto de altíssimo desempenho com foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub> / Davi Costa de Castro. -- 2026.  
107 p. : il.

Orientadora: Paula de Oliveira Ribeiro

Coorientadores: Julia Castro Mendes , Pablo Augusto Krahl

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. UHPFRC. 2. Protensão. 3. Algoritmos genéticos. 4. Otimização. 5. Sustentabilidade. I. Ribeiro , Paula de Oliveira, orient. II. Mendes , Julia Castro, coorient. III. Krahl, Pablo Augusto, coorient. IV. Título.

## Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

DAVI COSTA DE CASTRO

**Título: "Otimização de vigas protendidas de concreto de altíssimo desempenho com foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub>"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 30/01/2026

### BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) Paula de Oliveira Ribeiro - Orientadora e Presidente da Banca -(UFJF)

Prof(a) Dr(a) Julia Castro Mendes - Coorientadora - (UFJF)

Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl - Membro Titular Externo - (UPM)

Prof. Dr. Afonso Celso de Castro Lemonge - Membro Titular Interno - (UFJF)

Prof. Dr. Alex Micael Dantas de Sousa - Membro Titular Externo - (UNESP)

Juiz de Fora, 04/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Afonso Celso de Castro Lemonge, Professor(a)**, em 04/02/2026, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paula de Oliveira Ribeiro, Professor(a)**, em 04/02/2026, às 13:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes, Professor(a)**, em 04/02/2026, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alex Micael Dantas de Sousa, Usuário Externo**, em 05/02/2026, às 08:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **KLAUS H P RODRIGUES, Usuário Externo**, em 19/02/2026, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ujf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2858070** e o código CRC **537DC692**.

“Entregue o seu caminho ao Senhor; confie nele, e ele agir.”  
(Salmo 37:5)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela dádiva da vida, pelas bênçãos recebidas, pelo fortalecimento concedido ao longo desta jornada e por sempre guiar meus passos. Agradeço, de forma especial, pela recuperação de meu pai, um momento desafiador que reforçou minha fé, resiliência e gratidão.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Oswaldo e Laura, pelo apoio e amor incondicional, acreditando em mim em todos os momentos. Ao meu irmão, Pedro, pelo companheirismo e pela torcida. À minha noiva, Tatiane, pela paciência, compreensão e incentivo ao longo de todas as etapas deste processo.

Agradeço à minha orientadora, Paula, pela presença constante, dedicação e empenho, sempre pronta a compartilhar seu conhecimento e contribuir para o meu crescimento acadêmico. Destaco, ainda, sua sensibilidade, compreensão e apoio nos momentos pessoais difíceis vivenciados ao longo deste período, demonstrando não apenas excelência acadêmica, mas também humanidade e empatia.

Agradeço aos meus coorientadores, Julia e Pablo, pelo apoio ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Suas valiosas considerações e contribuições técnicas foram fundamentais para o aprimoramento deste trabalho, enriquecendo as análises e fortalecendo os resultados obtidos.

Agradeço à coordenação e a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pela gestão competente e pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro concedido, que possibilitou a continuidade dos meus estudos e a dedicação às atividades de pesquisa desenvolvidas.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da licença do software Abaqus, essencial para o desenvolvimento das simulações numéricas (Processo nº APQ-01072-24).

## RESUMO

O concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete - UHPFRC) é um compósito cimentício que apresenta elevadas resistências mecânicas e durabilidade, permitindo a concepção de elementos estruturais mais esbeltos e leves quando comparados ao concreto convencional. Essas características conferem ao UHPFRC potencial para a redução do consumo de materiais e para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas às estruturas, desde que sua aplicação esteja associada a estratégias adequadas de projeto estrutural. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo investigar o potencial da utilização do UHPFRC em vigas protendidas com foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, mantendo-se, no mínimo, a capacidade de carga originalmente imposta. A metodologia adotada baseou-se na modelagem numérica por elementos finitos de uma viga protendida de referência. O UHPFRC foi empregado como material alternativo ao concreto convencional, considerando dois teores de fibras de aço, iguais a 1% e 2%. A desmaterialização das seções transversais foi conduzida por meio de otimização estrutural baseada em algoritmos genéticos, tendo como função objetivo a minimização das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à etapa do produto do ciclo de vida (A1–A3), com a análise concentrada na subetapa A1, relativa ao suprimento de matérias-primas. Os resultados indicaram que a abordagem adotada possibilita a redução de aproximadamente 23,3% e 17,6% nas emissões de CO<sub>2</sub> para os teores de fibras de 1% e 2%, respectivamente, em relação à viga convencional. Observou-se também redução expressiva do peso próprio, da ordem de 49,8% e 50,2%, evidenciando o efeito direto da desmaterialização promovida pela otimização estrutural. Conclui-se que a utilização do UHPFRC em vigas protendidas apresenta uma solução promissora para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, desde que associada à otimização estrutural, reforçando a importância da integração entre desempenho mecânico e sustentabilidade ambiental na fase de concepção estrutural.

Palavras-chaves: UHPFRC; Protensão; Algoritmos genéticos; Otimização; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) is a cementitious composite that exhibits high mechanical strength and durability, enabling the design of more slender and lighter structural elements when compared to conventional concrete. These characteristics give UHPFRC the potential to reduce material consumption and mitigate carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions associated with structures, provided that its application is combined with appropriate structural design strategies. In this context, this study aimed to investigate the potential use of UHPFRC in prestressed concrete beams with a focus on reducing CO<sub>2</sub> emissions while maintaining, at a minimum, the originally required load-carrying capacity. The adopted methodology was based on finite element numerical modeling of a reference prestressed beam. UHPFRC was employed as an alternative material to conventional concrete, considering two steel fiber volume fractions, equal to 1% and 2%. The dematerialization of the cross-sections was performed through structural optimization based on genetic algorithms, with the objective function defined as the minimization of CO<sub>2</sub> emissions associated with the product stage of the life cycle (A1–A3), with the analysis concentrated on substage A1, related to raw material supply. The results indicated that the proposed approach enables reductions of approximately 23,3% and 17,6% in CO<sub>2</sub> emissions for fiber contents of 1% and 2%, respectively, compared to the conventional concrete beam. A significant reduction in self-weight was also observed, on the order of 49,8% and 50,2%, highlighting the direct effect of the dematerialization achieved through structural optimization. It is concluded that the use of UHPFRC in prestressed beams represents a promising solution for reducing CO<sub>2</sub> emissions when combined with structural optimization, reinforcing the importance of integrating mechanical performance and environmental sustainability at the structural design stage.

Keywords: UHPFRC; Prestressing; Genetic algorithms; Optimization; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Empacotamento das partículas do UHPFRC.....	6
Figura 2 – Relação entre resistência e porosidade.....	7
Figura 3 – Fibras de aço (diâmetro 0,2 mm e comprimento 13 mm) .....	8
Figura 4 – Curva tensão-deformação do UHPC e UHPFRC na compressão .....	9
Figura 5 – Curva tensão-deformação do UHPC e UHPFRC na tração.....	9
Figura 6 – Pontes de transferência de tensões.....	10
Figura 7 – <i>Strain hardening</i> .....	10
Figura 8 – <i>Strain softening</i> .....	11
Figura 9 – Curva tensão-deformação na tração e compressão .....	12
Figura 10 – Seção transversal da superfície de plastificação .....	14
Figura 11 – Resposta à tração do UHPFRC.....	17
Figura 12 – Ângulo de inclinação das fibras .....	18
Figura 13 – Previsões da emissão de CO <sub>2</sub> até 2050 .....	22
Figura 14 – Classes e subclasse <i>Roadmap Net Zero - Brasil</i> .....	22
Figura 15 – Desmaterialização por diferentes sistemas construtivos .....	23
Figura 16 – Estágios da LCA .....	24
Figura 17 – Esquema do método de seleção da roleta.....	28
Figura 18 – Esquema de métodos de cruzamento .....	30
Figura 19 – Esquema do método de mutação .....	31
Figura 20 – Fluxograma algoritmos genéticos .....	32
Figura 21 – Dimensões da viga de referência.....	34
Figura 22 – Resultado experimental da viga de referência.....	35
Figura 23 – Modelagem completa da viga de referência .....	35
Figura 24 – Modelos completo e simplificado da viga de referência.....	36
Figura 25 – Modelagem simplificada da viga de referência .....	37
Figura 26 – Curvas de entrada compressão e tração da viga de referência.....	37
Figura 27 – Curvas de entrada compressão e tração das vigas otimizadas.....	40
Figura 28 – Definição das variáveis do algoritmo genético.....	41
Figura 29 – Delimitação mínima da geometria.....	44
Figura 30 – Etapas do ciclo de vida do concreto (produto e construção) .....	48
Figura 31 – Comparativo entre tipos de elementos finitos .....	52

Figura 32 – Comparativo entre tamanhos de malha .....	53
Figura 33 – Modo de falha experimental.....	54
Figura 34 – Deformações plásticas viga de referência .....	54
Figura 35 – Tensões nas armaduras viga de referência.....	55
Figura 36 – Escoamento das armaduras viga de referência.....	55
Figura 37 – Verificação dos modelos numéricos .....	56
Figura 38 – Evolução do algoritmo genético (Vf-1%).....	58
Figura 39 – Geometria dos melhores indivíduos (Vf-1%) .....	60
Figura 40 – Verificação das curvas força-deslocamento (Vf-1%) .....	61
Figura 41 – Representação da viga de solução ótima (Vf-1%).....	62
Figura 42 – Tensões no concreto no ato da protensão (Vf-1%).....	63
Figura 43 – Deformações plásticas viga otimizada (Vf-1%).....	63
Figura 44 – Tensões armaduras viga otimizada (Vf-1%) .....	64
Figura 45 – Escoamento das armaduras viga otimizada (Vf-1%) .....	64
Figura 46 – Modelos da viga otimizada (Vf-1%) .....	65
Figura 47 – Evolução do algoritmo genético (Vf-2%).....	66
Figura 48 – Geometria dos melhores indivíduos (Vf-2%) .....	67
Figura 49 – Verificação das curvas força-deslocamento (Vf-2%) .....	68
Figura 50 – Representação da viga de solução ótima (Vf-2%).....	69
Figura 51 – Tensões no concreto no ato da protensão (Vf-2%).....	70
Figura 52 – Deformações plásticas viga otimizada (Vf-2%).....	70
Figura 53 – Tensões armaduras viga otimizada (Vf-2%) .....	71
Figura 54 – Escoamento das armaduras viga otimizada (Vf-2%) .....	71
Figura 55 – Modelos da viga otimizada (Vf-2%) .....	72
Figura 56 – Vigas analisadas quanto às emissões de CO <sub>2</sub> e aos pesos próprios .....	73
Figura 57 – Emissões de CO <sub>2</sub> por metro cúbico de concreto .....	74
Figura 58 – Índice de CO <sub>2</sub> incorporado ao concreto .....	75
Figura 59 – Emissões totais de CO <sub>2</sub> das vigas .....	76
Figura 60 – Peso próprio das vigas .....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência da inclinação das fibras .....	21
Tabela 2 – Propriedades do concreto convencional .....	34
Tabela 3 – Propriedades da armadura passiva .....	34
Tabela 4 – Propriedades da armadura ativa .....	34
Tabela 5 – Parâmetros de entrada do concreto convencional .....	38
Tabela 6 – Parâmetros de entrada do UHPFRC.....	39
Tabela 7 – Propriedades mecânicas das vigas otimizadas .....	40
Tabela 8 – Parâmetros das curvas compressão e tração das vigas otimizadas.	40
Tabela 9 – Diâmetros e áreas de aço adotadas .....	42
Tabela 10 – Cobrimentos mínimos para o UHPFRC .....	42
Tabela 11 – Espaçamentos horizontais mínimos para o UHPFRC.....	43
Tabela 12 – Espaçamentos verticais mínimos para o UHPFRC.....	43
Tabela 13 – Intervalos das variáveis do algoritmo genético .....	45
Tabela 14 – Proporções dos traços .....	49
Tabela 15 – Coeficientes de emissão de CO <sub>2</sub> .....	50
Tabela 16 – Variáveis dos melhores indivíduos (Vf-1%).....	59
Tabela 17 – Variáveis dos melhores indivíduos (Vf-2%).....	66
Tabela 18 – Emissões de CO <sub>2</sub> por material.....	73
Tabela 19 – Emissões totais de CO <sub>2</sub> por material .....	76
Tabela 20 – Áreas, volumes e massas dos componentes das vigas.....	77

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGs	Algoritmos genéticos
CI	Índice de CO <sub>2</sub> incorporado
FO	Função Objetivo
LCA	Análise do ciclo de vida
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
UHPC	Concreto de Altíssimo Desempenho
UHPFRC	Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado com Fibras

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Justificativa .....	2
1.3	Objetivos .....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Concreto de Altíssimo Desempenho.....	5
2.1.1	Comportamento mecânico à compressão .....	8
2.1.2	Comportamento mecânico à tração .....	9
2.2	Concrete Damaged Plasticity (CDP).....	11
2.2.1	Modelo à compressão .....	14
2.2.2	Modelo à tração.....	16
2.3	Desmaterialização .....	21
2.4	Algoritmos Genéticos.....	25
2.4.1	Seleção .....	27
2.4.2	Reprodução.....	29
2.4.3	Mutação .....	30
2.4.4	Parâmetros.....	31
3	Metodologia .....	33
3.1	Estudo Experimental de Referência.....	33
3.2	Modelagem Computacional .....	35
3.3	Método de Otimização .....	38
3.3.1	Adoção do UHPFRC .....	38
3.3.2	Etapa de otimização .....	41
3.4	Avaliação dos Índices de Sustentabilidade .....	48

4	Resultados .....	52
4.1	Modelos Numéricos .....	52
4.1.1	Modelo completo .....	52
4.1.2	Modelo simplificado .....	56
4.2	Otimização por Algoritmo Genético .....	57
4.2.1	Viga em UHPFRC (Vf-1%) .....	57
4.2.2	Viga em UHPFRC (Vf-2%) .....	65
4.3	Comparativo das Emissões de CO <sub>2</sub> e dos Pesos das Vigas .....	72
5	Conclusão .....	80
	Referências .....	82
	Apêndice A .....	89
A.1	UHPFRC-Vf1% (185,3 MPA) .....	89
A.2	UHPFRC-Vf2% (185,8 MPA) .....	92
	Apêndice B .....	95
B.1	Curvas completas UHPFRC-Vf1% (136,8 MPa) .....	95
B.2	Curvas completas UHPFRC-Vf2% (138 MPa) .....	96

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPRFC) é um compósito cimentício com propriedades mecânicas e de durabilidade superiores às do concreto convencional (RIBEIRO *et al.*, 2022). Sua composição inclui cimento *Portland*, aditivos reativos, agregados finos, superplastificantes e fibras de aço. A combinação e a otimização desses materiais conferem alta densidade de empacotamento à matriz endurecida, resultando em elevada resistência, ductilidade e durabilidade (KRAHL *et al.*, 2018).

Devido a essas características, o UHPRFC tem sido cada vez mais utilizado em projetos complexos e desafiadores, atendendo à demanda de arquitetos(as) e engenheiros(as) em obras como pontes, túneis, edifícios, fachadas, escadas, reforços estruturais e soluções de design inovadoras (FEHLING *et al.*, 2014). No entanto, para que seu emprego seja sustentável, é fundamental considerar o impacto ambiental associado ao material e buscar sua minimização, especialmente devido ao cimento *Portland*, responsável por cerca de 5% a 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (ZHANG & ZHANG, 2021).

A redução das emissões de carbono no setor da construção civil é uma prioridade mundial. A Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do relatório *Roadmap for Buildings and Construction* (GLOBALABC, 2020), destaca a necessidade de materiais mais eficientes e com baixa emissão de carbono como meta essencial até 2050. No Brasil, a iniciativa *Roadmap Net Zero – Brasil* (ABCP, 2022) também reforça esse movimento, assumindo compromissos para alcançar a neutralidade de carbono na produção de cimento e concreto até 2050.

Nesse contexto, a adoção do UHPRFC, aliada a medidas que promovam o uso mais eficiente de insumos, com redução do consumo de materiais e, conseqüentemente, de custos e impactos ambientais, configura um campo emergente de investigação, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, com destaque para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante da crescente necessidade de reduzir os impactos ambientais no setor da construção, torna-se essencial compreender, de forma quantitativa, como o UHPFRC pode efetivamente contribuir para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, estudos recentes têm incorporado métricas ambientais e análises de ciclo de vida, permitindo avaliar não apenas o desempenho estrutural, mas também os impactos ambientais associados.

Entre as pesquisas voltadas a essa temática, destaca-se o trabalho de Al-Ameen *et al.* (2024), que comparou o uso do UHPFRC em painéis sanduíches cimentícios de ultra-alto desempenho projetado (SUHPC-SP) com sistemas construtivos em tijolos e blocos (B&B), por meio de uma análise do ciclo de vida (ACV) realizada no *software SimaPro*. Os resultados indicaram que, em ambos os sistemas, a etapa do produto (A1–A3) concentrou a maior parcela dos impactos ambientais, representando, em média, cerca de 62% e 66% dos impactos totais para SUHPC-SP e B&B, respectivamente. Observou-se ainda que o fim de vida (C1–C4) apresentou participação significativamente menor no SUHPC-SP, com aproximadamente 6% dos impactos médios totais, enquanto no sistema B&B essa etapa foi mais representativa, alcançando cerca de 18% (AL-AMEEN *et al.*, 2024).

Outro estudo significativo foi conduzido por Joe & Moustafa (2016), que investigaram custos ambientais e financeiros associados ao uso de pilares de pontes rodoviárias em UHPFRC em substituição ao concreto convencional. Os autores apontaram potencial redução de até 75% no uso de materiais e 35% na pegada de carbono, destacando que o elevado teor de cimento em composições típicas de UHPFRC pode ser compensado pela diminuição geral na quantidade de concreto empregada; além disso, sugerem aprofundar as análises de ciclo de vida de pontes construídas com UHPFRC (JOE & MOUSTAFA, 2016).

Sameer *et al.* (2019) realizaram uma avaliação comparativa através da análise do ciclo de vida (LCA) para pontes em UHPFRC e concreto convencional, considerando carbono, material e pegada hídrica. Os resultados indicaram reduções de 14%, 27% e 43% nessas métricas, respectivamente, evidenciando o potencial do UHPFRC para minimizar impactos ambientais em diferentes aspectos (SAMEER *et al.*, 2019).

Com o objetivo de preencher lacunas na literatura, Fan *et al.* (2024) realizaram uma análise estrutural por elementos finitos no *software Diana*, considerando um

período de 75 anos, e compararam vigas de UHPFRC, concreto convencional e viga composta quanto à corrosão e às emissões de carbono. O estudo mostrou que, para vigas de concreto armado, as emissões de carbono referentes à fase de manutenção (B2-B5) são superiores às emissões iniciais, enquanto, nas vigas de UHPFRC e na viga composta, as emissões de manutenção representam uma proporção menor do total ao longo do ciclo de vida; além disso, as emissões de ciclo de vida do UHPFRC-1, UHPFRC-2 e da viga composta foram reduzidas em 47,8%, 46,9% e 38,5%, respectivamente, em relação à viga convencional (FAN *et al.*, 2024).

Em avaliações de ciclo de vida, a etapa de produto (A1–A3), sobretudo o módulo A1, tende a concentrar a maior parcela das emissões do UHPFRC. Assim, se o compósito apresentar emissões menores ou similares já nessa etapa, seus benefícios de durabilidade e a menor necessidade de manutenção tendem a ampliar a vantagem ambiental nas fases posteriores, em comparação ao concreto convencional (FAN *et al.*, 2024). Nesse sentido, embora os resultados indiquem potencial de redução de CO<sub>2</sub>, esses ganhos dependem de decisões de projeto mais otimizadas; por isso, torna-se fundamental discutir estratégias de desmaterialização baseadas em processos de otimização.

Diferentemente dos estudos apresentados na seção 2.3, os quais se concentram em vigas armadas de UHPFRC ou em sistemas mistos, o presente trabalho direciona a desmaterialização e a otimização automatizada para vigas protendidas em UHPFRC. Além disso, enquanto alguns desses estudos priorizam a adoção da menor resistência admissível, o problema aqui proposto é formulado com ênfase direta na minimização das emissões de CO<sub>2</sub>, reconhecendo que a solução com a menor capacidade resistente nem sempre resulta no menor impacto ambiental.

Nesse sentido, este projeto avalia a substituição do concreto convencional por UHPFRC em vigas protendidas, visando à redução das emissões de CO<sub>2</sub> por meio da otimização automatizada, baseada em algoritmos genéticos, das dimensões da seção transversal e das áreas de aço, restringindo soluções com resistência mecânica inferior à da viga de referência. Essa viga corresponde ao modelo em concreto convencional ensaiado por Eisa *et al.* (2024) e adotado como base para a calibração e comparação dos resultados. Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento de soluções estruturais mais duráveis e sustentáveis, ao mesmo tempo em que fomenta a inovação na indústria da construção.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é investigar o potencial da utilização do UHPFRC em vigas protendidas como estratégia para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, atendendo-se, no mínimo, à capacidade de carga originalmente imposta.

Entre os objetivos específicos, destacam-se:

- Identificar, por meio de uma revisão bibliográfica, as estratégias mais recentes aplicadas ao UHPFRC, buscando lacunas na literatura;
- Desenvolver e calibrar modelos numéricos por elementos finitos para a simulação do comportamento estrutural de vigas protendidas;
- Aplicar técnicas de otimização estrutural baseadas em algoritmos genéticos visando à minimização das emissões de CO<sub>2</sub>;
- Avaliar e comparar as emissões de CO<sub>2</sub> associadas às vigas convencionais e às soluções otimizadas em UHPFRC, com ênfase na etapa do produto;
- Analisar os efeitos da desmaterialização geométrica sobre o peso próprio das vigas, discutindo suas implicações estruturais e ambientais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO

O concreto de altíssimo desempenho (UHPC) é um tipo avançado de concreto com notáveis propriedades mecânicas e de durabilidade, que se distingue por sua alta densidade de empacotamento, proporcionando resistência à compressão superior a 100 MPa e resistência à tração que ultrapassa 4 MPa, além de ser autoadensável. Destaca-se como uma solução para aplicações estruturais que exigem alto desempenho mecânico e longevidade (KRAVANJA *et al.*, 2024).

A elevada durabilidade do UHPC contribui para uma vida útil prolongada das estruturas, e sua alta densidade de empacotamento oferece proteção contra agentes agressivos, como CO<sub>2</sub>, cloretos e sulfatos, tornando-o uma solução potencial para ambientes com elevada classe de agressividade (WU *et al.*, 2016).

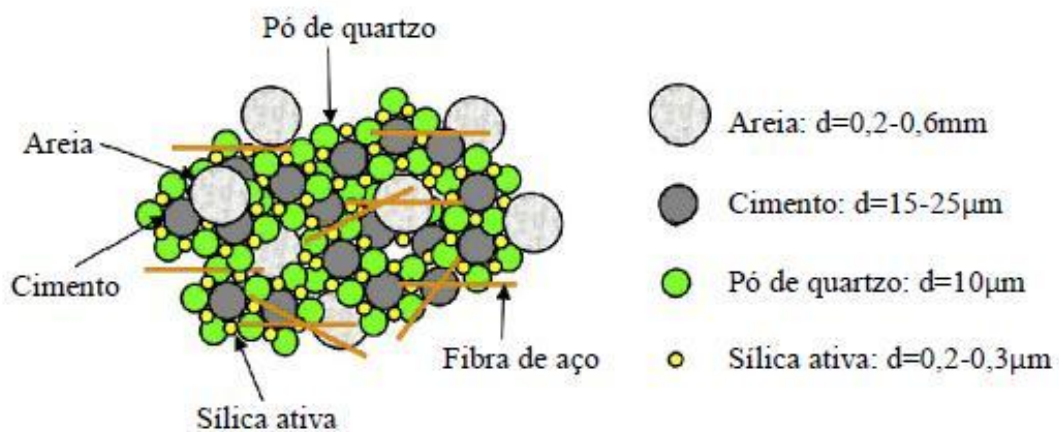
Quando fibras são adicionadas à sua composição, o material é denominado UHPFRC. Essa adição reforça a resistência à formação de fissuras e garante um comportamento mais dúctil (SU *et al.*, 2016).

Entretanto, uma das principais limitações do UHPFRC é o seu custo elevado por metro cúbico, quando comparado ao concreto convencional. Isso ocorre principalmente devido ao maior consumo de cimento e materiais cimentícios suplementares, fibras, uso de agregados de alto desempenho e incorporação de adições e aditivos de última geração (TANAKA *et al.*, 2010). No entanto, estudos sugerem que a análise do custo deve ser feita com base no projeto como um todo, pois o uso do UHPFRC permite uma redução significativa nas seções dos elementos estruturais, resultando em economia de materiais, menor peso da estrutura e, conseqüentemente, menores custos de fundação (TANAKA *et al.*, 2010). A otimização de estruturas com UHPFRC pode impactar positivamente na sustentabilidade da construção civil, visto que, ao reduzir as dimensões dos elementos, também haverá uma redução no consumo de materiais, dentre eles o cimento, um dos principais emissores globais de CO<sub>2</sub>. Além disso, o UHPFRC promove estruturas com ciclos de vida mais longos devido à sua alta durabilidade, contribuindo para a redução de emissões, pois minimiza a necessidade de reformas e manutenções ao longo do tempo (SCHMIDT & JEREBIC, 2008).

O UHPFRC é composto tipicamente por cimento Portland, areia fina, materiais cimentícios suplementares, proporcionando assim, o empacotamento otimizado das

partículas conforme mostra a Figura 1 (SHI *et al.*, 2015). A introdução de materiais cimentícios suplementares e *fillers*, como sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto-forno, metacaulim e pó de calcário, desempenham a função de micropreenchimento e contribuem para o empacotamento das partículas. Isso resulta em uma redução da porosidade, melhorando significativamente a resistência à compressão e a durabilidade do concreto (SCHMIDT & FEHLING, 2005). Seu uso também permite reduzir o teor de cimento, contribuindo para a redução das emissões de carbono, sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, desde que utilizados em proporções adequadas (ZHOU *et al.*, 2021).

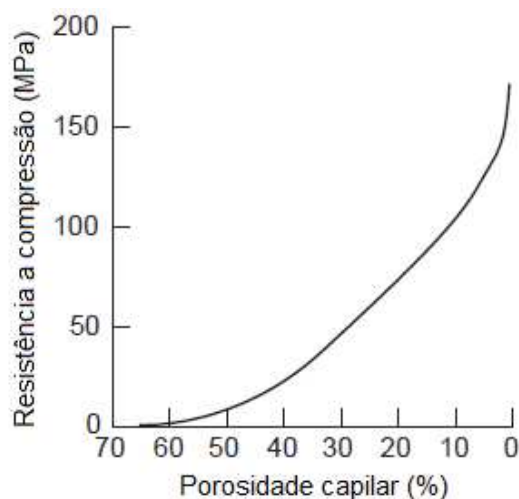
Figura 1 – Empacotamento das partículas do UHPFRC



Fonte: (OLIVEIRA, 2019).

O cimento Portland, como principal aglomerante, desempenha um papel fundamental na composição dos UHPFRC. Contudo, devido à baixa relação água-cimento, que varia entre 0,20 e 0,25, apenas uma fração do cimento é efetivamente hidratada durante o processo de cura (SCHMIDT & FEHLING, 2005). Cerca de 30 a 40% das partículas de cimento permanecem inativas, atuando como *filler*. Essa baixa relação reduz a porosidade aumentando a resistência do compósito, conforme mostra a Figura 2 (ZHOU *et al.*, 2021).

Figura 2 – Relação entre resistência e porosidade



Fonte: (MEHTA & MONTEIRO, 2006), adaptada pelo autor.

Os agregados utilizados no UHPFRC, com o objetivo de maximizar o empacotamento de partículas, são tradicionalmente finos, com tamanhos típicos entre 150  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$  (DU *et al.*, 2021). Entretanto, estudos recentes têm investigado a incorporação de agregados graúdos, avaliando seus efeitos sobre o desempenho do compósito (SHEN *et al.*, 2024).

O uso de superplastificantes, além de manter a trabalhabilidade do UHPFRC, permite a redução significativa da relação água/cimento, promovendo uma mistura mais fluida sem perder a coesão (SCHIESSL *et al.*, 2010). No entanto, é essencial balancear sua dosagem, já que quantidades excessivas podem retardar o tempo de pega e comprometer a resistência nas idades iniciais do concreto (DU *et al.*, 2021).

Fibras de diferentes formatos e tamanhos, fabricadas a partir de materiais como aço, polipropileno, vidro e elementos naturais, têm sido utilizadas em diversas aplicações. Contudo, as fibras de aço são as mais amplamente empregadas em concreto estrutural (BENTUR & MINDESS, 2007). No contexto do UHPFRC, essas fibras de aço aprimoram significativamente as propriedades mecânicas do material, especialmente a resistência à tração e à flexão (KANG & KIM, 2011), além de contribuir de forma expressiva para o aumento da tenacidade, ductilidade e durabilidade do concreto (LI *et al.*, 2020; YOO & BANTHIA, 2016).

A inclusão de fibras de aço curtas, ilustradas na Figura 3, em volumes de até 2%, com diâmetro máximo de 0,20 mm e comprimento entre 9 e 17 mm, tem se mostrado uma escolha adequada. Essas fibras, feitas de aço de alta resistência à tração de

3000 MPa, oferecem excelente desempenho sem comprometer a homogeneidade e a trabalhabilidade da mistura (DIN EN 14889-1, 2006).

As fibras atuam no controle da fissuração, conferindo ao material maior capacidade de suportar e redistribuir esforços, funcionando como pontes de transferência de tensões (FEHLING et al., 2014).

Figura 3 – Fibras de aço (diâmetro 0,2 mm e comprimento 13 mm)



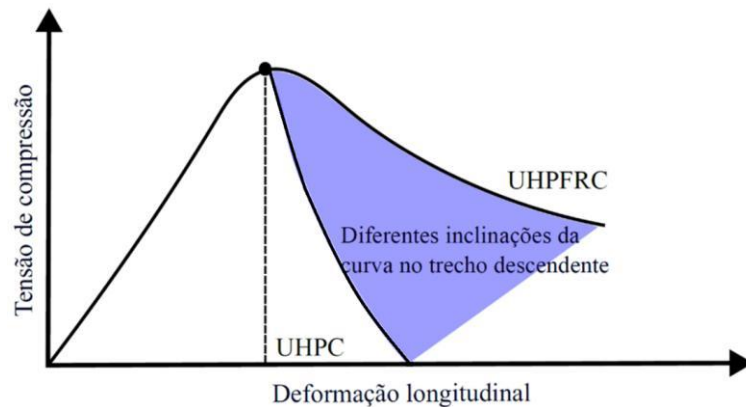
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

### 2.1.1 Comportamento mecânico à compressão

O UHPC sem fibras, quando testado em compressão uniaxial, apresenta um comportamento elástico linear até cerca de 70% a 80% de sua resistência máxima. Nessa fase, o módulo de elasticidade do UHPC varia tipicamente entre 45 e 55 GPa. O comportamento é caracterizado por uma falha frágil e explosiva ao atingir a carga máxima (FEHLING et al., 2014).

A adição de fibras de aço ao compósito (UHPRFC) altera a resposta da curva tensão-deformação, especialmente na fase pós-pico, conforme Figura 4. Embora a fase ascendente da curva permaneça praticamente inalterada, a fase descendente é notavelmente modificada (FEHLING et al., 2014). Com as fibras de aço, o UHPRFC se torna mais dúctil, aumentando a capacidade de deformação após o pico de carga. Isso aumenta a capacidade do material de acomodar maiores deformações antes da falha final (HOANG & FEHLING, 2017).

Figura 4 – Curva tensão-deformação do UHPC e UHPFRC na compressão



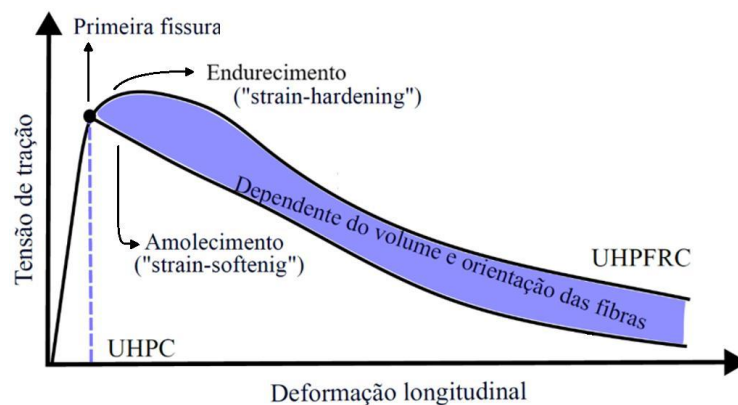
Fonte: (OLIVEIRA, 2019), adaptada pelo autor.

A resposta da fase descendente da curva tensão-deformação é influenciada por diversos fatores, incluindo a quantidade de fibras, a geometria (comprimento e diâmetro) e a orientação das fibras, bem como a aderência entre as fibras e a matriz (MA *et al.*, 2003).

### 2.1.2 Comportamento mecânico à tração

O UHPC sem fibras apresenta um comportamento frágil à tração, dificultando a medição da fase descendente da curva tensão-deformação. Nesse estado, a falha ocorre de forma súbita e sem deformação significativa após a fissuração inicial (FEHLING *et al.*, 2014). A adição de fibras de aço (UHPFRC) proporciona maior resistência à tração e uma capacidade de redistribuir as tensões, resultando em uma curva tensão-deformação dúctil, com a possibilidade de medir a fase descendente, conforme Figura 5 (GRAYBEAL & BABY, 2013).

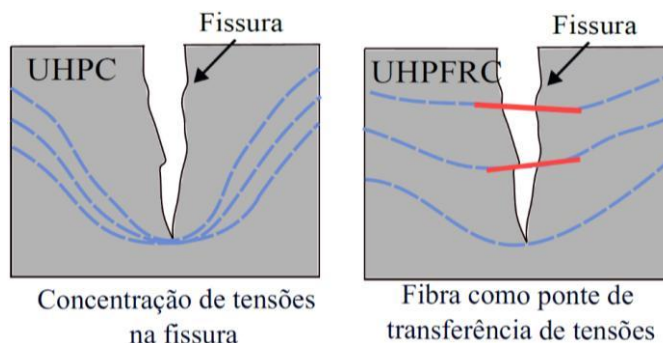
Figura 5 – Curva tensão-deformação do UHPC e UHPFRC na tração



Fonte: (OLIVEIRA, 2019), adaptada pelo autor.

As fibras atuam como pontes de transferência de tensões através das fissuras, sendo intensamente solicitadas após a ocorrência da primeira fissura da matriz, momento em que passam a transferir tensões entre as faces das fissuras, inibindo sua propagação (FEHLING *et al.*, 2014). Esse processo é conhecido como "ponte de tensões", Figura 6, e depende de fatores relacionados às fibras, como sua geometria, quantidade, orientação e a aderência entre elas e a matriz (OLIVEIRA, 2019).

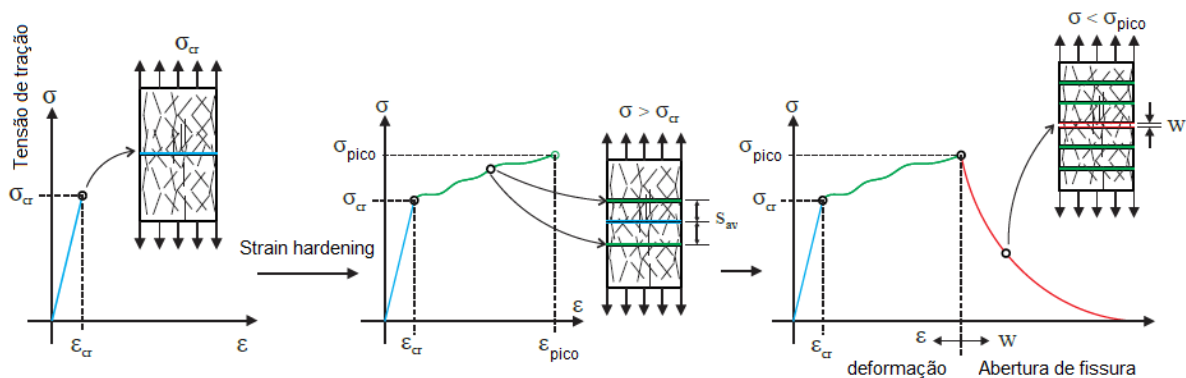
Figura 6 – Pontes de transferência de tensões



Fonte: (OLIVEIRA, 2019), adaptada pelo autor.

O comportamento de endurecimento por deformação (*strain hardening*) no UHPFRC ocorre quando, após a primeira fissura, a redistribuição das tensões promovida pelas fibras leva à formação de múltiplas fissuras menores, aumentando a resistência à tração e a ductilidade do material. Esse fenômeno é caracterizado por um aumento contínuo da tensão até que o valor máximo seja atingido, seguido pela formação de microfissuras, conforme demonstrado na Figura 7. O endurecimento por deformação é favorecido quando a quantidade e a orientação das fibras permitem uma redistribuição das tensões (WILLE & NAAMAN, 2010).

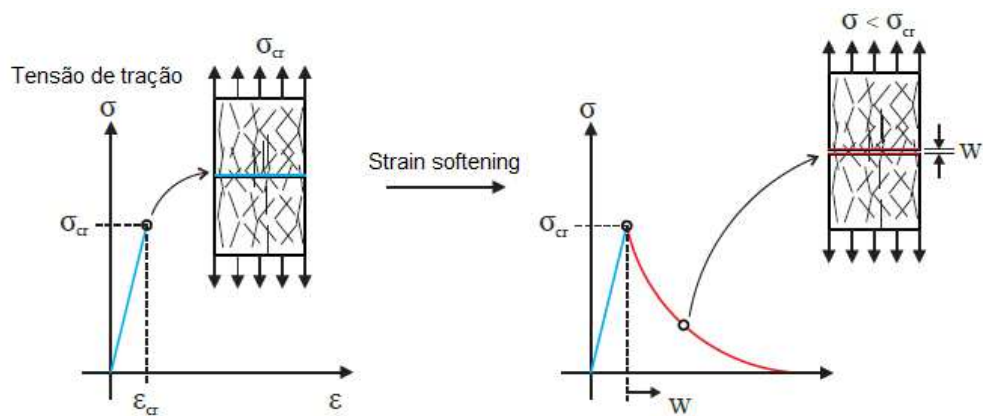
Figura 7 – *Strain hardening*



Fonte: (RIBEIRO, 2023), adaptada pelo autor.

O comportamento de amolecimento por deformação (*strain softening*) ocorre após o pico de resistência à tração, quando as microfissuras se formam e o arrancamento das fibras da matriz tem início. Nesse ponto, a capacidade de transferência de tensões das fibras diminui, e o material começa a exibir uma queda na tensão. É predominante em situações em que a quantidade de fibras ou sua orientação não são suficientes para manter a redistribuição de tensões de forma eficaz, de acordo com a Figura 8. A fase de amolecimento é caracterizada por uma redução na capacidade de resistência à tração, à medida que as fibras perdem a capacidade de atuar como pontes de tensão (WILLE & NAAMAN, 2010).

Figura 8 – *Strain softening*



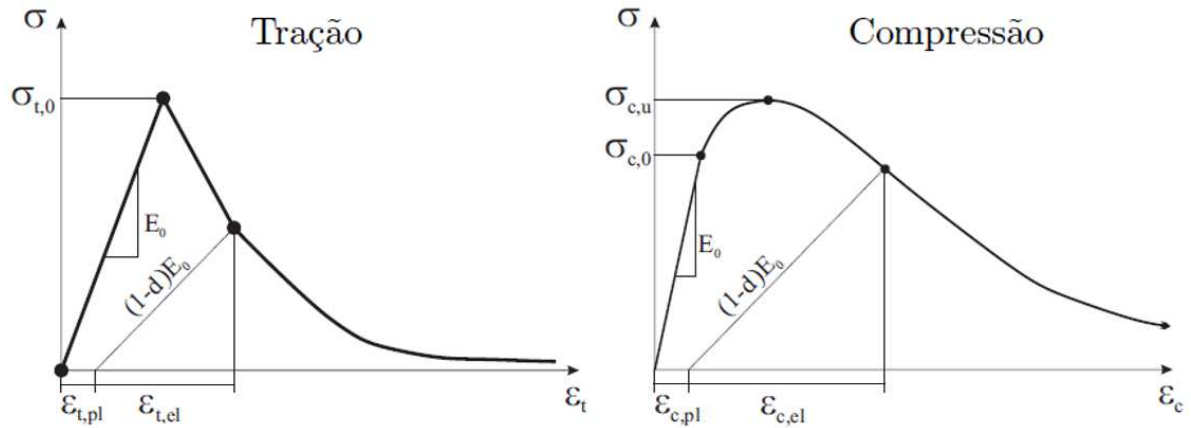
Fonte: (RIBEIRO, 2023), adaptada pelo autor.

## 2.2 CONCRETE DAMAGED PLASTICITY (CDP)

O comportamento não linear do concreto pode ser representado por diferentes modelos matemáticos. Modelos baseados somente na teoria da plasticidade ou apenas na teoria do dano elástico não linear conseguem simular de maneira adequada o trecho descendente da curva tensão-deformação em carregamentos monotônicos. No entanto, quando aplicados a carregamentos cíclicos, esses modelos apresentam limitações em prever com precisão a resposta do material (GIDRÃO, 2020). Uma alternativa para superar essa limitação é o modelo de dano e plasticidade para o concreto (Concrete Damaged Plasticity - CDP), que acopla as teorias da plasticidade e da mecânica do dano, permitindo descrever simultaneamente a deformação plástica irreversível e a degradação da rigidez (RIBEIRO *et al.*, 2019).

O CDP, implementado no *software Abaqus*, baseia-se no critério de falha de Lubliner (1989) e tensões equivalentes representam os estados de tensão. A resposta uniaxial do concreto à tração e compressão são empregadas para definir a evolução da superfície de ruptura ou de plastificação, conforme ilustrado na Figura 9 (CHI *et al.*, 2017).

Figura 9 – Curva tensão-deformação na tração e compressão



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2019), adaptada pelo autor.

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

Por meio da deformação plástica e da variável de dano, a tensão de tração e compressão são obtidas respectivamente pelas Equações (1) e (2).

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl}) \quad (2)$$

A deformação total inelástica é determinada como a diferença entre a deformação total e a parte elástica, conforme a Equação (3).

$$\varepsilon_t^{\sim inel} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (3)$$

No modelo CDP, a entrada de dados é realizada em termos de tensão por deformações inelásticas; o *software Abaqus* converte os valores de deformação inelástica em deformações plásticas por meio da Equação (4):

$$\varepsilon_t^{\sim pl} = \varepsilon_t^{\sim inel} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4)$$

A plasticidade é descrita por duas funções: o potencial plástico e a superfície de plastificação. O potencial plástico é definido por um fluxo não associativo, onde o tensor de deformações plásticas é calculado a partir do potencial plástico  $G$ , utilizando a função hiperbólica de Drucker e Prager (1952), conforme a Equação (5):

$$G = \sqrt{(e \cdot \sigma_{t0} \cdot \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (5)$$

Onde:  $\psi$  é o ângulo de dilatação no plano meridional;  $\sigma_{t0}$  representa a tensão de tração uniaxial;  $e$  é a excentricidade, que indica a quão próxima a função está da assíntota (valor padrão de 0,1);  $\bar{p}$  é a tensão hidrostática;  $\bar{q}$  é a tensão efetiva equivalente de Von Mises.

O modelo adota a função de plastificação proposta por Lubliner *et al.* (1989), posteriormente ajustada por Lee e Fenves (1998), para capturar a evolução da resistência do material sob tração e compressão. Em termos de tensões efetivas, essa função é descrita e apresentada pela Figura 10 e pela Equação (6):

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot (\bar{q} - 3\alpha \cdot \bar{p} + \beta \cdot (\varepsilon^{\sim pl}) \cdot \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \cdot \langle -\bar{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c \cdot (\varepsilon_c^{\sim pl}) = 0 \quad (6)$$

Com:

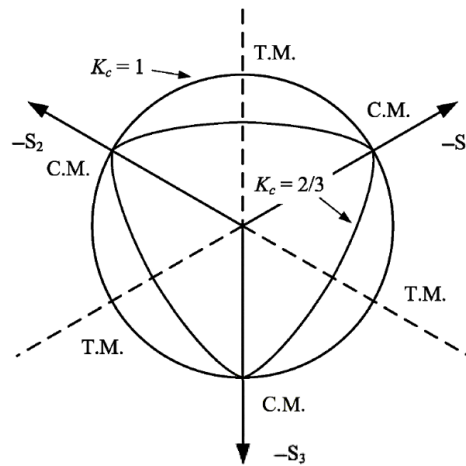
$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2 \cdot (\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1} ; 0 \leq \alpha \leq 0,5 \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c \cdot (\varepsilon_c^{\sim pl})}{\bar{\sigma}_t \cdot (\varepsilon_t^{\sim pl})} \cdot (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{3 \cdot (1 - K_c)}{2 \cdot K_c - 1} \quad (9)$$

Onde,  $\bar{\sigma}_{max}$  é a maior tensão efetiva principal;  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  é a relação entre as tensões iniciais de compressão biaxial e uniaxial;  $K_c$  representa a relação entre o segundo invariante de tensão para os meridianos de tração e compressão;  $\bar{\sigma}_t \cdot (\varepsilon_t^{\sim pl})$  e  $\bar{\sigma}_c \cdot (\varepsilon_c^{\sim pl})$  são as tensões coesivas de tração e compressão efetivas.

Figura 10 – Seção transversal da superfície de plastificação



Fonte: (CHI *et al.*, 2017), adaptada pelo autor.

### 2.2.1 Modelo à compressão

Para descrever o comportamento à compressão do concreto convencional, adotou-se o modelo proposto por Carreira e Chu (1985), o qual representa a relação tensão–deformação em compressão uniaxial por meio de uma curva do tipo serpentina. Os autores estabeleceram uma equação única capaz de descrever, de forma contínua, os ramos ascendente e descendente da curva, impondo que: a derivada no ponto de origem seja igual ao módulo tangente inicial  $E_{ti}$ , a derivada no ponto de tensão máxima seja nula e todos os parâmetros envolvidos possuam significado físico direto, isto é, possam ser obtidos em ensaios usuais de compressão (tensão máxima  $f'_c$ , deformação correspondente  $\varepsilon'_c$  e módulo de elasticidade) (CARREIRA & CHU, 1985).

A relação geral proposta para o concreto é dada pela Equação (10).

$$f_c / f'_c = \beta \cdot (\varepsilon / \varepsilon'_c) / [\beta - 1 + (\varepsilon / \varepsilon'_c)^\beta] \quad (10)$$

Onde:  $f_c$  é a tensão de compressão,  $\varepsilon$  é a deformação correspondente,  $f'_c$  é a tensão máxima,  $\varepsilon'_c$  é a deformação na tensão máxima e  $\beta$  é um parâmetro do material associado à forma do diagrama tensão-deformação. Esse parâmetro é definido em função de propriedades do concreto por meio da Equação (11).

$$\beta = 1 / [1 - f'_c / (\varepsilon'_c \cdot E_{ti})] \quad (11)$$

Com  $\beta \geq 1,0$  e  $\varepsilon \leq \varepsilon_u$ , sendo  $\varepsilon_u$  a deformação última considerada, as Equações (10) e (11) apresentam limites teóricos associados à forma da curva tensão-deformação. Essas equações apresentam os limites matemáticos de um material perfeitamente elástico quando  $\beta \rightarrow \infty$  (ou  $f'_c / \varepsilon'_c = E_{ti}$ ) e de um material perfeitamente plástico quando  $\beta = 1,0$ . As equações, portanto, fornecem uma transição não linear entre esses dois casos extremos, permitindo representar adequadamente o comportamento do concreto convencional em compressão (CARREIRA & CHU, 1985).

Para o comportamento à compressão do UHPFRC, adotou-se o modelo desenvolvido por Chi *et al.* (2017). Assumindo-se uma função polinomial, Equação (12), na qual a relação tensão-deformação compressiva é descrita por coordenadas adimensionais.

$$\begin{cases} y = a_c \cdot x + (3 - 2 \cdot a_c) \cdot x^2 + (a_c - 2)x^3 & ; \quad 0 \leq x \leq 1 \\ y = \frac{x}{b_c \cdot (x - 1)^2 + x} & ; \quad x > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Onde:  $x$  e  $y$  representam a tensão e a deformação normalizadas, ou seja,  $y = \sigma_c^{hf} / \sigma_{c0}^{hf}$  e  $x = \varepsilon_c^{hf} / \varepsilon_{c0}^{hf}$ . O valor máximo da tensão de compressão  $\sigma_{c0}^{hf}$  e sua correspondente de deformação  $\varepsilon_{c0}^{hf}$  são calculadas pelas Equações (13) e (14).

$$\sigma_{c0}^{hf} = \sigma_{c0} \cdot (1 + 0,206 \cdot \lambda_{sf} + 0,388 \cdot \lambda_{pf}) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c0}^{hf} = \varepsilon_{c0} \cdot (1 + 0,705 \cdot \lambda_{sf} + 0,364 \cdot \lambda_{pf}) \quad (14)$$

Os parâmetros  $a_c$  e  $b_c$  são associados a resistência à compressão e são definidos pelas Equações (15) e (16).

$$a_c = 28,228 - 23,277 \cdot \sigma_{c0}^{0,0374} + 0,477 \cdot \lambda_{sf} - 0,492 \cdot \lambda_{pf} \quad (15)$$

$$b_c = 1 + 0,369 \cdot \sigma_{c0}^{-0,285} - 0,101 \cdot \lambda_{sf} - \lambda_{pf} \quad (16)$$

Onde,  $\lambda_{sf}$  e  $\lambda_{pf}$  são os parâmetros característicos das fibras de aço e de polipropileno, respectivamente, definidos por  $\lambda_{sf} = V_{sf}(l_{sf}/d_{sf})$  e  $\lambda_{pf} = V_{pf}(l_{pf}/d_{pf})$ , em que  $V_f$  representa a fração volumétrica da fibra e  $l_f/d_f$  corresponde à razão de aspecto (comprimento/diâmetro) da fibra considerada.

### 2.2.2 Modelo à tração

Para representar o comportamento à tração do concreto convencional adotou-se o modelo de tensão–abertura de fissura proposta por Hordijk (1991), formulada a partir de ensaios de tração em vigas entalhadas. Nessa abordagem, admite-se resposta linear elástica até a resistência última à tração  $f_t$ ; após a formação da primeira fissura, a resposta passa a ser descrita por uma relação contínua entre a tensão de tração  $\sigma_t$  e a abertura de fissura  $w$ , garantindo uma transição suave entre o pico de tensão e o completo descarregamento do material (HORDIJK, 1991). A forma geral da curva de *softening* é dada por uma expressão adimensional em função da abertura normalizada  $w/w_c$ , Equação (17).

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left[ 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \exp \left( -c_2 \cdot \frac{w}{w_c} \right) - \left( \frac{w}{w_c} \right) \cdot (1 + c_1^3) \exp(-c_2), 0 \leq w \leq w_c \quad (17)$$

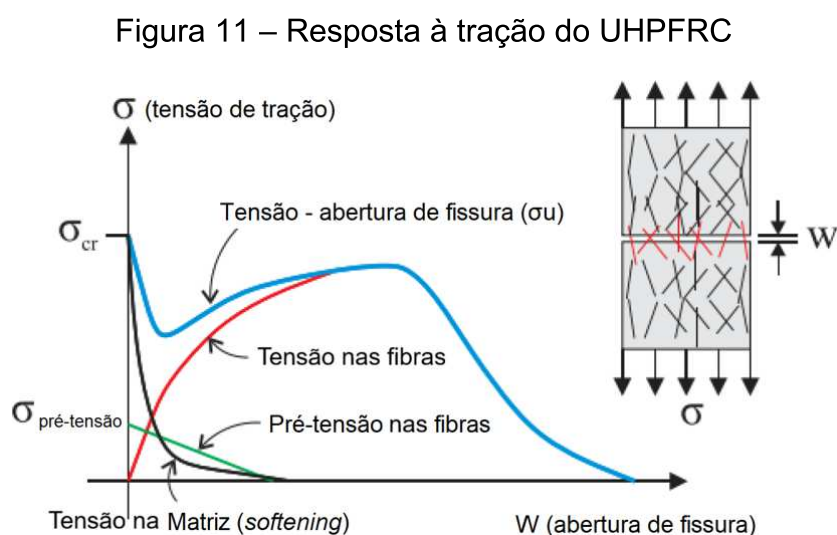
Sendo  $\sigma_t(w) = 0$  para  $w > w_c$ . Nessa equação,  $c_1$  e  $c_2$  são parâmetros de forma adimensionais que controlam a curvatura do diagrama e, com base no ajuste experimental realizado pelo autor, assumem-se tipicamente  $c_1 = 3,0$  e  $c_2 = 6,93$ ;  $w_c$  representa a abertura característica na qual a resistência à tração residual é nula, sendo essa abertura determinada a partir da energia de fratura do concreto  $G_F$  pela Equação (18).

$$w_c = 5,14 \cdot (G_F/f_t) \quad (18)$$

Dessa maneira, a área sob a curva  $\sigma_t(w)$  coincide com  $G_F$ , assegurando uma representação energeticamente consistente do processo de fissuração. Na implementação em modelos de fissuração distribuída, essa relação tensão-abertura é convertida em uma lei tensão–deformação equivalente por meio da hipótese de *crack band*, em que a abertura é escrita como  $w = \varepsilon_{inel} \cdot l_{ch}$ , com  $l_{ch}$  sendo o comprimento característico associado ao elemento finito utilizado (HORDIJK, 1991).

Para o comportamento à tração do UHPFRC, adotou-se o modelo desenvolvido por Ribeiro (2023), no qual a lei tensão–abertura de fissura considera, de forma implícita, o efeito da orientação das fibras, embora o material seja representado como isotrópico. A resposta da tensão de tração em função da abertura de fissura  $\sigma_u(w)$ , apresentada na Equação (19), é obtida como a soma das contribuições da matriz  $\sigma_{mt}(w)$ , da pré-tensão nas fibras  $\sigma_{pre}(w)$ , correspondente à fase pré-fissuração, e da tensão nas fibras  $\sigma_f(w)$ , referente à fase pós-fissuração, conforme ilustrado na Figura 11 (LI *et al.*, 1993).

$$\sigma_u(w) = \sigma_{mt}(w) + \sigma_{pre}(w) + \sigma_f(w) \quad (19)$$



Fonte: (RIBEIRO, 2023), adaptada pelo autor.

Quando ocorre fissuração, a tensão de tração na matriz cai bruscamente, enquanto a tensão nas fibras aumenta devido à formação das pontes. A contribuição da matriz no regime *softening* pode ser expressa pela Equação (20), onde  $G_{Fm}$  é a

energia de fratura da matriz e  $f_{mt}$  é a resistência à tração da matriz (ABRISHAMBAF *et al.*, 2019).

$$\sigma_{mt}/f_{mt} = \exp(-f_{mt} \cdot w/G_{Fm}) \quad (20)$$

A pré-tensão nas fibras é descrita pela Equação (21), onde  $\gamma$  varia entre 0,05 e 0,17 para UHPFRC. Os módulos de elasticidade da matriz  $E_m$  e das fibras de aço  $E_f$  são considerados conforme as propriedades mecânicas dos materiais empregados.

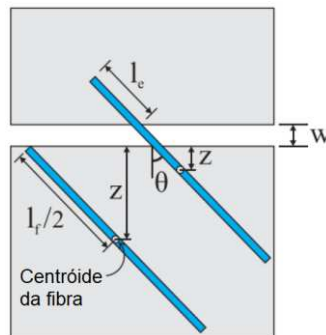
$$\sigma_{pre}/f_{mt} = \gamma \cdot (w_{deb} - w)/w_{deb} \geq 0 \quad (21)$$

A fissura crítica  $w_{deb} = (\tau \cdot l_f^2)/(E_f \cdot d_f)$  que marca o início do estágio de arrancamento das fibras, depende de  $\tau$  que é a resistência da ligação interfacial fibra-matriz,  $l_f$  que é o comprimento das fibras e  $d_f$  que é o diâmetro das fibras.

O modelo de descolamento e arrancamento de fibras considera a contribuição de todas as fibras que atravessam o plano de fissura (LI *et al.*, 1993). A tensão total das fibras pode ser entendida pela Figura 12 e calculada pela Equação (22), onde  $P(w, l_e)$  é a função que descreve a força de arrancamento por uma única fibra perpendicular ao plano da fissura com comprimento de embutimento  $l_e$ . As funções  $p(\theta)$  e  $p(z)$  representam a distribuição da orientação e posição das fibras em relação ao plano de fissura, com  $z$  variando de 0 a  $l_f/2$ . Os limites de integração, entre  $\theta_0$  e  $\theta_1$  correspondem ao intervalo dos ângulos de inclinação das fibras.

$$\sigma_f(w) = \frac{V_f}{A_f} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \int_{z=0}^{(l_f/2) \cdot \cos(\theta)} P(w, l_e) \cdot g(\theta) \cdot p(\theta) \cdot p(z) \cdot dzd\theta \quad (22)$$

Figura 12 – Ângulo de inclinação das fibras



Fonte: (RIBEIRO, 2023), adaptada pelo autor.

Li *et al.* (2020) propuseram as Equações (23) e (24) que descrevem a força de arrancamento. Sendo a primeira aplicada ao estágio de descolamento e a segunda ao estágio de arrancamento após o pico de carga.

$$P(u) = \pi \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot d_f^3 \cdot (1 + \eta) \cdot \xi \cdot \tau \cdot u}{2}} ; u \leq u_0 \quad (23)$$

$$P(u) = \pi \cdot d_f \cdot \xi \cdot \tau \cdot (l_e - (u - u_0)) \cdot \left(1 + \bar{\beta} \cdot \frac{u - u_0}{d_f}\right) ; u > u_0 \quad (24)$$

Os termos dessas equações podem ser obtidos com auxílio das Equações (25), (26), (27) e (28) apresentadas a seguir. O parâmetro  $\bar{\beta}$  está relacionado à interface fibra–matriz e governa o comportamento de atrito durante o arrancamento, influenciando a forma da curva no trecho pós-perda de aderência. Observa-se, ainda, que o aumento do teor volumétrico de fibras tende a melhorar esse comportamento até aproximadamente 2%, a partir do qual a eficiência pode ser reduzida devido à maior interação entre fibras. Como estimativa,  $\bar{\beta}$  pode ser obtido por uma relação empírica em função da fração volumétrica de fibras  $V_f$ . Já o parâmetro  $\xi$  foi introduzido para considerar o efeito de agrupamento das fibras, uma vez que o aumento na quantidade de fibras diminui o espaçamento entre elas. Caso esse efeito fosse ignorado, a resistência seria superestimada, com  $\xi$  variando de 0 a 1 para ajustar a redução da tensão de aderência entre fibra e matriz (RIBEIRO, 2023).

$$\bar{\beta} = -0,0127V_f^2 + 0,0568V_f - 0,1174 \quad (25)$$

$$u_0 = (2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot l_e^2) / [E_f \cdot d_f \cdot (1 + \eta)] \quad (26)$$

$$\eta = (V_f \cdot E_f) / [(1 - V_f) \cdot E_m] \quad (27)$$

$$\tau = P / (\pi \cdot d_f \cdot l_e) \quad (28)$$

Abrishambaf *et al.* (2019) desenvolveram um ensaio de arrancamento para determinar a tensão de aderência média de ligação fibra-matriz  $\tau$ , obtendo o valor de

5,11MPa para um comprimento de embutimento  $l_e = l_f/4$  e ângulo de inclinação de  $0^\circ$ . Os autores utilizaram esses testes para calibrar a função  $g(\theta)$ , descrita na Equação (29), onde  $f$  caracteriza o efeito de *snubbing* e  $k$  descreve o efeito de *spalling* da matriz.

$$g(\theta) = e^{f\theta} \cdot \cos(\theta)^k \quad (29)$$

Fu e Lauke (1998) propuseram a Equação (30) para definir a distribuição da orientação das fibras, onde os parâmetros  $p$  e  $q$  são ajustados com base no ângulo médio  $\theta_{med}$  e no desvio padrão  $\sigma_\theta$ , obtidos experimentalmente.

$$p(\theta) = \frac{(\sin \theta)^{2p-1} \cdot (\cos \theta)^{2q-1}}{\int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{2p-1} \cdot (\cos \theta)^{2q-1} \cdot d\theta} \quad (30)$$

Desconsiderando os termos de ordem superior, obteve-se as Equações (31) e (32) para calcular a tensão de aderência das fibras entre as faces das fissuras (RIBEIRO, 2023).

Para  $\bar{w} \leq \bar{w}^*$ :

$$\sigma_f(\bar{w}) = \frac{V_f \cdot l_f \cdot \xi \cdot \tau}{2 \cdot d_f} \left[ 4 \left( \frac{\bar{w}}{\bar{w}^*} \right)^{\frac{1}{2}} - 2 \left( \frac{\bar{w}}{\bar{w}^*} \right) \right] \int_0^{\pi/2} p(\theta) \cdot g(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \quad (31)$$

Para  $\bar{w} \geq \bar{w}^*$ :

$$\sigma_f(\bar{w}) = \frac{V_f l_f \xi \tau}{2 d_f} \left[ 2(1 - \bar{w})^2 + \frac{\beta L_f}{d_f} (1 - \bar{w})(\bar{w} - \bar{w}^2) \right] \int_0^{\pi/2} p(\theta) g(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (32)$$

Com:

$$\bar{w}^* = \frac{2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot l_f}{E_f \cdot d_f \cdot (1 + \eta)} \quad (33)$$

$$\bar{w} = \frac{w}{l_f/2} \quad (34)$$

Ribeiro (2023) mostrou que  $\theta_{med} = 30^\circ$  proporcionou a maior eficiência das fibras em retardar a propagação de fissuras, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência da inclinação das fibras

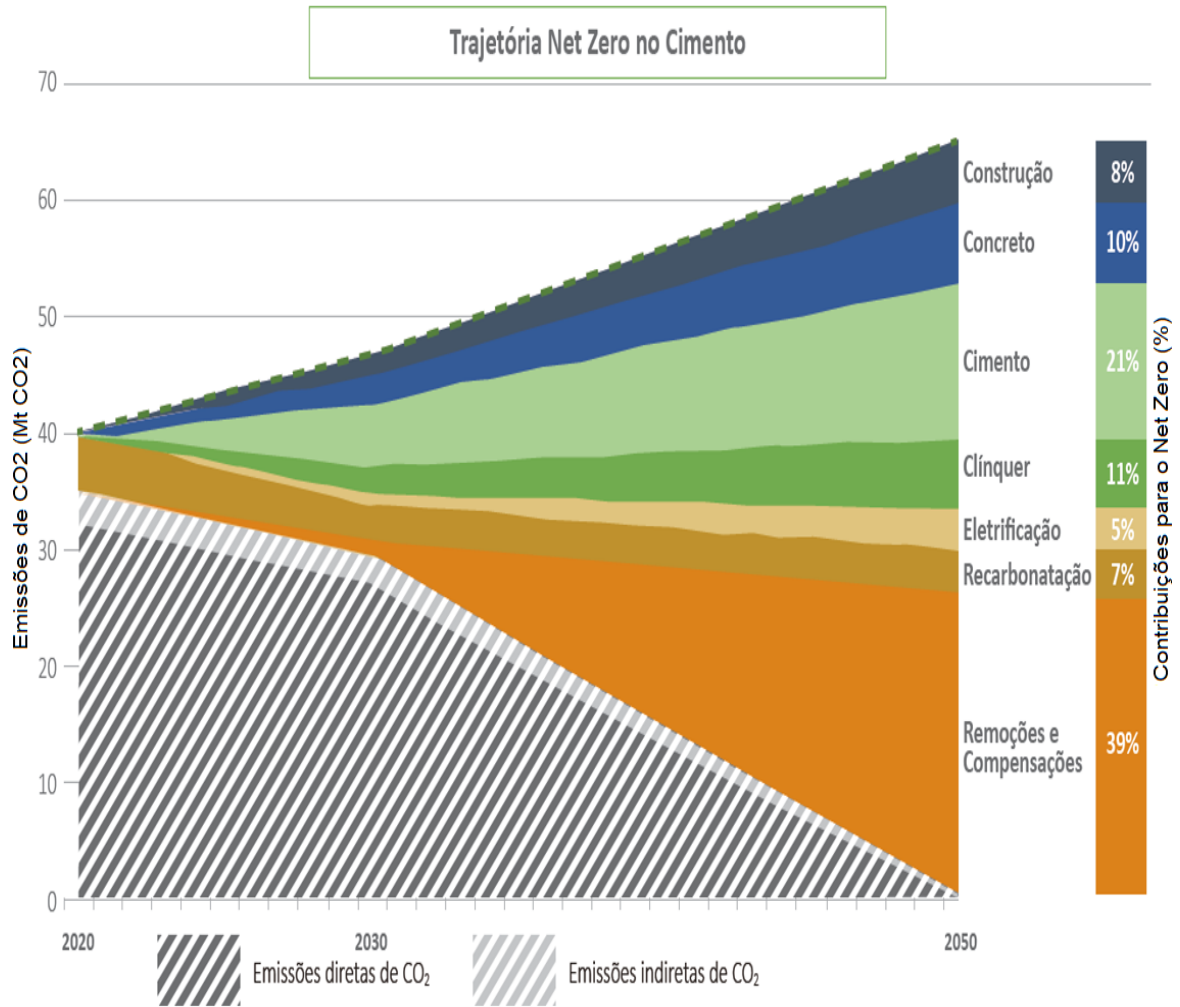
$\eta_\theta$	$\theta_{med}$	$\int p(\theta)g(\theta)\cos(\theta)d\theta$
1	0°	1,00
0,966	15°	1,52
0,866	30°	1,73
0,707	45°	1,38
0,500	60°	0,94
0,259	75°	0,48
0	90°	0

Fonte: (RIBEIRO, 2023).

### 2.3 DESMATERIALIZAÇÃO

A *Roadmap Net Zero – Brasil* (ABCP, 2022) destaca que, no cenário de referência atual, com as condições mantidas, as emissões brutas de CO<sub>2</sub> no setor passariam de 40 milhões de toneladas em 2020 para 65 milhões em 2050, conforme a Figura 13. Diversas medidas podem contribuir para a redução direta ou indireta dessas emissões, organizadas em quatro classes e sete subclasses, como mostrado na Figura 14. Entre essas, destaca-se a classe “desmaterialização”, foco deste trabalho, composta pelas subclasses “construção” e “concreto”, que juntas totalizam uma redução potencial de 18% nas emissões nacionais de CO<sub>2</sub> (ABCP, 2022). Adicionalmente, o estudo também se relaciona às “reduções diretas”, uma vez que a melhoria da eficiência do projeto e do processo construtivo tende a reduzir o consumo de concreto e, por consequência, de cimento. Em âmbito global, o *Roadmap for Buildings and Construction* (GLOBALABC, 2020) projeta uma diminuição de 22% das emissões no setor de eficiência em projeto e construção.

Figura 13 – Previsões da emissão de CO<sub>2</sub> até 2050



Fonte: (ABCP, 2022), adaptada pelo autor.

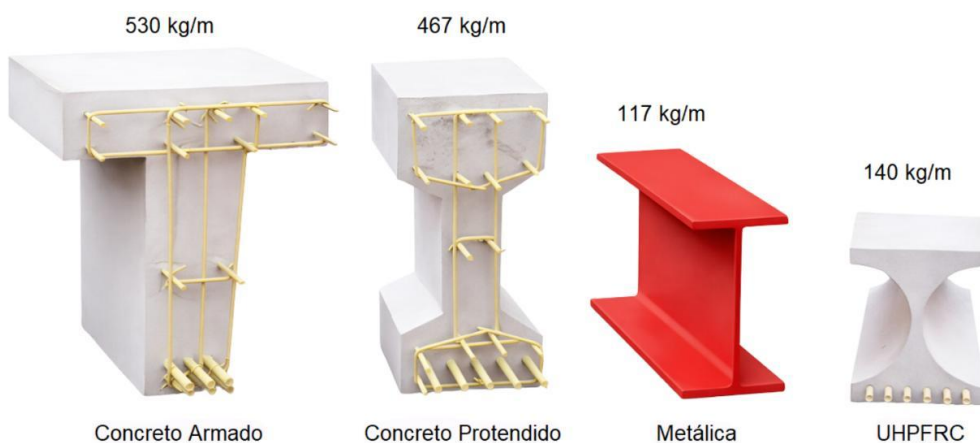
Figura 14 – Classes e subclasse *Roadmap Net Zero - Brasil*

Desmaterialização		Reduções Diretas		Reduções Indiretas		Remoções e Compensações
Construção	Concreto	Cimento	Clínquer	Eletrificação	Recarbonatação	CCUS SbN Metanização
8% Redução de CO <sub>2</sub>	10% Redução de CO <sub>2</sub>	21% Redução de CO <sub>2</sub>	10% Redução de CO <sub>2</sub>	5% Redução de CO <sub>2</sub>	7% Redução de CO <sub>2</sub>	39% Redução de CO <sub>2</sub>
5Mt Redução de CO <sub>2</sub>	7Mt Redução de CO <sub>2</sub>	7Mt Redução de CO <sub>2</sub>	14Mt Redução de CO <sub>2</sub>	3Mt Redução de CO <sub>2</sub>	5Mt Redução de CO <sub>2</sub>	25Mt Redução de CO <sub>2</sub>
45 kgCO <sub>2</sub> /t cim	57 kgCO <sub>2</sub> /t cim	57 kgCO <sub>2</sub> /t cim	119 kgCO <sub>2</sub> /t cim	28 kgCO <sub>2</sub> /t cim	40 kgCO <sub>2</sub> /t cim	220 kgCO <sub>2</sub> /t cim

Fonte: (ABCP, 2022), adaptada pelo autor.

Nesse contexto, o UHPFRC destaca-se como um material promissor e relevante para estudos voltados à desmaterialização e otimização de construções, viabilizando a diminuição do consumo de concreto e, conseqüentemente, de cimento e clínquer, por meio de estratégias voltadas à eficiência sustentável (ABCP, 2022). A desmaterialização consiste na redução das dimensões dos elementos estruturais, mantendo o mesmo desempenho mecânico, porém com menor consumo de material e, conseqüentemente, menores pesos próprios e emissões de CO<sub>2</sub>, podendo ser obtida, entre outras estratégias, pela adoção de diferentes métodos e materiais construtivos, conforme ilustrado na Figura 15 (AL-AMEEN et al., 2024).

Figura 15 – Desmaterialização por diferentes sistemas construtivos



Fonte: (ULM, 2012), adaptada pelo autor.

O empacotamento do UHPFRC também se destaca como um fator importante para o aprimoramento do desempenho técnico-ambiental de estruturas de concreto tradicionais (LI et al., 2020). A baixa porosidade do compósito não só lhe confere alta resistência, mas também oferece uma durabilidade significativamente superior, já que a penetração de agentes agressivos é consideravelmente reduzida (LI et al., 2020).

Com base nos estudos apresentados na seção 1.2, observa-se que, ao considerar o ciclo de vida do UHPFRC, Figura 16, o material pode apresentar vantagens ambientais em relação ao concreto convencional, sobretudo nas etapas de uso e fim de vida. Como a subetapa A1, da etapa Produto, concentra a maior parcela das emissões do UHPFRC, conclui-se que, se suas emissões forem menores ou similares já nessa etapa, o compósito tende a se tornar vantajoso no balanço global. Isso se deve à sua elevada durabilidade que reduz a degradação e a necessidade de manutenções, contribuindo para menores emissões nas fases posteriores.

Figura 16 – Estágios da LCA

Etapas do ciclo de vida	Produto			Construção		Uso							Fim de vida				Benefícios e cargas além das fronteiras
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	
Módulos	Extração Matérias primas	Transporte das matérias primas	Manufatura	Transporte até o canteiro de obras	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Uso de energia operacional	Uso de água operacional	Demolição/Desconstrução	Transporte até a destinação final	Processamento dos resíduos	Disposição final	Reuso/Recuperação/Reciclagem
Berço ao portão	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Berço ao portão com opções	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Berço ao túmulo	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O

M- Mandatório. O - Opcativo.

Fonte: (EN 15804, 2012), adaptada pelo autor.

Nesse contexto, como as emissões do UHPFRC se concentram principalmente no módulo A1, estratégias de desmaterialização e otimização tornam-se especialmente relevantes, pois podem reduzir o consumo de material na etapa de produto sem comprometer o desempenho estrutural, favorecendo o balanço ambiental ao longo do ciclo de vida.

Montaute *et al.* (2024) compararam diferentes abordagens de otimização topológica aplicadas a vigas retangulares de UHPFRC simplesmente apoiadas, submetidas a diferentes carregamentos estáticos e vãos entre 3 e 10 m. Em todos os casos, o objetivo foi minimizar volume e deformações e, após a definição da geometria mais adequada, foi realizada uma análise não linear no *Abaqus* para verificação da capacidade resistente (ELU) e da flecha (ELS). Os resultados mostraram que as vigas otimizadas conseguiram manter a capacidade resistente inicial sem perda de desempenho (MONTAUTE *et al.*, 2024).

Com o objetivo de desenvolver elementos estruturais mais sustentáveis, Feghali *et al.* (2024) propuseram o uso de uma rotina baseada em algoritmos genéticos para otimizar a seção transversal de vigas armadas de UHPFRC, reduzindo o consumo do compósito. As vigas analisadas foram modeladas pelo método dos elementos finitos no *software Abaqus*, empregando uma abordagem que incorporou a variabilidade das propriedades do material, por meio da divisão do volume do elemento em diferentes

regiões com propriedades específicas. Os resultados mostraram que a alteração do formato da seção transversal pode elevar a capacidade de carga, preservando a ductilidade desejada (FEGHALI *et al.*, 2024).

Outro trabalho relevante é o de Moura (2025), que avaliou a otimização de um sistema estrutural misto aço–UHPFRC (perfil I associado a uma laje nervurada), com foco em sustentabilidade. A metodologia combinou modelagem por elementos finitos e algoritmos genéticos, analisando 300 soluções (30 indivíduos ao longo de 10 gerações) para diferentes resistências do UHPFRC (120, 150 e 180 MPa). Os resultados indicaram que a redução da resistência esteve associada à diminuição das emissões, com a solução de 120 MPa alcançando redução global de até 5% nas emissões de CO<sub>2</sub> na fase de produto em relação à estrutura convencional, enquanto resistências maiores apresentaram emissões superiores (MOURA, 2025).

Apesar dos avanços apresentados, observa-se que a literatura ainda se concentra majoritariamente em vigas armadas de UHPFRC ou em sistemas mistos, havendo uma lacuna quanto à aplicação de algoritmos genéticos em rotinas automatizadas de otimização e desmaterialização especificamente para vigas protendidas em UHPFRC, com função objetivo direcionada à redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, torna-se pertinente discutir os fundamentos e a aplicação dos algoritmos genéticos como ferramenta para explorar soluções de projeto mais eficientes, tema introduzido no item a seguir.

## **2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS**

A desmaterialização pode ser ainda mais eficiente por meio da otimização estrutural, que envolve métodos e procedimentos destinados a encontrar a solução ótima (mínima ou máxima) de uma função, denominada função objetivo (MARTÍNEZ, 2009). Entre as técnicas de otimização, destacam-se os algoritmos genéticos, inspirados pela teoria da evolução de Charles Darwin, segundo a qual organismos que apresentam variações vantajosas possuem maior probabilidade de sobrevivência e reprodução ao longo das gerações (DARWIN, 1859).

Os algoritmos genéticos (AGs) foram inicialmente desenvolvidos por John Holland, que buscou compreender e formalizar matematicamente os mecanismos de adaptação presentes em sistemas naturais, propondo uma estrutura geral para sistemas adaptativos naturais e artificiais (HOLLAND, 1992). Nesse contexto, Holland

introduziu conceitos como esquemas (*schemata*), paralelismo implícito e o uso sistemático de operadores genéticos, fornecendo um arcabouço teórico que explica como padrões estruturais promissores podem ser preservados, combinados e explorados ao longo do processo evolutivo computacional (HOLLAND, 1992; MITCHELL, 1996).

A consolidação dos AGs como método robusto de otimização foi impulsionada pelos trabalhos de David Goldberg, que demonstrou sua eficiência em buscas globais estocásticas aplicadas a problemas complexos, não lineares e multimodais (GOLDBERG, 1989). Ao operar com populações de soluções codificadas e utilizar operadores de inspiração biológica, os AGs realizam uma exploração simultânea de diferentes regiões do espaço de busca, reduzindo a dependência de derivadas, continuidade ou convexidade da função objetivo, o que os torna adequados para problemas com superfícies irregulares, descontinuidades e forte presença de ótimos locais (GOLDBERG, 1989; BÄCK, 1996).

Além disso, a literatura posterior ampliou o enquadramento teórico dos AGs dentro do campo dos algoritmos evolutivos. Bäck (1996) enfatiza que os AGs representam uma classe particular de métodos evolutivos caracterizados pela codificação das soluções e pelo uso sistemático de operadores inspirados na genética biológica. De Jong, Fogel e Schwefel (1997) complementam essa visão ao destacar que a força dessas técnicas reside na diversidade populacional, nas estratégias probabilísticas de busca e na capacidade de equilibrar exploração e intensificação ao longo das iterações.

Sob a perspectiva computacional, os AGs operam sobre uma população de possíveis soluções, permitindo a exploração simultânea de múltiplas regiões do espaço de busca, o que reduz o risco de convergência prematura e aumenta a probabilidade de alcançar soluções de qualidade superior (MITCHELL, 1996). A aptidão de cada indivíduo determina sua influência na formação das próximas gerações, conduzindo o processo evolutivo artificial por meio de princípios análogos aos mecanismos de seleção natural (MITCHELL, 1996). Essa estrutura populacional, associada à flexibilidade em lidar com superfícies de busca irregulares, reforça a adequação dos AGs a problemas de engenharia e otimização estrutural, que frequentemente apresentam elevada complexidade e múltiplos ótimos locais (GOLDBERG, 1989; BÄCK, 1996).

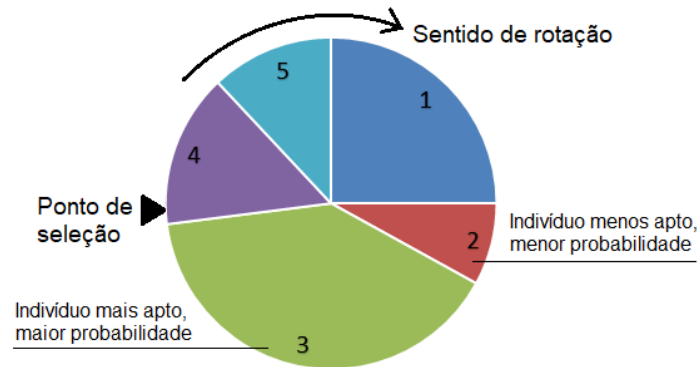
Dessa forma, os algoritmos genéticos constituem uma ferramenta versátil e poderosa para a resolução de problemas de otimização complexos, combinando diversidade, adaptação e mecanismos probabilísticos inspirados na evolução biológica (GOLDBERG, 1989; HOLLAND, 1992). Considerando sua estrutura evolutiva, o funcionamento dos AGs fundamenta-se em etapas essenciais que regem o desenvolvimento das populações, incluindo processos de seleção, cruzamento e mutação, os quais serão abordados nas próximas seções.

#### **2.4.1 Seleção**

A seleção é o mecanismo responsável por direcionar a busca nos algoritmos genéticos, definindo quais indivíduos da população atual terão maior probabilidade de gerar descendentes nas gerações seguintes (GOLDBERG, 1989; MITCHELL, 1996). De modo geral, associa-se a cada indivíduo uma probabilidade de seleção relacionada à sua aptidão, de forma que soluções com melhor desempenho sejam escolhidas com maior frequência, sem excluir indivíduos menos adaptados, o que contribui para a manutenção de diversidade genética na população (GOLDBERG, 1989; BÄCK, 1996). O ajuste da pressão seletiva é fundamental para o desempenho global do algoritmo, pois valores muito baixos tornam a evolução lenta, enquanto valores excessivos podem levar à convergência prematura para ótimos locais e à perda de diversidade (BÄCK, 1996; DE JONG *et al.*, 1997).

No método da roleta, também denominado seleção proporcional à aptidão, a probabilidade de seleção de cada indivíduo é proporcional ao valor de sua função de aptidão em relação ao somatório das aptidões de toda a população (GOLDBERG, 1989). Conceitualmente, imagina-se uma “roda de roleta” dividida em setores, cujo tamanho é proporcional à aptidão relativa de cada indivíduo; assim, indivíduos mais aptos ocupam setores maiores e, conseqüentemente, têm maior chance de serem escolhidos quando a roleta é “girada” repetidamente para formar o conjunto de pais, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 17 (MITCHELL, 1996). Embora simples e intuitivo, esse método pode apresentar problemas quando há grande disparidade entre os valores de aptidão, favorecendo excessivamente poucos indivíduos e reduzindo a diversidade, motivo pelo qual são frequentemente empregadas técnicas de escalonamento ou normalização da aptidão para atenuar esses efeitos (GOLDBERG, 1989; BÄCK, 1996).

Figura 17 – Esquema do método de seleção da roleta



Fonte: (STANKIEWICZ *et al.*, 2011), adaptada pelo autor.

Na seleção por torneio, um subconjunto de indivíduos é escolhido aleatoriamente a partir da população, formando um “torneio” de tamanho pré-definido, e o indivíduo com maior aptidão dentro desse grupo é selecionado para reprodução (GOLDBERG, 1989; MITCHELL, 1996). O número de indivíduos no torneio atua como parâmetro de controle da pressão seletiva: torneios com menor número de indivíduos tendem a preservar maior diversidade populacional, enquanto torneios com maior número de indivíduos aumentam a probabilidade de seleção dos indivíduos mais aptos (BÄCK, 1996). Esse método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade de implementação, à independência em relação à escala numérica da aptidão e à facilidade de paralelização, características particularmente atrativas em aplicações de engenharia que demandam elevado custo computacional para avaliação da função objetivo (BÄCK, 1996; DE JONG *et al.*, 1997).

O método elitista, por sua vez, garante que um ou mais dos melhores indivíduos de uma geração sejam preservados inalterados na geração seguinte, assegurando que a melhor solução encontrada até o momento não seja perdida pelas operações estocásticas de seleção, reprodução e mutação (DE JONG, 1975; MITCHELL, 1996). Em termos práticos, o elitismo é implementado copiando diretamente para a nova população os indivíduos com maior aptidão, antes da aplicação dos demais operadores genéticos, o que tende a acelerar a convergência do algoritmo e a estabilizar o melhor valor da função objetivo ao longo das gerações (GOLDBERG, 1989; MITCHELL, 1996). No entanto, a manutenção de um número excessivo de indivíduos elitistas pode reduzir a diversidade genética e intensificar o risco de convergência prematura, razão pela qual, na prática, costuma-se preservar apenas

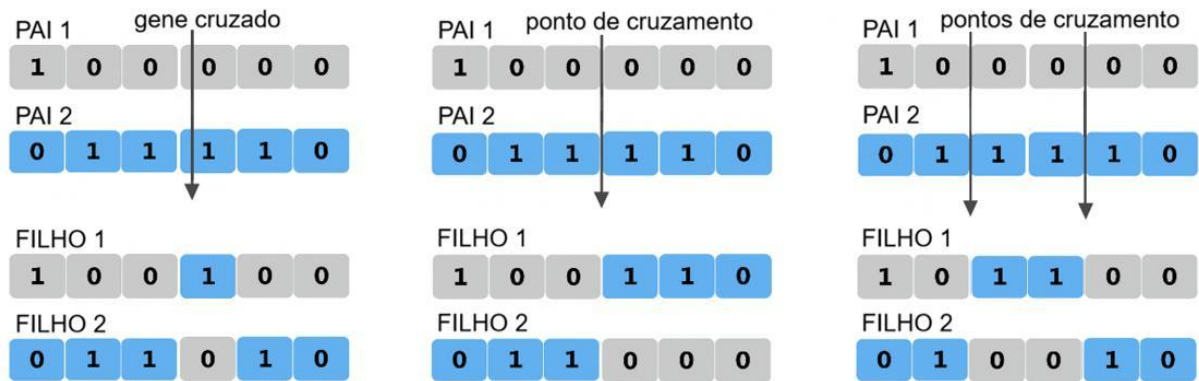
uma pequena fração da população, combinando elitismo com métodos como roleta ou torneio (DE JONG, 1975; GOLDBERG, 1989; MITCHELL, 1996).

#### **2.4.2 Reprodução**

A reprodução, nos algoritmos genéticos, corresponde ao processo de geração de novos indivíduos a partir dos pais selecionados, tendo o cruzamento (*crossover*) como principal operador responsável pela combinação de informações genéticas (GOLDBERG, 1989; HOLLAND, 1992). Por meio do cruzamento, segmentos dos cromossomos de dois progenitores são recombinados para formar descendentes que possam herdar características favoráveis de cada pai, explorando regiões do espaço de busca próximas às soluções já identificadas como promissoras (MITCHELL, 1996; DRÉO *et al.*, 2006). Dessa forma, a reprodução atua como mecanismo de intensificação da busca, aproveitando os padrões estruturais preservados pela seleção e permitindo que novas configurações sejam avaliadas sem recorrer a uma exploração completamente aleatória (GOLDBERG, 1989; DRÉO *et al.*, 2006). A taxa de cruzamento, usualmente mantida em valores elevados, controla a frequência de aplicação desse operador e, portanto, o nível de recombinação de informações ao longo das gerações (MITCHELL, 1996; UMBARKAR & SHETH, 2015).

Existem diversos esquemas de cruzamento, cuja escolha depende da forma de codificação das variáveis e das características do problema em estudo (DRÉO *et al.*, 2006; UMBARKAR & SHETH, 2015). A Figura 18 ilustra, de forma esquemática, três operadores comumente empregados em algoritmos genéticos, apresentados em um exemplo de codificação binária por simplicidade: o cruzamento de gene único, no qual apenas um gene é trocado entre os cromossomos dos pais; o cruzamento de ponto simples, em que um único ponto de corte define a troca de segmentos entre os cromossomos dos pais; e o cruzamento multiponto, no qual dois ou mais pontos de corte permitem uma recombinação mais fragmentada das sequências (KATO *et al.*, 2021; UMBARKAR & SHETH, 2015).

Figura 18 – Esquema de métodos de cruzamento



a) Cruzamento de gene único      b) Cruzamento de ponto simples      c) Cruzamento multiponto

Fonte: (KATO *et al.*, 2021), adaptada pelo autor.

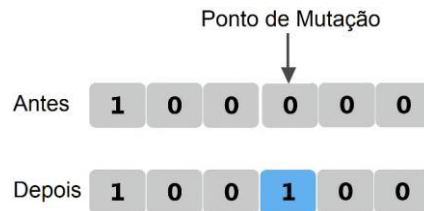
### 2.4.3 Mutação

A mutação é o operador responsável por introduzir novas variações genéticas na população, alterando aleatoriamente um ou mais genes dos indivíduos e evitando que o algoritmo fique restrito a uma região limitada do espaço de busca (HOLLAND, 1992; GOLDBERG, 1989). Em analogia ao processo biológico, pequenas perturbações são introduzidas nos cromossomos, permitindo o surgimento de características inéditas nas gerações seguintes e contribuindo para a manutenção da diversidade populacional (MITCHELL, 1996; BÄCK, 1996). Do ponto de vista da otimização, a mutação desempenha papel fundamental na capacidade do algoritmo de escapar de ótimos locais, sobretudo em superfícies de busca altamente não lineares e multimodais, complementando o efeito exploratório do cruzamento (BÄCK, 1996; DE JONG *et al.*, 1997).

A forma de implementação da mutação depende da representação adotada para os cromossomos (BÄCK, 1996). Em codificações binárias, é comum aplicar a chamada mutação uniforme, na qual um gene é selecionado aleatoriamente e tem seu valor invertido, como ilustrado na Figura 19, em que um alelo “0” é alterado para “1” em uma dada posição do cromossomo (KATO *et al.*, 2021). Em representações reais ou inteiras, um gene escolhido para sofrer mutação pode receber um novo valor, sorteado dentro do conjunto de valores admissíveis para essa variável, mantendo a viabilidade da solução (DRÉO *et al.*, 2006; UMBARKAR & SHETH, 2015). A taxa de mutação deve ser cuidadosamente ajustada: valores demasiadamente baixos podem

não gerar diversidade suficiente, enquanto taxas muito elevadas tendem a descaracterizar a ação do cruzamento e aproximar o processo de uma busca quase aleatória (BÄCK, 1996; MITCHELL, 1996).

Figura 19 – Esquema do método de mutação



Fonte: (KATO *et al.*, 2021), adaptada pelo autor.

#### 2.4.4 Parâmetros

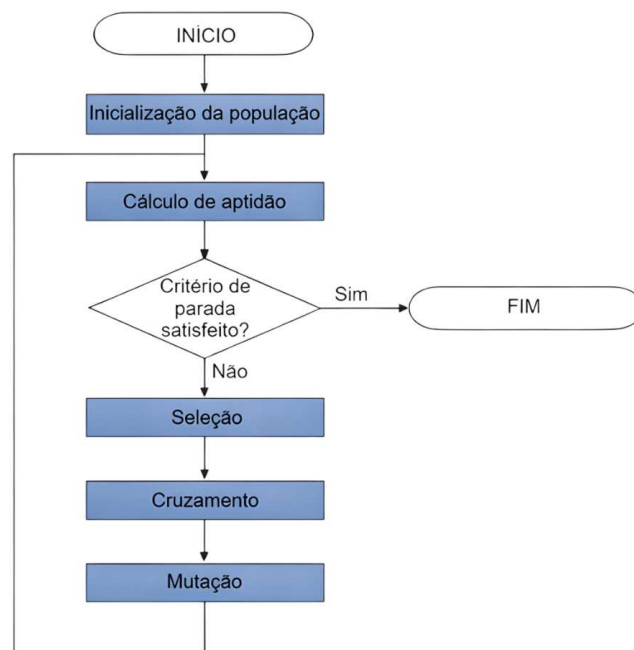
Os algoritmos genéticos dependem de um conjunto de parâmetros que controlam o equilíbrio entre exploração do espaço de busca, qualidade das soluções e custo computacional (GOLDBERG, 1989; MITCHELL, 1996). Entre os parâmetros mais relevantes destacam-se o tamanho da população, o número máximo de gerações e as taxas de reprodução e de mutação (GOLDBERG, 1989; EIBEN & SMITH, 2003). Populações maiores tendem a oferecer amostragem mais ampla do espaço de busca, ao custo de maior tempo de processamento por geração, enquanto populações muito pequenas podem acelerar a execução, mas favorecem a perda de diversidade e a convergência precoce (EIBEN & SMITH, 2003; DRÉO *et al.*, 2006). De forma análoga, valores elevados de reprodução intensificam a recombinação de informações, ao passo que a mutação controla a introdução de novas variações (GOLDBERG, 1989; EIBEN & SMITH, 2003; KATO *et al.*, 2021).

Os critérios de parada definem quando o algoritmo deve encerrar sua execução e, em geral, são classificados em critérios baseados em desempenho e critérios baseados em recursos computacionais (MITCHELL, 1996; EIBEN & SMITH, 2003). Nos critérios baseados em desempenho, o algoritmo é interrompido quando um indivíduo atinge um valor considerado ótimo ou satisfatório, ou quando a população apresenta um padrão de convergência que indica ausência de melhorias relevantes ao longo de um número pré-definido de gerações (GOLDBERG, 1989; DRÉO *et al.*, 2006). Já os critérios baseados em recursos incluem limites máximos para o número de gerações, para a quantidade de avaliações da função objetivo ou para o tempo

total de execução, garantindo que o custo computacional permaneça controlado mesmo que a solução ótima não seja alcançada (EIBEN & SMITH, 2003; KATO *et al.*, 2021). Na prática, é comum combinar pelo menos um critério de desempenho com um critério de recursos, de modo a assegurar simultaneamente qualidade de solução e previsibilidade de esforço computacional (MITCHELL, 1996; EIBEN & SMITH, 2003).

A estrutura de um algoritmo genético pode ser descrita como um ciclo iterativo em que uma população de soluções candidatas é avaliada e modificada sucessivamente por operadores evolutivos até que um critério de parada seja satisfeito (HOLLAND, 1992; GOLDBERG, 1989). Em sua forma canônica, o processo inicia com a geração da população inicial, seguida pelo cálculo da aptidão de cada indivíduo e pela verificação do critério de parada (MITCHELL, 1996; DRÉO *et al.*, 2006). Enquanto esse critério não for atendido, aplicam-se, em cada geração, as etapas de seleção, reprodução e mutação, produzindo uma nova população que substitui a anterior e tende a concentrar indivíduos progressivamente mais adaptados (GOLDBERG, 1989; EIBEN & SMITH, 2003). Esse fluxo de execução está sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 20, em que se destacam as fases de inicialização, avaliação, aplicação dos operadores genéticos e retorno ao cálculo da aptidão, compondo o ciclo evolutivo típico dos algoritmos genéticos (KATO *et al.*, 2021).

Figura 20 – Fluxograma algoritmos genéticos



Fonte: (RIBEIRO, 2019), adaptada pelo autor.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo contempla as seguintes etapas:

- Modelagem em elementos finitos de uma viga protendida em concreto convencional;
- Adoção do UHPFRC com teores de 1% e 2% de fibras na viga protendida;
- Implementação do método de otimização por algoritmos genéticos;
- Comparação das respostas dos modelos numéricos com resultados experimentais;
- Avaliação do consumo de materiais, das emissões de CO<sub>2</sub> e dos pesos próprios.

As dimensões mínimas de cobrimento e de espaçamento entre armaduras para as vigas em UHPFRC foram definidas em conformidade com a norma francesa NF P18-710 (2016). Adicionalmente, a largura da viga foi limitada pelo valor mínimo recomendado para vigas na norma brasileira ABNT NBR 6118:2023. O modelo numérico foi desenvolvido no *software Abaqus* (2024), e os procedimentos de otimização foram implementados em linguagem Python, empregando algoritmos genéticos na otimização do projeto estrutural.

A pesquisa foi conduzida com o objetivo de determinar a solução ótima (combinação entre geometria da seção e áreas de armadura passiva e ativa) que minimizasse as emissões de CO<sub>2</sub>, respeitando as dimensões mínimas exigidas e mantendo, ao mesmo tempo, a capacidade de carga do modelo de referência.

#### 3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL DE REFERÊNCIA

O programa experimental de vigas protendidas apresentado por Eisa *et al.* (2024) foi adotado como referência para a calibração do modelo em elementos finitos. Para isso, considerou-se a viga protendida de referência, em concreto convencional, originalmente ensaiada pelos autores, correspondente ao modelo sem a presença de reforços adicionais.

As propriedades do concreto convencional adotado estão apresentadas na Tabela 2, enquanto as propriedades do aço de armadura passiva e ativa encontram-se, respectivamente, na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2 – Propriedades do concreto convencional

Propriedades	Concreto convencional
Resistência à compressão (MPa)	40,00
Resistência à tração (MPa)	2,54
Módulo de elasticidade (GPa)	31,87

Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

Tabela 3 – Propriedades da armadura passiva

Armaduras passivas	Diâmetro da barra (mm)	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Barras de aço	10	450	211000
Barras de aço	12	440	207000

Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

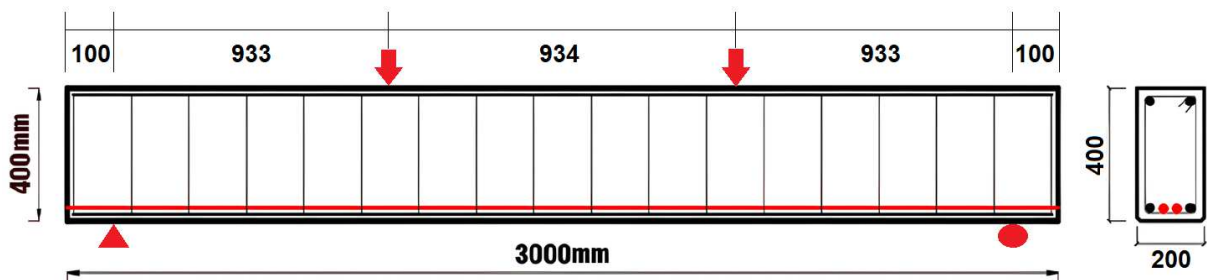
Tabela 4 – Propriedades da armadura ativa

Armaduras ativas	Diâmetro (mm)	Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Fios de protensão	12,5	93,0	1860	200000

Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

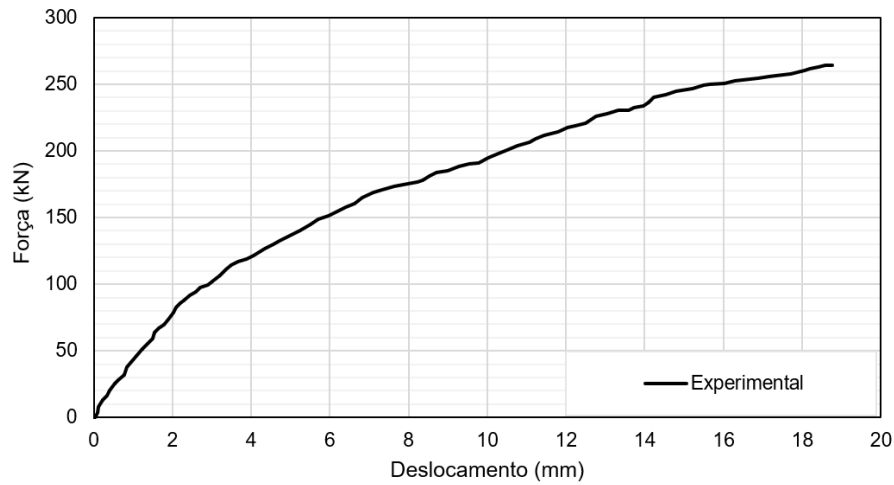
A Figura 21 apresenta a configuração do ensaio experimental, as dimensões da viga protendida de referência e sua respectiva seção transversal. A viga foi projetada em concreto convencional, com armaduras passivas superior e transversal de 10 mm, com estribos espaçados a cada 150 mm. As armaduras passivas inferiores de 12 mm e as armaduras ativas de 12,5 mm foram posicionadas a 50 mm da face inferior da viga. A Figura 22 exibe o comportamento experimental da viga de referência, por meio da curva força–deslocamento obtida nos ensaios.

Figura 21 – Dimensões da viga de referência



Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

Figura 22 – Resultado experimental da viga de referência

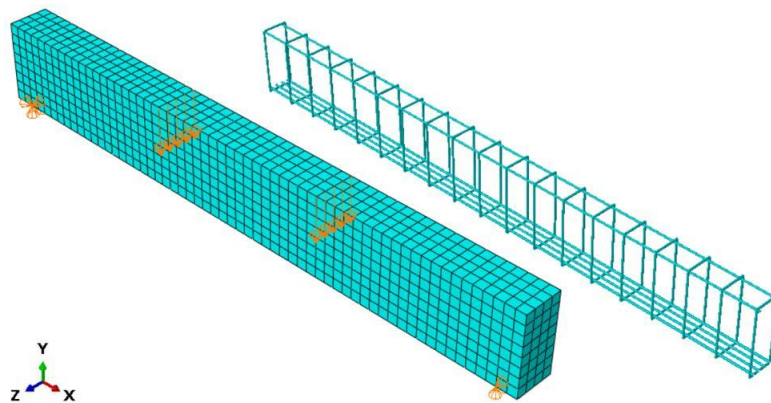


Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

### 3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O modelo em elementos finitos foi desenvolvido no software *Abaqus* (2024) e, para sua calibração, foram elaboradas duas configurações numéricas. A primeira consistiu na modelagem completa da viga de referência, com todas as armaduras passivas e ativas, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Modelagem completa da viga de referência



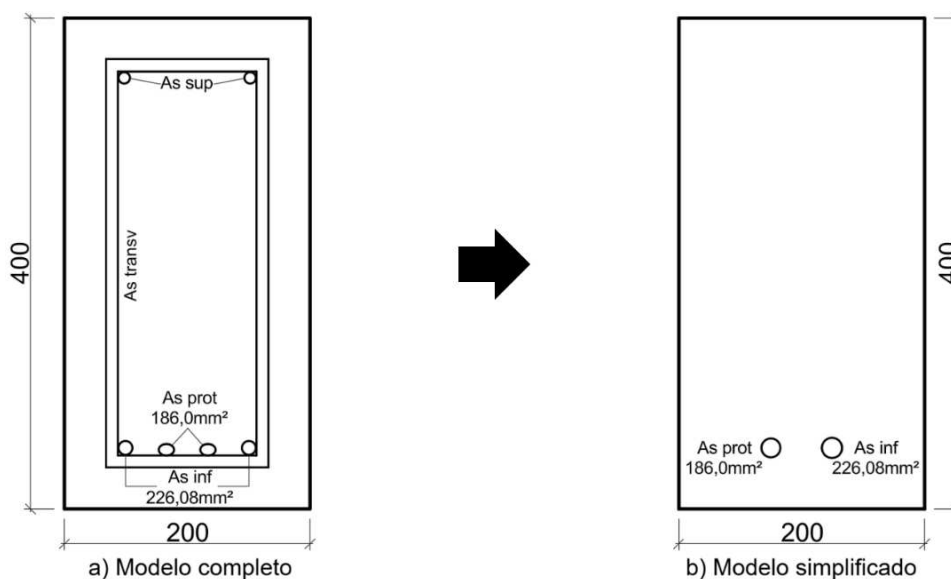
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para essa configuração, foram realizados testes numéricos para representar a matriz cimentícia utilizando os elementos C3D8R (sólidos tridimensionais lineares com oito nós e integração reduzida), C3D8 (sólidos tridimensionais lineares com oito nós), C3D20R (sólidos tridimensionais quadráticos com vinte nós e integração reduzida) e C3D20 (sólidos tridimensionais quadráticos com vinte nós), todos com três graus de

liberdade translacionais em cada nó. Também foram avaliados diferentes tamanhos de malha para a viga completa: 50 mm, 25 mm e 12,5 mm.

A segunda modelagem foi desenvolvida com o objetivo de obter uma versão simplificada da viga de referência, visando facilitar a posterior automatização do algoritmo genético, por meio da redução do número de variáveis e da complexidade associada aos arranjos das armaduras, suprimindo as armaduras superiores ( $A_{S_{sup}}$ ) e transversais ( $A_{S_{transv}}$ ), mas mantendo a capacidade de carga equivalente. Nesse modelo, as armaduras passivas inferiores ( $A_{S_{inf}}$ ) e as armaduras protendidas ( $A_{S_{prot}}$ ) foram substituídas por uma única área de aço equivalente para cada grupo, cuja magnitude corresponde à soma das áreas individuais das barras originais. A Figura 24 apresenta, de forma comparativa, a geometria e o arranjo das armaduras da viga completa e da viga simplificada.

Figura 24 – Modelos completo e simplificado da viga de referência



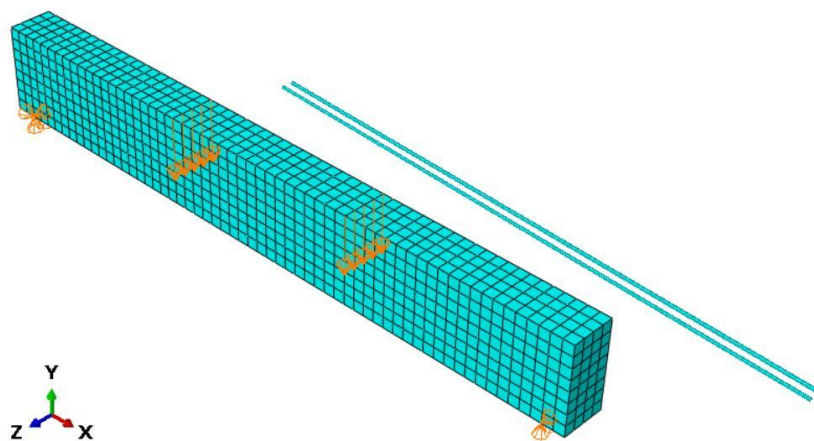
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Na simulação simplificada, Figura 25, a matriz cimentícia foi representada por elementos C3D8R com malha de 50 mm, solução escolhida em função do menor custo computacional e da boa correlação com o ensaio experimental, utilizando-se as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2 e o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) disponível no *Abaqus* (2024). Para o concreto convencional da viga protendida, a definição das curvas tensão–deformação no CDP foi realizada com base no modelo de compressão proposto por Carreira & Chu (1985) e no modelo

de tração formulado por Hordijk (1991). As respectivas curvas de entrada adotadas para compressão e tração encontram-se na Figura 26. Considerando que a análise envolve carregamento monotônico, o comportamento do material foi definido a partir das curvas tensão–deformação em compressão e tração, sem consideração explícita da evolução dos parâmetros de dano.

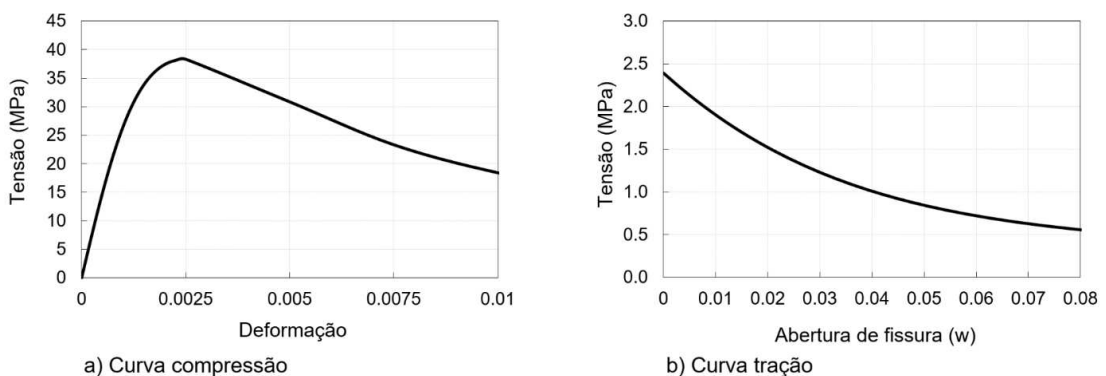
As condições de contorno foram definidas de modo a representar uma viga simplesmente apoiada. No apoio esquerdo, foram restringidos os deslocamentos nas três direções (U1, U2 e U3), enquanto no apoio direito foram restringidos os deslocamentos vertical e transversal (U2 e U3), permanecendo livre o deslocamento longitudinal (U1). O carregamento foi aplicado em dois pontos na região superior da viga por controle de deslocamento vertical (U2), de forma gradual por meio de função *ramp* em análise estática geral.

Figura 25 – Modelagem simplificada da viga de referência



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 26 – Curvas de entrada compressão e tração da viga de referência



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os parâmetros relacionados ao critério de plastificação, ao potencial plástico e à regularização viscoplástica do modelo CDP foram definidos a partir dos estudos de Oliveira (2019) e Krahl *et al.* (2018), conforme resumido na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada do concreto convencional

Parâmetro	Descrição	Convencional
$\psi$	Ângulo de dilatação	37°
$e$	Excentricidade	0,1
$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	Relação entre as tensões de compressão biaxial e uniaxial	1,16
$K_c$	Fator de forma	0,667
$\mu$	Viscosidade	0,0001

Fonte: (OLIVEIRA, 2019; KRAHL *et al.*, 2018), adaptada pelo autor.

No modelo constitutivo das armaduras adotou-se comportamento elastoplástico perfeito, com as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 3 e na Tabela 4. As armaduras passivas e ativas foram discretizadas com elementos T3D2 (elementos de treliça tridimensionais lineares com dois nós), mantendo-se o tamanho de malha de 50 mm empregado no concreto. Nas armaduras ativas, a protensão foi aplicada por meio de *predefined fields*, impondo-se uma tensão inicial de 100 MPa.

### 3.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

#### 3.3.1 Adoção do UHPFRC

Nesta etapa de otimização, parte-se do modelo numérico já calibrado para a viga protendida ensaiada por Eisa *et al.* (2024). Mantém-se a discretização numérica utilizada na calibração, alterando-se apenas o material da matriz cimentícia: o concreto convencional passa a ser substituído pelos UHPFRCs apresentados por Fan *et al.* (2024), visando à desmaterialização da seção transversal.

Foram considerados dois traços de UHPFRC, com 1% e 2% em volume de fibras, cujas resistências à compressão são, respectivamente, 136,8 MPa e 138,0 MPa, conforme Fan *et al.* (2024). A adoção de resistências intermediárias justifica-se pela seção transversal reduzida da viga (200 × 400 mm), uma vez que resistências superiores poderiam apresentar reduções de emissões limitadas, mesmo com viabilidade mecânica, em função de restrições geométricas normativas, como cobrimentos e espaçamentos entre barras, conforme testes prévios apresentados no Apêndice A. Ademais, como resistências mais elevadas tendem a emitir mais CO<sub>2</sub> por

unidade de volume, a adoção de resistências intermediárias favorece reduções mais expressivas das emissões em relação à viga protendida em concreto convencional.

Resultados complementares obtidos em estudo paralelo indicam que UHPFRCs com maiores resistências à compressão podem ser ambientalmente mais vantajosos na otimização de seções estruturais originalmente mais robustas. Em uma viga armada em concreto convencional, com seção inicial de 600 × 750 mm, a substituição por UHPFRC com 2% de fibras e resistência à compressão de 185,8 MPa resultou em redução de aproximadamente 3,1% nas emissões de CO<sub>2</sub> da subetapa A1 do ciclo de vida (CASTRO *et al.*, 2025). Esses resultados sugerem que resistências elevadas são mais indicadas em desmaterialização de seções robustas, enquanto, em seções esbeltas, traços intermediários tendem a apresentar melhor eficiência.

Os parâmetros do CDP associados ao critério de plastificação, ao potencial plástico e à regularização viscoplástica foram definidos com base nos estudos de Oliveira (2019) e Krahl *et al.* (2018), conforme resumido na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do UHPFRC

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>UHPFRC</b>
$\psi$	Ângulo de dilatação	54°
$e$	Excentricidade	0,1
$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	Relação entre as tensões de compressão biaxial e uniaxial	1,07
$K_c$	Fator de forma	0,667
$\mu$	Viscosidade	0,0001

Fonte: (OLIVEIRA, 2019; KRAHL *et al.*, 2018), adaptada pelo autor.

No modelo CDP, a representação da matriz cimentícia foi atualizada, adotando-se o modelo de Chi *et al.* (2017) para o comportamento à compressão e o modelo de Ribeiro (2023) para o comportamento à tração. As propriedades mecânicas e os parâmetros dessas curvas são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8, enquanto as curvas tensão–deformação em compressão e tração constam na Figura 27. A escala do eixo de abertura de fissura foi ajustada para permitir melhor visualização das contribuições individuais da matriz, das fibras e da pré-tensão. Quando se amplia o intervalo de abertura de fissura, observa-se que a curva total apresenta redução gradual após o pico, associada ao processo de arrancamento das fibras.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das vigas otimizadas

Parâmetros	UHPFRC 1%	UHPFRC 2%
Resistência à compressão (MPa)	136,8	138,0
Resistência à tração (MPa)	4,3	6,6
Módulo de elasticidade (GPa)	43,7	44,6

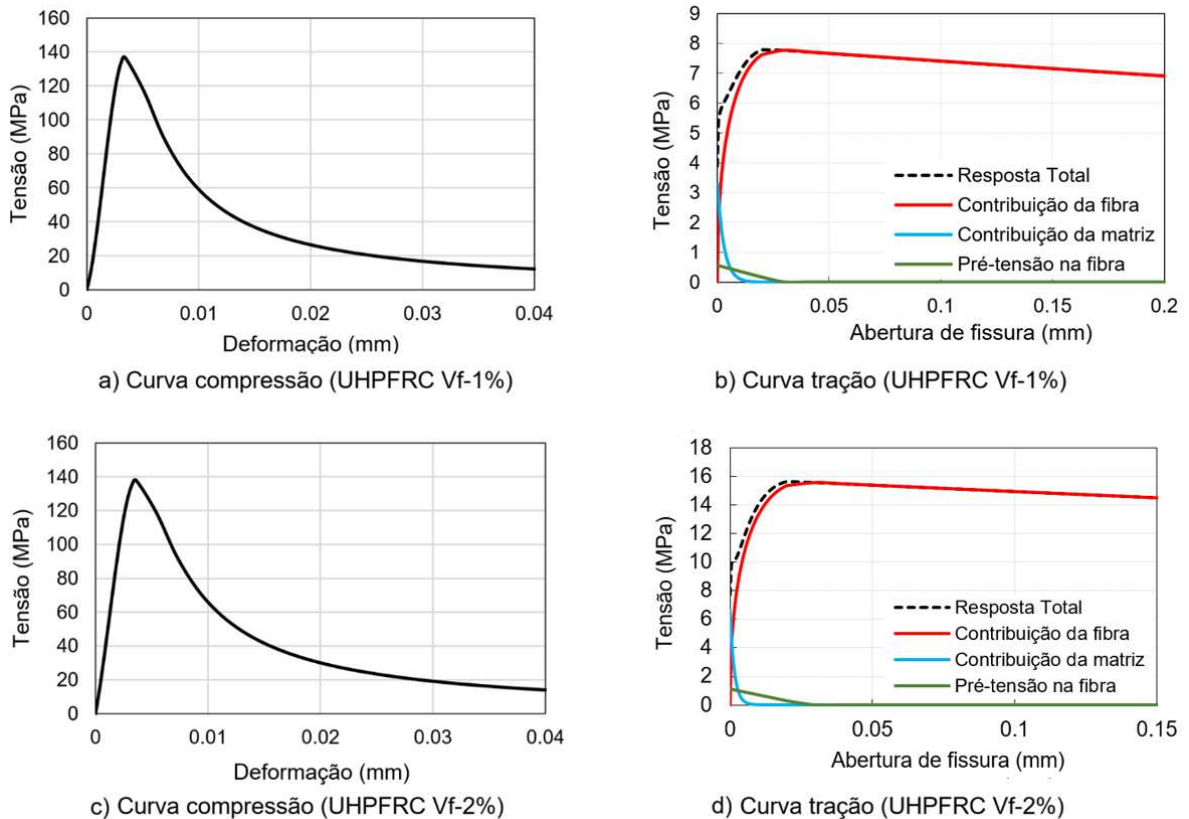
Fonte: (EISA *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

Tabela 8 – Parâmetros das curvas compressão e tração das vigas otimizadas

Parâmetros	UHPFRC 1%	UHPFRC 2%
$E_f$ (GPa)	200	200
$V_f$ (%)	1	2
$\tau$ (MPa)	7	7
$L_f$ (mm)	13	13
$d_f$ (mm)	0,2	0,2
$\eta_\theta$	0,866	0,866
Beta	-0,073	-0,055
$E_m$ (GPa)	42,121	41,428
$f_{mt}$ (MPa)	3,33	4,52

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 27 – Curvas de entrada compressão e tração das vigas otimizadas



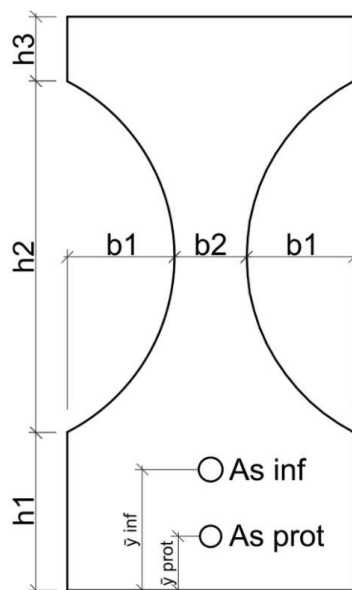
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

### 3.3.2 Etapa de otimização

A etapa de otimização foi conduzida por meio de Algoritmos Genéticos (AGs), implementados em linguagem *Python* e acoplados a um *script* de modelagem em elementos finitos no *software Abaqus* (2024). O procedimento foi aplicado separadamente às vigas simplificadas em UHPFRC com teores de fibras de 1% e 2% em volume, mantendo-se o mesmo conjunto de parâmetros do algoritmo genético para ambas as análises. O objetivo principal consistiu na desmaterialização da seção transversal, buscando-se a configuração geométrica e de armaduras que resultasse na mínima emissão total de  $\text{CO}_2$ , desde que a capacidade resistente da viga permanecesse igual ou superior à da viga de referência em concreto convencional ensaiada experimentalmente.

Cada indivíduo da população representou uma solução candidata, definida por sete variáveis de projeto, conforme ilustrado na Figura 28, que apresenta uma configuração fundamentada em análises preliminares, discutidas posteriormente neste texto. As variáveis de projeto compreendem cinco cotas geométricas ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ ), responsáveis por descrever a largura e a altura da seção transversal, e duas variáveis associadas às áreas de armadura inferior passiva ( $A_{s_{inf}}$ ) e ativa ( $A_{s_{prot}}$ ).

Figura 28 – Definição das variáveis do algoritmo genético



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No caso da armadura passiva inferior ( $A_{S_{inf}}$ ), adotaram-se barras de aço CA-50 com diâmetros de 10,0; 12,5; 16,0 e 20,0 mm, em conformidade com a NBR 7480 (2024). Para a armadura ativa ( $A_{S_{prot}}$ ), consideraram-se cabos CP-190 de sete fios, com diâmetros de 9,5; 12,7; 15,2 e 15,7 mm, conforme a NBR 7483 (2021). As áreas correspondentes a cada diâmetro, utilizadas como base para as combinações no AG, encontram-se apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Diâmetros e áreas de aço adotadas

Armaduras Passivas CA-50 NBR 7480 (2024)		Armaduras Ativas CP-190 NBR 7483 (2021)	
Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
10,0	78,54	9,5	56,20
12,5	122,72	12,7	100,90
16,0	201,06	15,2	143,40
20,0	314,16	15,7	150,10

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para a definição dos limites geométricos, adotaram-se as prescrições normativas vigentes. A NBR 6118 (2023) estabelece que a largura mínima de vigas de concreto armado e protendido não deve ser inferior a 12 cm. Para os cobrimentos mínimos em elementos de UHPFRC, adotou-se a norma francesa NF P 18-710 (2016), que, para elementos da classe estrutural S4 submetidos à classe de exposição XC4, recomenda cobrimentos mínimos de 15 mm para armaduras passivas e 20 mm para armaduras ativas, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Cobrimentos mínimos para o UHPFRC

Norma	NF P 18-710 (2016)
Classe estrutural (estruturas padrão de engenharia civil)	S4
Classe de agressividade (ciclos de umidade e seca)	XC4
Cobrimento mínimo (mm): Armaduras passivas	15
Cobrimento mínimo (mm): Armaduras ativas	20

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A NF P 18-710 (2016), com base no *Eurocode 2*, também define os espaçamentos mínimos entre armaduras ( $S_{min}$ ), os quais dependem do diâmetro da barra ou do cabo ( $\emptyset$ ), do diâmetro máximo do agregado ( $D_{sup}$ ) e do comprimento das fibras ( $L_f$ ). Os espaçamentos horizontais e verticais mínimos entre armaduras passivas e ativas são

apresentados, respectivamente, na Tabela 11 e na Tabela 12, prevalecendo o maior valor quando houver barras de diferentes diâmetros.

Tabela 11 – Espaçamentos horizontais mínimos para o UHPFRC

<b>Armaduras Passivas CA-50</b> Máx ( $\emptyset$ ; $D_{sup} + 5$ ; $1,5xL_f$ ; 20)		<b>Armaduras Ativas CP-190</b> Máx ( $2x\emptyset$ ; $D_{sup} + 5$ ; 20; $1,5xL_f$ )	
Diâmetro (mm)	$S_{mín}$ (mm)	Diâmetro (mm)	$S_{mín}$ (mm)
10,0	20,0	9,5	20,0
12,5	20,0	12,7	25,4
16,0	20,0	15,2	30,4
20,0	20,0	15,7	31,4

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

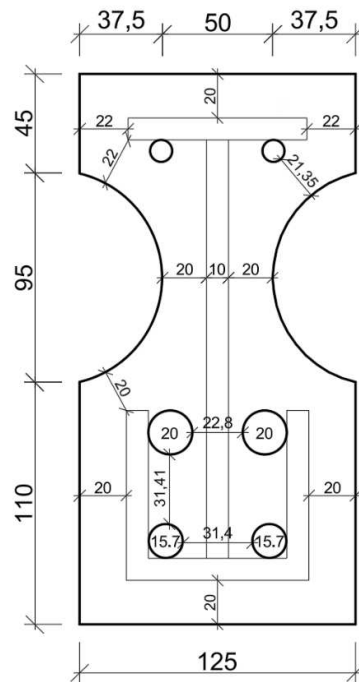
Tabela 12 – Espaçamentos verticais mínimos para o UHPFRC

<b>Armaduras Passivas CA-50</b> Máx ( $\emptyset$ ; $D_{sup} + 5$ ; $1,5xL_f$ ; 20)		<b>Armaduras Ativas CP-190</b> Máx ( $2x\emptyset$ ; $D_{sup}$ ; $1,5xL_f$ )	
Diâmetro (mm)	$S_{mín}$ (mm)	Diâmetro (mm)	$S_{mín}$ (mm)
10,0	20,0	9,5	19,5
12,5	20,0	12,7	25,4
16,0	20,0	15,2	30,4
20,0	20,0	15,7	31,4

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Em testes preliminares, foram avaliadas duas configurações para a disposição das armaduras inferiores: uma com camada única e outra com duas camadas. Verificou-se que a configuração com duas camadas permitiu reduzir a largura da viga para valores próximos ao limite mínimo da NBR 6118 (2023), resultando em menor área de seção transversal e, conseqüentemente, em menor volume de concreto e emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, definiu-se como configuração básica de projeto uma seção mínima com duas camadas de armadura inferior, delimitadas pela armadura transversal, conforme ilustrado na Figura 29, assegurando o atendimento às exigências de cobertura e espaçamento mínimos da NF P 18-710 (2016).

Figura 29 – Delimitação mínima da geometria



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A desmaterialização foi realizada mediante a remoção controlada do concreto na região central da seção para a formação de uma seção em I, estratégia que visa retirar material associado a zonas de menores tensões normais em flexão, reduzindo o consumo de matéria, o peso próprio e as emissões de CO<sub>2</sub>, sem comprometer o momento resistente da viga (BEER *et al.*, 2014; ISMAEL & HAMEED, 2022). Além disso, a adoção de vazios centrais não compromete as regiões de apoio nem as superfícies superiores destinadas à aplicação de cargas, preservando o comportamento estrutural e a funcionalidade da viga (GARCÍA-SEGURA, 2014).

A geometria dos vazios foi definida por meio de arcos de três pontos, cuja forma se ajusta automaticamente em função das variáveis de projeto. No lado esquerdo da seção, o arco foi estabelecido a partir de três coordenadas: ponto inicial (0;  $h_1$ ), ponto intermediário ( $b_1$ ;  $h_1 + h_2/2$ ) e ponto final (0;  $h_1 + h_2$ ). Essa construção foi replicada de forma simétrica para o lado direito da seção, garantindo a simetria geométrica da seção transversal em relação ao eixo vertical.

A partir dessas premissas, definiram-se, na Tabela 13, os intervalos de variação das cotas geométricas ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ ) apresentados na Figura 28. Adicionalmente, impuseram-se as restrições globais das Equações (35) e (36) para limitar a seção otimizada à geometria original de 200 × 400 mm.

$$125 \text{ mm} \leq (2 \cdot b1 + b2) \leq 200 \text{ mm} \quad (35)$$

$$250 \text{ mm} \leq (h1 + h2 + h3) \leq 400 \text{ mm} \quad (36)$$

Tabela 13 – Intervalos das variáveis do algoritmo genético

Variáveis	Intervalos (mínimo e máximo)	
$b1$	0	75
$b2$	50	200
$h1$	110	250
$h2$	95	250
$h3$	45	200
$As_{inf}$	0,00 - 157,08 - 245,44 - 402,12 - 628,32	
$As_{prot}$	112,40 - 201,80 - 286,80 - 300,20	

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para as variáveis das armaduras, consideraram-se combinações de áreas de aço equivalentes a pares de barras ou cabos de cada tipo (passivo e ativo), representando a configuração com duas camadas na região tracionada. Também foi incluída a possibilidade de ausência de armadura passiva inferior, admitindo-se  $As_{inf}=0,00$  em algumas combinações. As posições dos centroides das armaduras ( $\bar{y}_{inf}$  e  $\bar{y}_{prot}$ ) foram calculadas automaticamente a partir dos diâmetros selecionados e dos espaçamentos mínimos horizontais e verticais específicos, garantindo que cada indivíduo gerado atendesse simultaneamente às condições de cobertura e espaçamento estabelecidas pelas normas.

A pré-tensão na armadura ativa foi mantida constante em todas as análises, equivalente à adotada no programa experimental de referência. Essa decisão permitiu uma comparação direta entre as soluções, de modo que os ganhos observados fossem atribuídos exclusivamente à adoção do UHPFRC e à otimização das áreas de concreto e aço, sem alterações nas propriedades mecânicas das armaduras passivas e ativas.

A população inicial do algoritmo genético foi composta por 50 indivíduos gerados aleatoriamente, todos compatíveis com os intervalos de projeto e com as restrições geométricas e normativas descritas. O algoritmo evoluiu ao longo das gerações mantendo-se constante o tamanho da população a cada iteração. Em cada geração,

a função objetivo (FO) dos indivíduos foi avaliada e os resultados foram armazenados, permitindo o monitoramento da evolução do processo e a aplicação do elitismo.

A função objetivo foi definida como a emissão total de CO<sub>2</sub> equivalente do concreto, da armadura passiva e da armadura ativa da viga, conforme a Equação (37). Para cada indivíduo, após a análise não linear no Abaqus, o script extraiu a curva numérica força–deslocamento a partir do arquivo de resultados (.odb), considerando as reações de apoio e o deslocamento no ponto de central da viga. Essa curva foi comparada a uma curva de referência representativa do comportamento experimental da viga original, obtida por meio do ajuste polinomial dos resultados laboratoriais. A comparação foi realizada no intervalo de deslocamentos entre 5 mm e 19 mm, correspondente ao regime plástico. Caso, em qualquer ponto desse intervalo, a curva numérica apresentasse força inferior à curva de referência, o indivíduo era considerado estruturalmente inviável e penalizado por meio da atribuição de um valor elevado à FO. Assim, apenas soluções cuja capacidade resistente fosse igual ou superior à da viga experimental foram consideradas elegíveis para a otimização.

$$\text{mín } f(x) = E_{UHPFRC} + E_{As,inf} + E_{As,prot} \quad (37)$$

Para os indivíduos que satisfizeram ao critério de resistência, calculou-se a área da seção transversal e, em seguida, o volume total de concreto da viga. Os volumes de aço foram obtidos a partir das áreas  $A_{s_{inf}}$  e  $A_{s_{prot}}$  e dos comprimentos correspondentes das barras e cabos. O volume de concreto foi multiplicado pelos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> adotados para os UHPFRCs com 1% e 2% de fibras, enquanto os volumes de aço passivo e ativo foram multiplicados pelos respectivos fatores de emissão (ver item 3.4). A soma dessas parcelas resultou na emissão total de CO<sub>2</sub> da viga, correspondente ao valor da função objetivo a ser minimizado. O detalhamento dos coeficientes de emissão e dos cálculos de CO<sub>2</sub> é apresentado no item seguinte.

Concluída a avaliação da função objetivo, os indivíduos foram ordenados em ordem crescente de emissões e foi calculada uma medida de aptidão relativa, de modo que soluções com menores emissões apresentassem maior probabilidade de seleção. Em seguida, construiu-se a distribuição acumulada dessas probabilidades e aplicou-

se o método de seleção por roleta para a definição dos pares de pais. Em todas as gerações foi empregado elitismo, preservando-se inalterados os três melhores indivíduos encontrados até então, que foram automaticamente copiados para a geração seguinte.

A reprodução foi realizada com taxa de cruzamento de 90%, utilizando codificação em variáveis reais, valor comumente adotado em algoritmos genéticos aplicados a problemas de otimização em engenharia (HOLLAND, 1992; GOLDBERG, 1989). Para cada par de pais selecionados, uma das sete variáveis (genes) foi escolhida aleatoriamente e trocada entre eles, gerando dois descendentes. Após cada cruzamento, as novas combinações foram verificadas quanto ao atendimento dos limites individuais de cada variável ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ ) e das restrições geométricas globais (largura e altura mínimas e máximas) da seção transversal. Caso alguma dessas condições fosse violada, um novo gene era sorteado até que indivíduos admissíveis fossem obtidos. Ressalta-se que essas verificações foram realizadas a cada cruzamento, e não apenas na população inicial.

A mutação foi aplicada com taxa de 10% sobre a população resultante da reprodução, preservando-se os indivíduos elitistas, valor amplamente adotado na literatura para promover diversidade genética sem comprometer a convergência do algoritmo (HOLLAND, 1992; GOLDBERG, 1989). Para cada indivíduo sujeito à mutação, uma das variáveis de projeto foi escolhida aleatoriamente e recebeu um novo valor dentro do respectivo intervalo permitido. As restrições quanto aos limites individuais de cada variável e as restrições geométricas globais foram verificadas e, caso alguma não fosse satisfeita, o processo foi repetido até a obtenção de uma solução viável. Dessa forma, a mutação contribui para ampliar a exploração do espaço de busca sem introduzir configurações incompatíveis com o detalhamento estrutural.

O ciclo composto pelas etapas de avaliação, seleção, reprodução e mutação preserva os melhores indivíduos por meio do elitismo, penaliza os indivíduos cuja curva força–deslocamento esteja abaixo da curva experimental e monitora a evolução do menor valor da função objetivo ao longo das iterações, sendo adotado como critério de parada a ocorrência de, no mínimo, 100 gerações consecutivas sem alteração da função objetivo. As configurações de viga que resultaram nas menores emissões totais de  $\text{CO}_2$ , para os UHPFRCs com 1% e 2% de fibras, são apresentadas e discutidas no item de resultados deste estudo.

### 3.4 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE

Este trabalho concentrou-se nas emissões associadas à etapa do produto do ciclo de vida do concreto, com ênfase na subetapa A1, relativa aos materiais empregados em sua produção. A subetapa A2, relativa ao transporte das matérias-primas, e a subetapa A3, ligada ao processo de fabricação do concreto, foram desconsideradas por representarem parcelas reduzidas, da ordem de 4% e 1%, respectivamente, do valor total da etapa do produto (A1 + A2 + A3), conforme estudos de Moura (2025). Além disso, a contribuição da etapa A2 dependia diretamente das distâncias entre as fontes de suprimento e a central dosadora, o que tornava sua avaliação específica a cada caso, especialmente em função da extensa dimensão territorial brasileira.

Observa-se, na Figura 30, que a etapa A1 do concreto já englobava as etapas A1, A2 e A3 de cada uma das matérias-primas que compõem o seu traço. Não foram consideradas as etapas de uso + manutenção (B) e fim de vida (C). Caso o UHPFRC apresentasse emissões menores ou semelhantes às do concreto convencional já nessa fase inicial, suas propriedades de elevada durabilidade tenderiam a potencializar ainda mais a redução das emissões de CO<sub>2</sub> referentes à operação e manutenção.

Figura 30 – Etapas do ciclo de vida do concreto (produto e construção)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para avaliar o impacto ambiental, foram adotadas três métricas de comparação entre a viga original e a viga otimizada em UHPFRC obtida pela otimização:

- **Consumo de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto:** dado pelo somatório das quantidades unitárias dos materiais multiplicadas pelos respectivos fatores de emissão;
- **Índice de CO<sub>2</sub> incorporado ao concreto (CI):** obtido pela razão entre o consumo de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> e a resistência à compressão do concreto;
- **Consumo bruto do elemento:** correspondente ao consumo total de CO<sub>2</sub> da viga, permitindo comparar diretamente a solução otimizada em UHPFRC com a viga de referência em concreto convencional.

O estudo experimental de referência da viga protendida em concreto convencional, apresentado por Eisa *et al.* (2024), não especificava o traço utilizado, motivo pelo qual foram adotadas as proporções do concreto convencional propostas por Fan *et al.* (2024), uma vez que ambos apresentavam resistências à compressão próximas de 40 MPa. As composições dos UHPFRCs com 1% e 2% em volume de fibras também foram extraídas desses mesmos autores, conforme mencionado anteriormente. As proporções das misturas adotadas são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Proporções dos traços

Material	Convencional (kg/m <sup>3</sup> )	UHPFRC 1% (kg/m <sup>3</sup> )	UHPFRC 2% (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	424	430	430
Cinzas volante	0	215	215
Escória alto-forno	0	215	215
Sílica fume	0	215	215
Brita	758	0	0
Areia	854	0	0
Areia de sílica	0	859	859
Pó de vidro	0	215	215
Água	228	197	197
Superplastificante	0	57	57
Fibras de aço	0	79	157
Massa específica total	2264	2482	2560

Fonte: (FAN *et al.*, 2024), adaptada pelo autor.

Segundo a *Institution of Structural Engineers* (2025), para obter estimativas mais fiéis das emissões de carbono é preferível utilizar fatores de emissão específicos de fabricantes ou bases de dados do próprio país ou região em que a estrutura será

executada. Na ausência desses dados locais, admite-se o uso de fatores internacionais como alternativa.

Para este estudo, priorizou-se o uso de fontes nacionais do SIDAC (Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção) e de EPDs (*Environmental Product Declarations*) na adoção dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub>. Na ausência desses dados, recorreu-se a valores de EPDs internacionais.

Os coeficientes de emissão adotados são apresentados na Tabela 15, juntamente com suas respectivas referências, englobando as etapas A1 + A2 + A3 dos materiais considerados. Para os valores fornecidos pelo SIDAC, utilizaram-se os coeficientes médios disponibilizados pelo sistema.

Tabela 15 – Coeficientes de emissão de CO<sub>2</sub>

<b>Material</b>	<b>Fator de emissão (kgCO<sub>2</sub>/unid.)</b>	<b>Referência</b>
Cimento (CP-V)	0,88535	Média Sidac
Cinzas volante	0,00	Média Sidac
Escória alto-forno	0,06574	Média Sidac
Sílica fume	0,052	EPD Ferroglobe
Brita	0,0023345	Média Sidac
Areia	0,006255	Média Sidac
Areia de sílica	0,0232	EPD Jundu
Pó de vidro	0,11	EPD Verglass
Água	0,0000469	SNIS + Sidac
Superplastificante	0,672	EPD Sika Ultra 500
Fibras de aço	1,53	EPD Metalproducts
Aço passivo (CA-50)	0,74345	Média Sidac
Aço ativo (CP-190)	1,471	EPD Insteel

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No caso da água, o SIDAC fornecia um coeficiente de emissão igual a zero, motivo pelo qual se optou por estimar esse valor para verificar se sua contribuição seria realmente desprezível. Para isso, utilizou-se o consumo médio de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água informado pelo SNIS (2022), de 0,67 kWh/m<sup>3</sup>, convertido para kWh/kg considerando densidade de 1000 kg/m<sup>3</sup>, e multiplicado pelo fator médio de emissão da eletricidade da rede brasileira disponibilizado pelo próprio SIDAC (0,07 kgCO<sub>2</sub>/kWh). Dessa forma, obteve-se o coeficiente de 0,0000469 kgCO<sub>2</sub>/kg de água adotado na Tabela 15, o que reforçou a proximidade com o valor originalmente indicado pelo SIDAC.

Para o cálculo das massas dos materiais, foram adotadas as massas específicas correspondentes a cada traço de concreto, obtidas a partir da soma das dosagens de seus constituintes por metro cúbico. Assim, consideraram-se as massas específicas reais de 2264 kg/m<sup>3</sup> para o concreto convencional, 2482 kg/m<sup>3</sup> para o UHPFRC com Vf-1% e 2560 kg/m<sup>3</sup> para o UHPFRC com Vf-2%, conforme indicado na dosagem dos materiais. As massas das armaduras passivas e ativas foram calculadas separadamente, adotando-se a massa específica do aço igual a 7850 kg/m<sup>3</sup>, conforme recomendação da NBR 6118 (2023).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, incluindo aqueles provenientes da modelagem numérica por elementos finitos e da otimização por algoritmos genéticos, bem como a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e a comparação das massas dos elementos estruturais analisados.

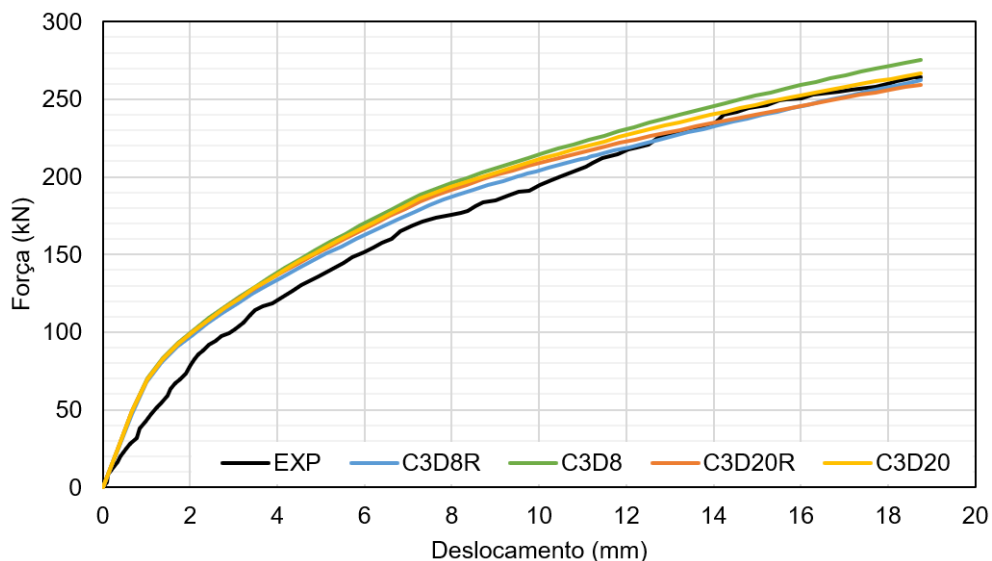
### 4.1 MODELOS NUMÉRICOS

#### 4.1.1 Modelo completo

Inicialmente, são apresentados os resultados dos testes numéricos, analisados no mesmo intervalo de deslocamentos do estudo experimental, adotado como referência para a calibração, com o objetivo de avaliar a influência do tipo de elemento finito e do tamanho de malha na resposta estrutural do modelo completo da viga.

A Figura 31 apresenta o comparativo entre os tipos de elementos finitos avaliados, evidenciando que os elementos C3D8R, C3D20 e C3D20R foram os que melhor reproduziram o comportamento experimental da viga. Esse desempenho esteve associado ao uso de integração reduzida, que mitigou o travamento numérico por rigidez em problemas dominados por flexão. O elemento C3D20R, embora satisfatório, apresentou custo computacional significativamente maior devido à maior ordem de interpolação e ao aumento do número de nós e de pontos de integração, o que limitou sua eficiência.

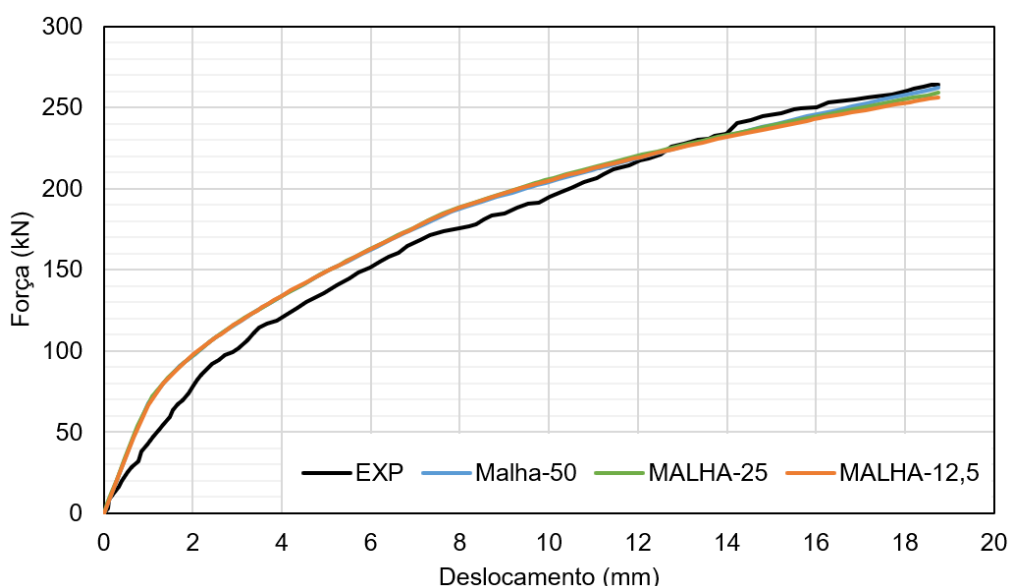
Figura 31 – Comparativo entre tipos de elementos finitos



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Também foram avaliados diferentes tamanhos de malha para a viga completa, iguais a 50 mm, 25 mm e 12,5 mm, conforme apresentado na Figura 32. Observou-se que as respostas numéricas foram semelhantes entre as três discretizações, não sendo identificadas diferenças significativas no comportamento global da viga. As malhas mais refinadas (25 mm e 12,5 mm), contudo, acarretaram aumento expressivo do custo computacional, em função do maior número de elementos e graus de liberdade, o que reduziu sua eficiência. Dessa forma, a malha de 50 mm mostrou-se suficiente para a adequada representação do comportamento global do elemento estrutural e do processo de fissuração, em concordância com Krahl *et al.* (2018).

Figura 32 – Comparativo entre tamanhos de malha



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 33 apresenta o padrão de fissuração observado experimentalmente na viga de referência, no qual se verifica a formação e propagação de fissuras predominantemente verticais na região tracionada inferior, concentradas nos trechos correspondentes ao primeiro e ao segundo terços do vão, característica típica de elementos solicitados à flexão (NAAMAN, 2012). Observam-se também indícios de esmagamento do concreto na região comprimida superior, associados à intensificação das tensões. Considerando que a pré-compressão retarda a fissuração à tração e concentra as solicitações nessa região, explora-se de forma mais eficiente a elevada resistência à compressão do UHPFRC. De forma coerente, a Figura 34 apresenta a resposta numérica do modelo em elementos finitos, avaliada no pico da força

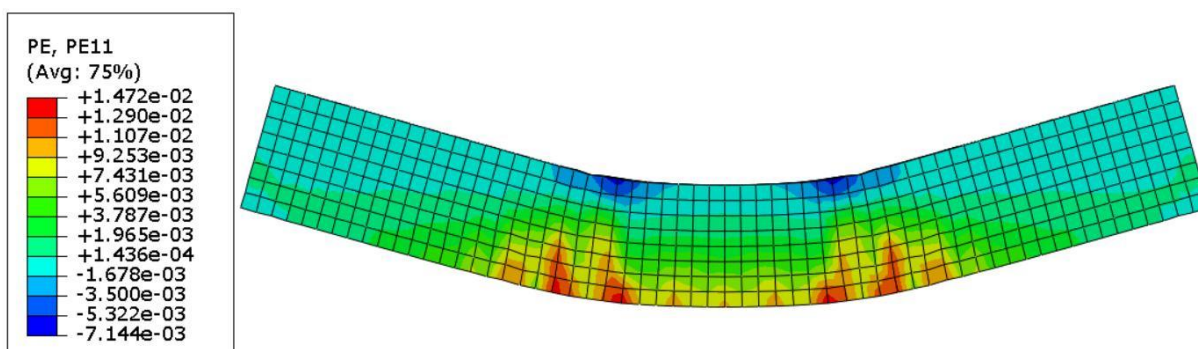
resistente, correspondente a um deslocamento de 18,76 mm, na qual a distribuição das deformações plásticas longitudinais no concreto (PE11) evidencia concentrações na zona tracionada inferior ao longo dos mesmos trechos do vão, bem como regiões de compressão elevadas na parte superior próximas aos carregamentos. A concordância qualitativa entre os padrões experimental e numérico, tanto quanto à localização das fissuras e às regiões de esmagamento, confirma que o modelo numérico foi capaz de reproduzir adequadamente o mecanismo de falha por flexão observado no ensaio.

Figura 33 – Modo de falha experimental



Fonte: (EISA *et al.*, 2024).

Figura 34 – Deformações plásticas viga de referência

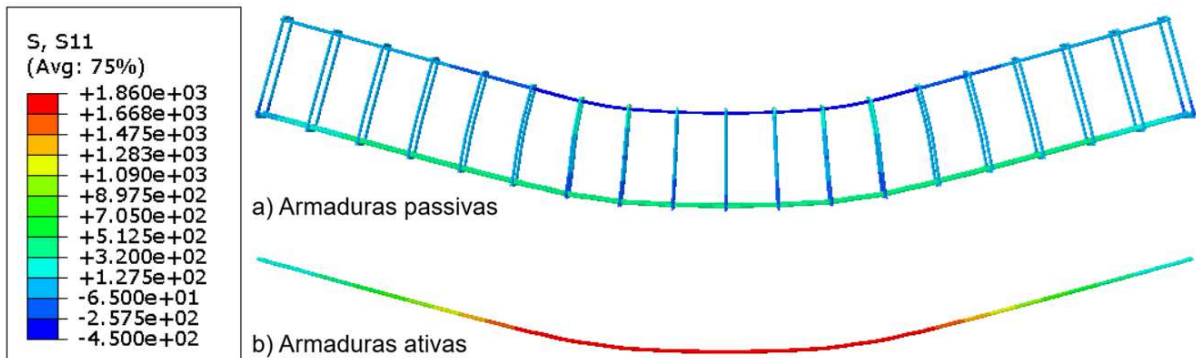


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Adicionalmente, foram analisadas as tensões longitudinais nas armaduras passivas e ativas por meio do componente de tensão normal (S11), que representa a tensão ao longo do eixo principal das barras de aço. A Figura 35 evidencia maiores valores de tensão na região central da viga, compatíveis com a máxima solicitação à flexão. Observa-se que as armaduras ativas atingem níveis de tensão significativamente superiores aos das armaduras passivas, em razão da pré-tensão e da elevada resistência mecânica do aço protendido, cujo limite de escoamento é substancialmente maior. As armaduras passivas, por sua vez, permanecem em faixas inferiores de tensão dentro da escala global adotada, apresentando maiores

solicitações no terço central do vão, em consonância com o mecanismo resistente típico de vigas submetidas à flexão.

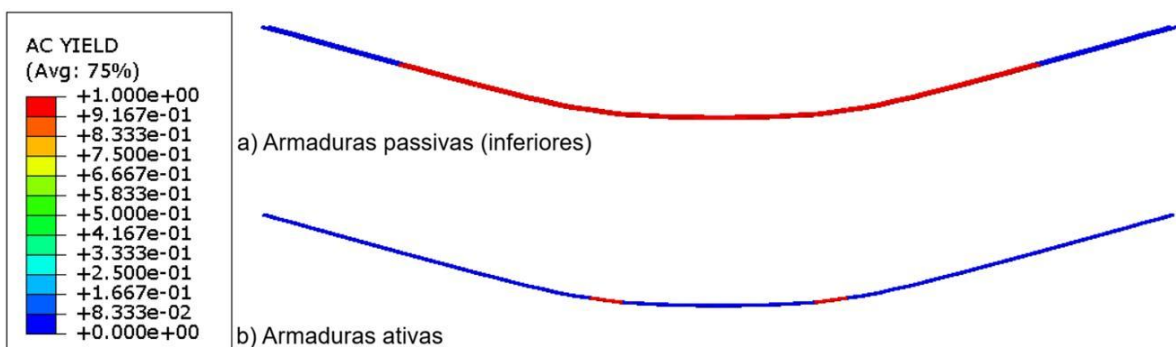
Figura 35 – Tensões nas armaduras viga de referência



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O escoamento das armaduras foi avaliado por meio do indicador de plastificação do aço (*Active Yield Flag* – ACYIELD), apresentado na Figura 36, correspondente ao estado de pico da força resistente. Nesse indicador, valores de ACYIELD iguais a 1 indicam que o material atingiu o regime plástico, caracterizando o escoamento do aço. No instante da falha, observa-se que as armaduras passivas inferiores apresentam regiões com ACYIELD igual a 1 ao longo do trecho central do vão, indicando a ocorrência de escoamento. As armaduras ativas apresentam plastificação localizada neste mesmo estado analisado. Comportamentos compatíveis com o mecanismo de falha por flexão em vigas protendidas (NAAMAN, 2012).

Figura 36 – Escoamento das armaduras viga de referência

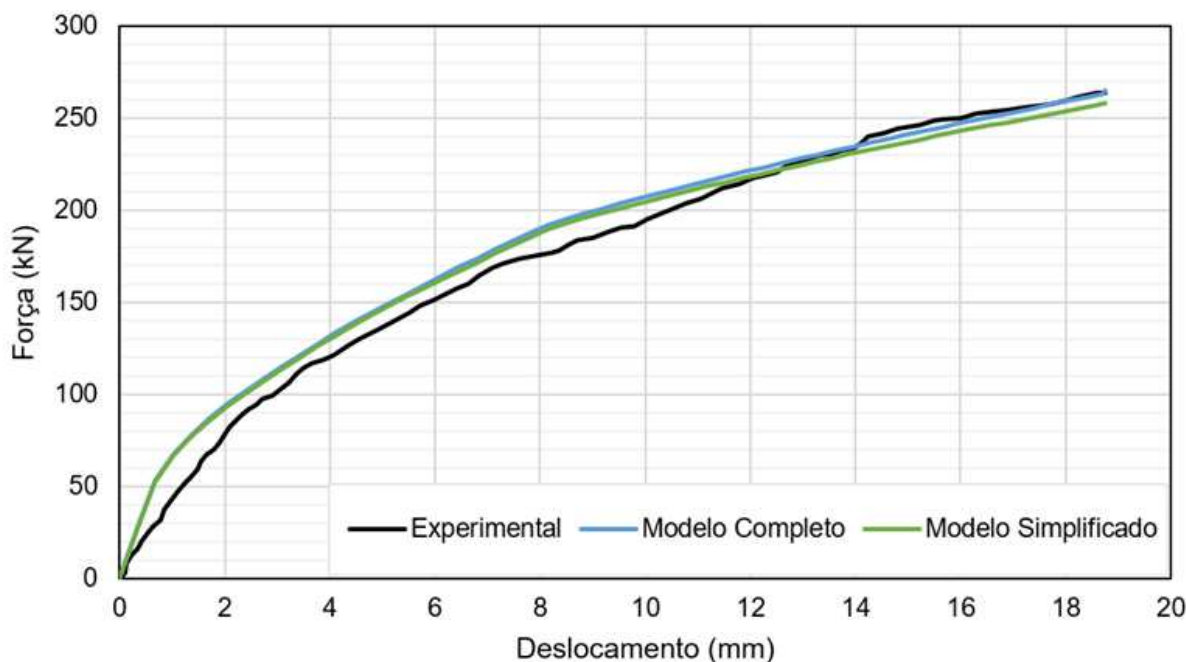


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

#### 4.1.2 Modelo simplificado

A Figura 37 apresenta a curva força–deslocamento experimental e as respostas numéricas dos modelos completo e simplificado no mesmo intervalo de deslocamentos, adotado para a calibração. Observa-se que ambos os modelos em elementos finitos reproduziram de forma satisfatória a rigidez inicial, a evolução não linear do carregamento e a capacidade resistente da viga, com boa concordância em relação ao comportamento experimental. O modelo simplificado manteve boa correlação com o modelo completo, evidenciando que a remoção das armaduras superiores e transversais, bem como a adoção de áreas equivalentes de aço na região tracionada, não comprometeu a representação global do comportamento estrutural. O modelo simplificado apresentou resposta ligeiramente inferior à do modelo completo, caracterizando uma representação global conservadora, na qual soluções que atendam ao desempenho experimental tendem a satisfazer o modelo completo com margem de segurança. Diante dessa concordância, o modelo simplificado foi adotado nas etapas seguintes do trabalho, por apresentar menor custo computacional e maior facilidade de manipulação geométrica da seção e das armaduras na aplicação do algoritmo genético de otimização, discutido nos itens subsequentes.

Figura 37 – Verificação dos modelos numéricos



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

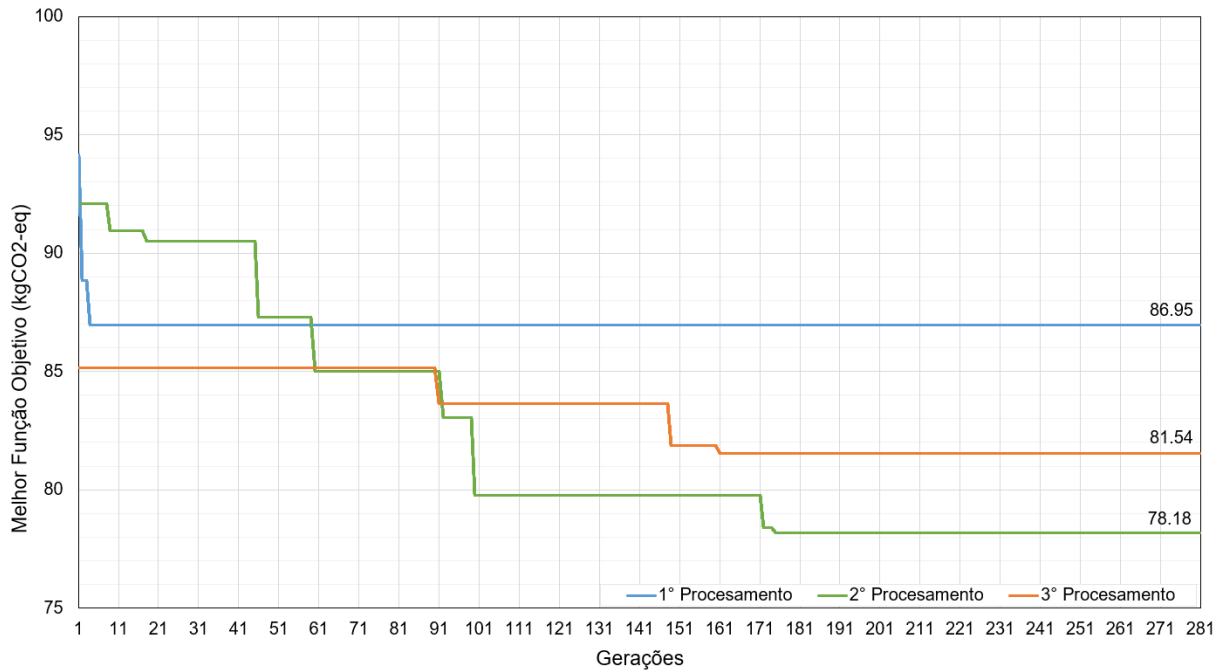
Além disso, o modelo simplificado foi capaz de preservar adequadamente o mecanismo de falha por flexão observado no modelo completo. Verifica-se a plastificação antecipada das armaduras passivas inferiores, seguida pelo escoamento das armaduras ativas apenas em estágios próximos ao pico de carga.

## **4.2 OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO**

### **4.2.1 Viga em UHPFRC (Vf-1%)**

A Figura 38 apresenta a evolução do melhor valor da função objetivo (FO) ao longo das gerações do algoritmo genético aplicado à viga em UHPFRC com 1% de fibras. A FO foi definida com o objetivo de minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> brutas da viga resultante, desde que a solução proposta apresentasse desempenho mecânico equivalente ou superior ao da viga experimental. Foram realizados três processamentos independentes, a partir de populações iniciais distintas, mantendo-se inalterados todos os parâmetros do algoritmo, tais como tamanho da população, operadores de seleção, cruzamento, mutação e elitismo, conforme descrito na metodologia. Observa-se que os processamentos apresentam comportamentos evolutivos distintos nas gerações iniciais: enquanto o primeiro processamento exibe uma redução mais pronunciada da FO nas primeiras gerações, os demais apresentam uma diminuição mais gradual, com melhorias distribuídas ao longo do processo evolutivo. Em todos os casos, contudo, verifica-se a tendência de convergência da FO para regiões mais promissoras do espaço de busca. O processo evolutivo foi conduzido até que não fossem observadas melhorias adicionais da FO por, no mínimo, 100 gerações consecutivas, caracterizando a estabilização das soluções.

Figura 38 – Evolução do algoritmo genético (Vf-1%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Considerando os três processamentos, apesar das diferenças no comportamento evolutivo inicial, observa-se que o algoritmo genético convergiu para um patamar de emissões brutas de CO<sub>2</sub> compreendido entre 78,18 e 86,95 kgCO<sub>2</sub>, correspondentes às emissões totais das vigas em UHPFRC com 1% de fibras, com diferença máxima da ordem de 10% entre os valores finais. Observa-se ainda que, após a estabilização desses patamares, as curvas tendem a permanecer praticamente horizontais, indicando que incrementos adicionais tenderiam a produzir ganhos marginais.

Esses resultados evidenciam o caráter estocástico do algoritmo genético e justificam a realização de múltiplas execuções independentes, reduzindo o risco de convergência prematura para mínimos locais. A realização de um número maior de processamentos independentes não foi adotada em razão do elevado custo computacional do problema, uma vez que cada processamento completo do algoritmo envolveu, ao longo de suas gerações, a avaliação de aproximadamente 14.050 indivíduos, sendo cada indivíduo associado a uma simulação numérica no Abaqus. Ressalta-se, contudo, que, quando um indivíduo já avaliado em gerações anteriores era novamente gerado, seus resultados eram reaproveitados, não sendo necessária a reexecução da simulação numérica. As análises foram realizadas em um computador equipado com processador Intel Core i5-13420H (8 núcleos e 12 threads)

e 16 GB de memória RAM, utilizando uma CPU por job. O tempo médio de processamento por simulação foi da ordem de 3 a 5 minutos, resultando em um tempo total aproximado de 4 a 5 dias para cada processamento completo do algoritmo genético. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram que o objetivo principal de redução das emissões de CO<sub>2</sub> foi alcançado de forma consistente. Como perspectiva para trabalhos futuros, estratégias como o desenvolvimento de modelos substitutos baseados em aprendizado de máquina podem ser exploradas, visando à redução do custo computacional.

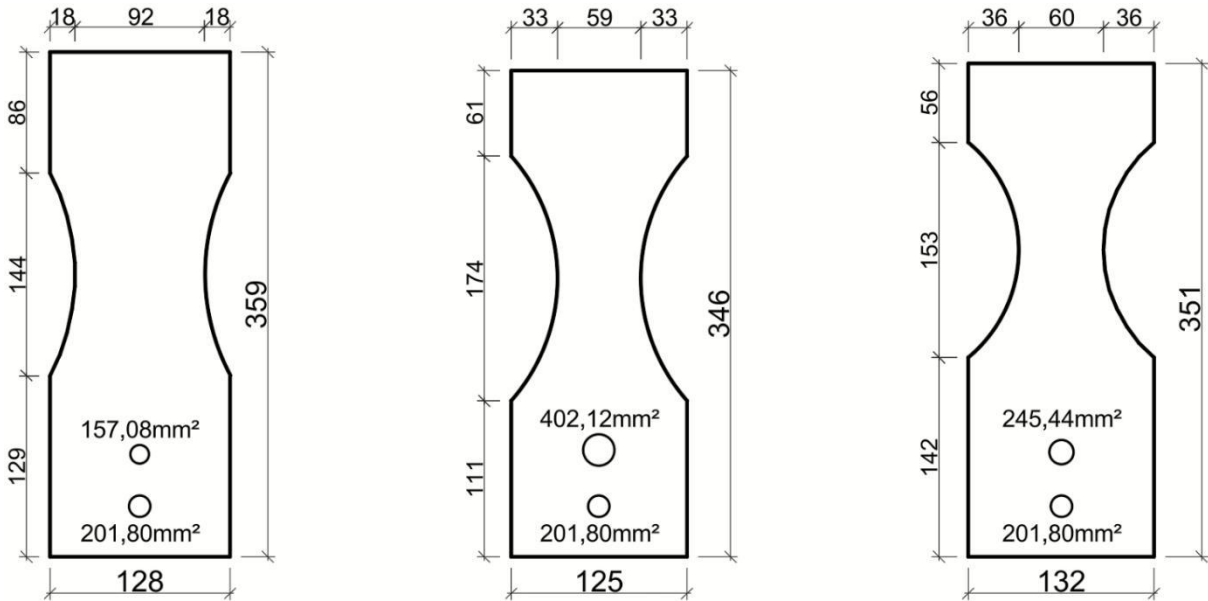
As variáveis de projeto associadas aos melhores indivíduos de cada processamento estão sintetizadas na Tabela 16 e na Figura 39. Observa-se que, embora os três resultados apresentem geometrias e taxas de armadura distintas, todos atendem às restrições impostas ao problema (limites de  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $As_{inf}$  e  $As_{prot}$ , cobrimentos mínimos e espaçamentos entre barras). De modo geral, as soluções associadas aos menores valores da função objetivo tendem a adotar seções mais esbeltas em comparação com a geometria de referência.

Tabela 16 – Variáveis dos melhores indivíduos (Vf-1%)

<b>Variáveis</b>	<b>1º Processamento</b> (FO= 86,95 kgCO <sub>2</sub> )	<b>2º Processamento</b> (FO= 78,18 kgCO <sub>2</sub> )	<b>3º Processamento</b> (FO= 81,54 kgCO <sub>2</sub> )
$b_1$ (mm)	18	33	36
$b_2$ (mm)	92	59	60
$h_1$ (mm)	129	111	142
$h_2$ (mm)	144	174	153
$h_3$ (mm)	86	61	56
$As_{inf}$ (mm <sup>2</sup> )	157,08	402,12	245,44
$As_{prot}$ (mm <sup>2</sup> )	201,8	201,8	201,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 39 – Geometria dos melhores indivíduos (Vf-1%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

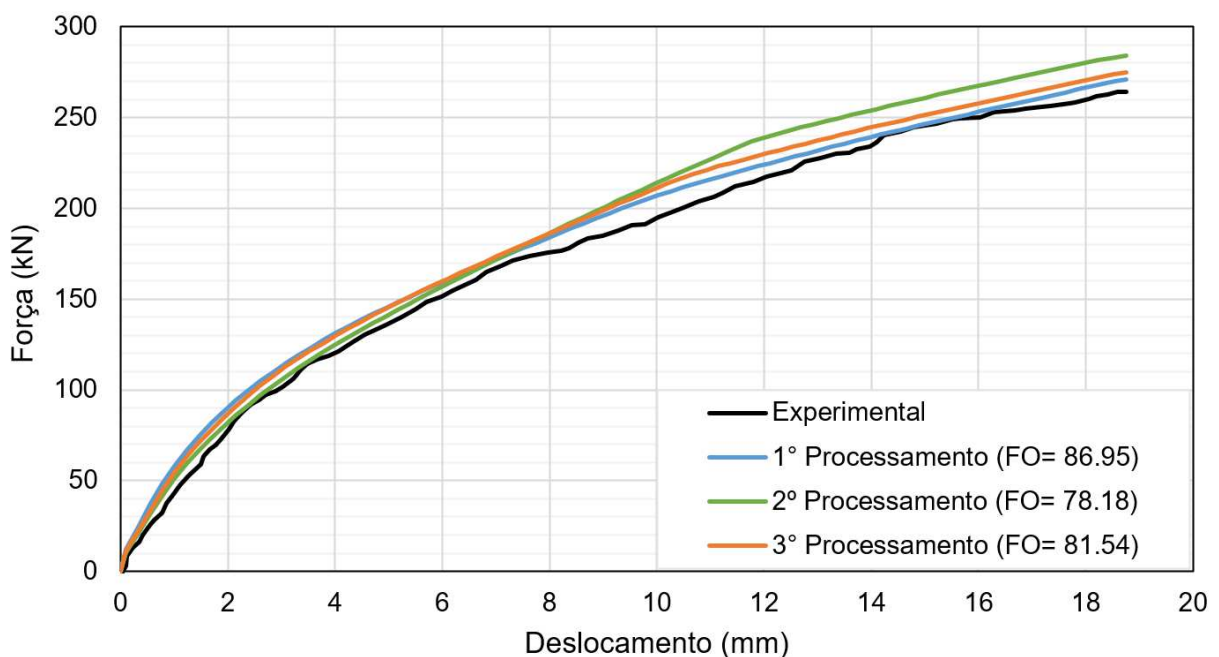
Em relação às armaduras, observa-se que as soluções ótimas exploram diferentes estratégias de balanceamento estrutural principalmente por meio da variação da área de armadura passiva inferior ( $A_{s_{inf}}$ ), uma vez que a área de armadura protendida ( $A_{s_{prot}} = 201,80 \text{ mm}^2$ ) permaneceu constante nos três processamentos. No 2º processamento, que apresentou o menor valor da função objetivo, a solução ótima adota a maior área passiva inferior ( $A_{s_{inf}} = 402,12 \text{ mm}^2$ ), enquanto os 1º e 3º processamentos apresentam valores menores de 157,08 mm<sup>2</sup> e 245,44 mm<sup>2</sup>, respectivamente. Esses resultados indicam que, para a análise do UHPFRC com  $V_f = 1\%$ , o comportamento estrutural e o desempenho ambiental da solução ótima são predominantemente governados pela armadura protendida, cuja área convergiu para o mesmo valor nos diferentes processamentos. A armadura passiva inferior atua, nesse contexto, como um parâmetro de ajuste da solução, permitindo a adoção de seções mais esbeltas e a consequente redução do volume de concreto, o que se refletiu em menores emissões de CO<sub>2</sub>.

A verificação do desempenho estrutural das soluções ótimas obtidas foi realizada por meio da comparação entre a curva força–deslocamento experimental da viga de referência e as respostas numéricas associadas aos melhores indivíduos de cada processamento do algoritmo genético, considerando o mesmo intervalo de deslocamentos do ensaio experimental, adotado como critério de avaliação, de forma

a garantir capacidade resistente igual ou superior nesse trecho analisado. As curvas completas podem ser consultadas no Apêndice B. A Figura 40 apresenta esse comparativo, no qual se observa que todas as curvas numéricas permanecem acima da resposta experimental ao longo de toda a faixa de deslocamentos analisada, indicando que as configurações otimizadas apresentam capacidade resistente global igual ou superior à da viga de referência.

Ressalta-se que as curvas força–deslocamento apresentadas correspondem aos modelos simplificados empregados no processo de otimização. No entanto, conforme discutido anteriormente, esse modelo possui caráter globalmente conservador. Dessa forma, ao se verificar que as soluções simplificadas apresentam capacidade resistente equivalente ou superior à resposta experimental, infere-se que os respectivos modelos completos (com a inclusão das armaduras superiores e transversais) tenderiam a apresentar capacidade resistente, no mínimo, equivalente ou ligeiramente superior à observada, assegurando uma margem adicional de segurança estrutural.

Figura 40 – Verificação das curvas força-deslocamento (Vf-1%)



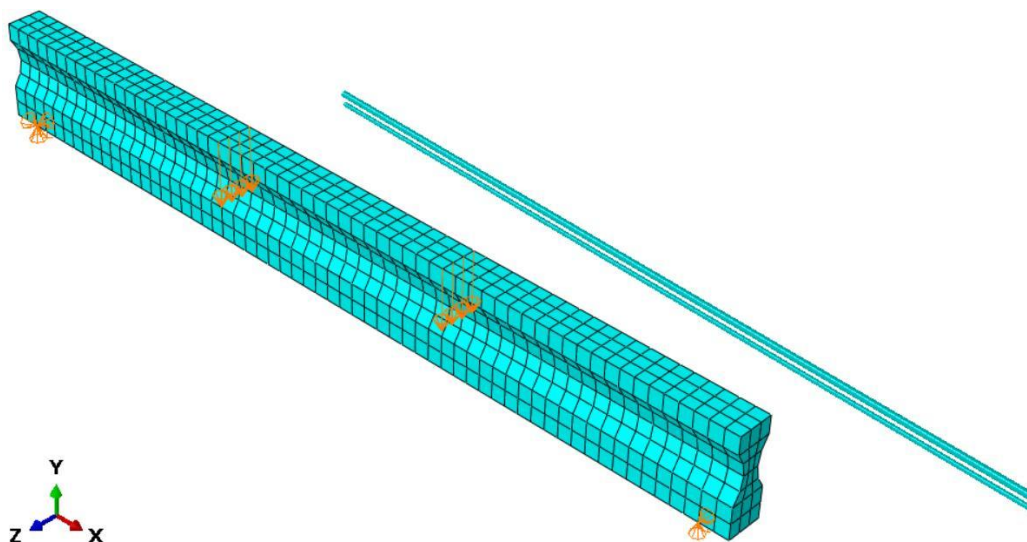
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise das curvas força–deslocamento associadas às soluções ótimas evidencia que a solução com menor valor da função objetivo nem sempre está associada a uma menor capacidade resistente. Observa-se que, no 2º processamento (melhor valor de FO) a solução ótima combina a maior capacidade de carga entre as

soluções analisadas com a menor emissão de  $\text{CO}_2$ , evidenciando que o critério ambiental adotado não implica, necessariamente, em penalização do desempenho estrutural. Verifica-se ainda que as soluções dos 1º e 3º processamentos apresentam capacidades resistentes próximas, embora associadas a valores distintos de emissão de  $\text{CO}_2$ , indicando que desempenhos estruturais semelhantes podem ser obtidos com impactos ambientais diferentes.

Com base nos resultados obtidos, a viga do 2º processamento foi selecionada como solução ótima para o UHPFRC com 1% de fibras, por apresentar a menor emissão (78,18  $\text{kgCO}_2$ ). A Figura 41 apresenta a modelagem numérica da viga simplificada e as condições de contorno adotadas.

Figura 41 – Representação da viga de solução ótima ( $V_f$ -1%)

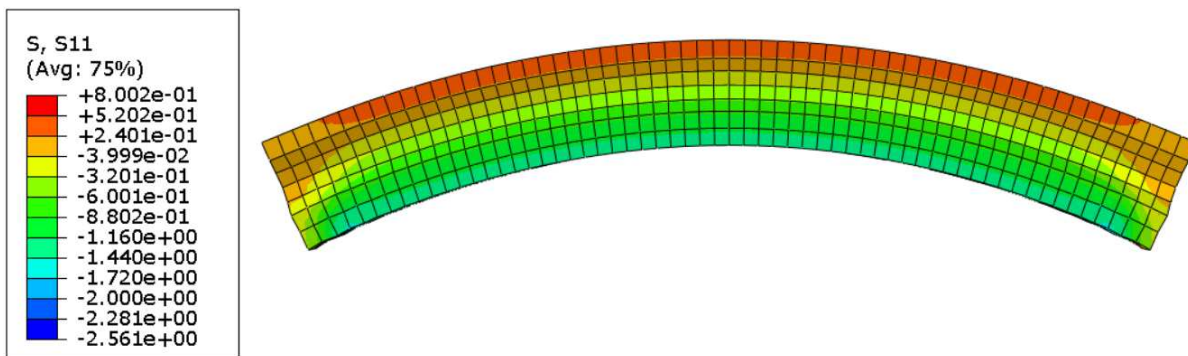


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No ato da protensão, antes da aplicação do carregamento externo, conforme apresentado na Figura 42, a viga otimizada em UHPFRC com  $V_f$ -1% apresenta tensões normais no concreto com valores máximos de tração da ordem de 0,80 MPa, localizados na região superior da seção, e valores máximos de compressão da ordem de 2,56 MPa, concentrados na região inferior. Considerando que a resistência à tração do UHPFRC com  $V_f$ -1% é de 4,3 MPa, observa-se que as tensões de tração permanecem inferiores à resistência do material. Dessa forma, o estado de tensões no ato da protensão atende ao critério estabelecido pela NBR 6118 (2023) para o estado limite de serviço, no qual a tração admissível no concreto é limitada pela sua

resistência à tração, indicando que a seção se mantém em regime elástico no estado inicial, não havendo risco de fissuração da viga antes do início de sua operação.

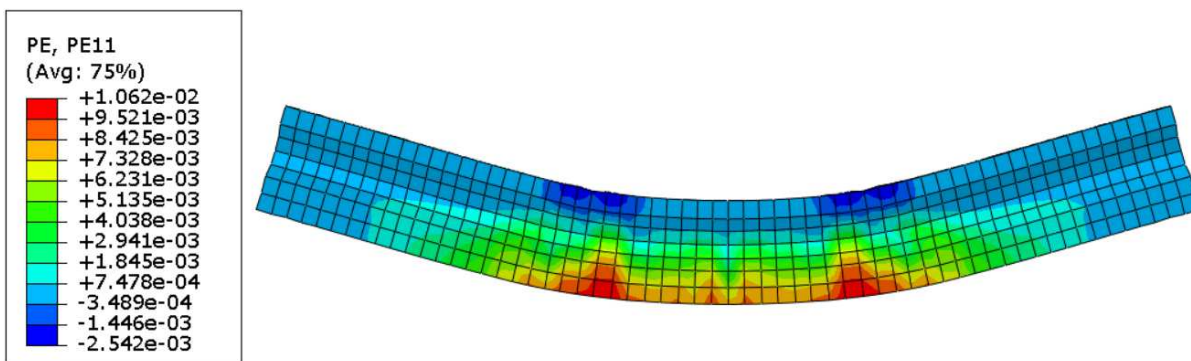
Figura 42 – Tensões no concreto no ato da protensão (Vf-1%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A comparação das distribuições de deformações plásticas longitudinais no concreto (PE11), avaliadas no pico da força resistente, mostra comportamento estrutural semelhante entre a viga de referência e a viga otimizada do 2º processamento. Em ambos os casos, as maiores deformações concentram-se na região tracionada inferior, especialmente no trecho central do vão, enquanto zonas de compressão mais intensas ocorrem na região superior próxima aos carregamentos, caracterizando falha por flexão. A Figura 43 apresenta a distribuição da viga otimizada, na qual se observa que os valores máximos são ligeiramente inferiores aos da viga de referência, indicando uma redistribuição mais eficiente das deformações associada à geometria otimizada.

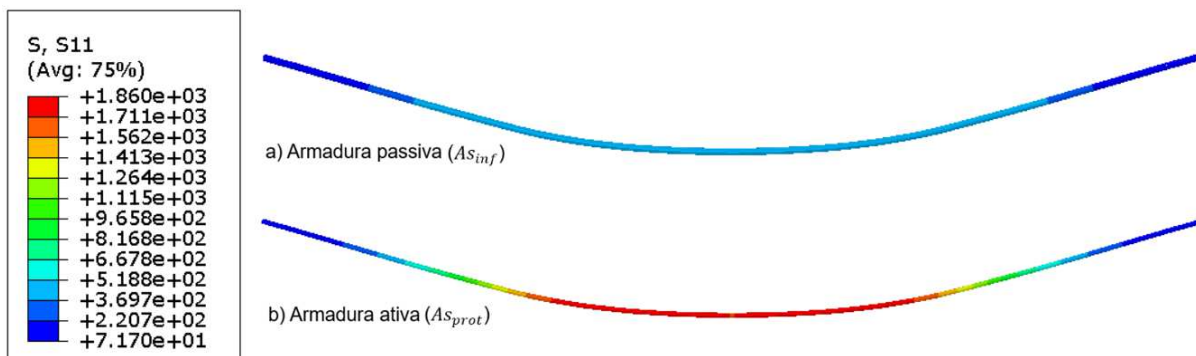
Figura 43 – Deformações plásticas viga otimizada (Vf-1%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 44, referente às armaduras da viga otimizada, evidencia a concentração das tensões longitudinais (S11) no trecho central do vão, com valores e distribuições semelhantes aos observados na viga de referência.

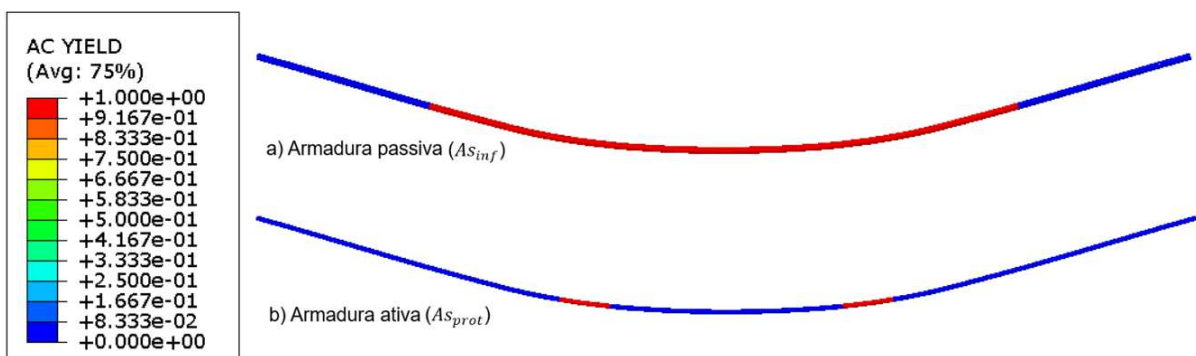
Figura 44 – Tensões armaduras viga otimizada (Vf-1%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 45, referente à viga otimizada, apresenta o indicador de plastificação ativa do aço (ACYIELD), evidenciando que o escoamento se inicia nas armaduras passivas inferiores, enquanto as armaduras protendidas atingem o regime plástico apenas em estágios próximos ao pico de carregamento, de forma semelhante ao observado na viga de referência.

Figura 45 – Escoamento das armaduras viga otimizada (Vf-1%)

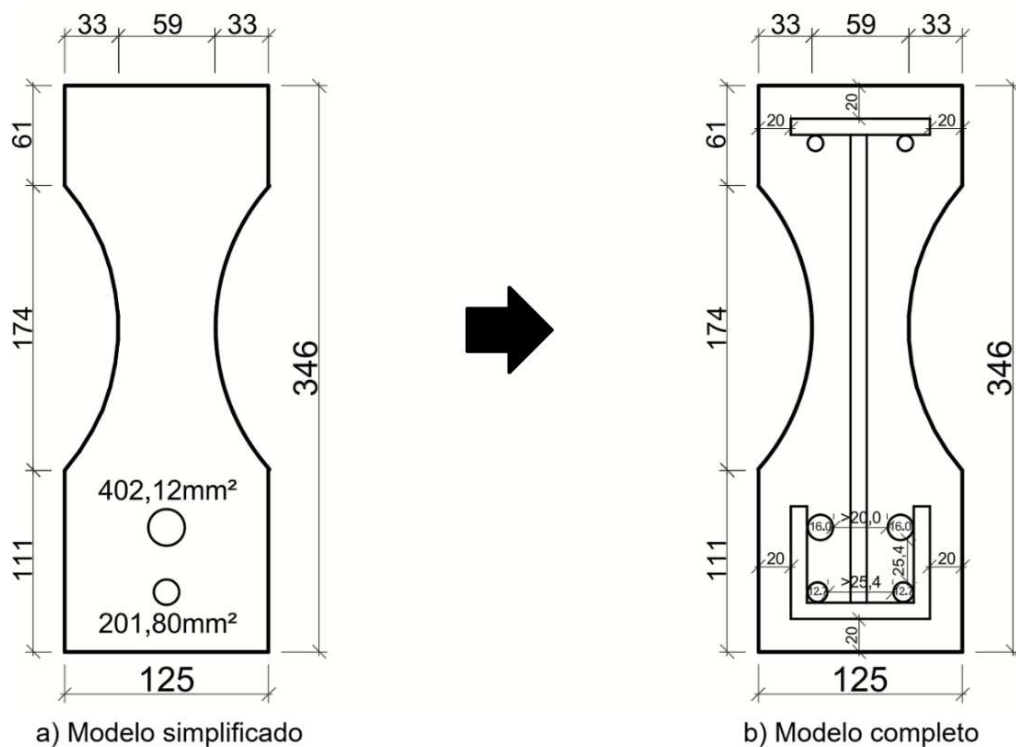


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 46 apresenta a transição do modelo simplificado para o modelo completo da viga otimizada, evidenciando a viabilidade construtiva da solução obtida. A área de armadura protendida do modelo simplificado ( $A_{s_{prot}} = 201,80 \text{ mm}^2$ ) é representada no modelo completo por dois cabos de 12,7 mm, enquanto a armadura passiva inferior ( $A_{s_{inf}} = 402,12 \text{ mm}^2$ ) é substituída por duas barras de 16 mm, mantendo áreas

equivalentes. As armaduras construtivas superiores e transversais são adotadas com barras de 10 mm, em consonância com a viga experimental. Verifica-se que, mesmo com a geometria mais esbelta, o arranjo final das armaduras atende aos cobrimentos mínimos e aos espaçamentos entre barras estabelecidos pela NF P 18-710 (2016), confirmando que a otimização obtida não compromete as exigências normativas nem a exequibilidade estrutural.

Figura 46 – Modelos da viga otimizada (Vf-1%)

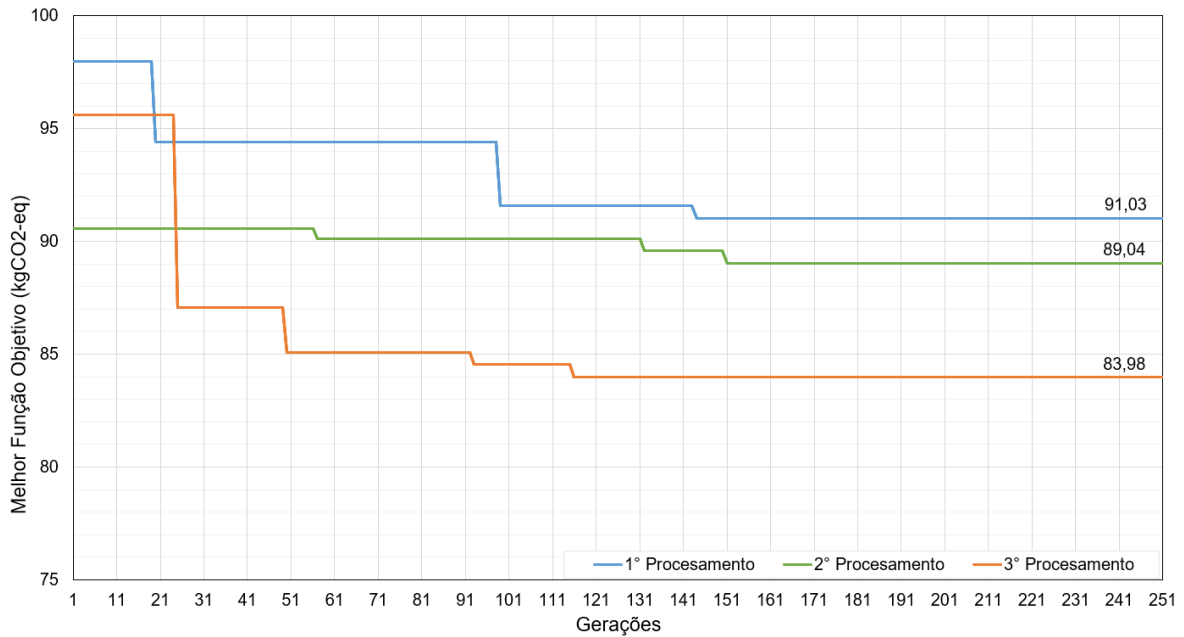


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

#### 4.2.2 Viga em UHPFRC (Vf-2%)

Para o UHPFRC com 2% de fibras, o algoritmo genético foi executado de forma análoga, mantendo-se os parâmetros de população, número de gerações, operadores de seleção, reprodução, mutação e critérios de parada descritos na metodologia. A Figura 47 apresenta a evolução do melhor valor da função objetivo (FO) para os três processamentos independentes.

Figura 47 – Evolução do algoritmo genético (Vf-2%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Considerando os três processamentos, apesar das diferenças iniciais, observa-se que o algoritmo genético convergiu para um patamar de emissões brutas de CO<sub>2</sub> compreendido entre 83,98 e 91,03 kgCO<sub>2</sub>, com diferença máxima da ordem de 8% entre os valores finais da FO. Observa-se ainda que, após a estabilização desses patamares, as curvas tendem a permanecer praticamente horizontais, indicando que incrementos adicionais tenderiam a produzir apenas ganhos marginais.

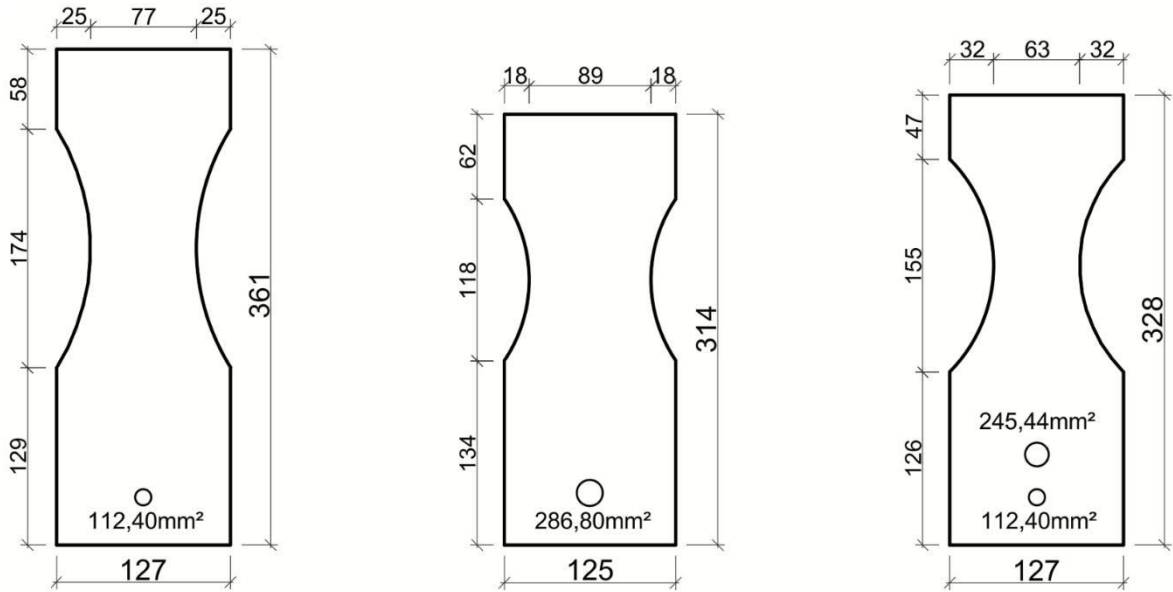
As variáveis de projeto dos melhores indivíduos estão apresentadas na Tabela 17 e na Figura 48. Apesar das diferenças entre as soluções, todas atendem às restrições geométricas e normativas, sendo os menores valores da função objetivo associados, em geral, a seções mais esbeltas que a geometria de referência.

Tabela 17 – Variáveis dos melhores indivíduos (Vf-2%)

Variáveis	1º Processamento (FO= 91,03 kgCO <sub>2</sub> )	2º Processamento (FO= 89,04 kgCO <sub>2</sub> )	3º Processamento (FO= 83,98 kgCO <sub>2</sub> )
<i>b</i> 1 (mm)	25	18	32
<i>b</i> 2 (mm)	77	89	63
<i>h</i> 1 (mm)	129	134	126
<i>h</i> 2 (mm)	174	118	155
<i>h</i> 3 (mm)	58	62	47
<i>A</i> <sub>inf</sub> (mm <sup>2</sup> )	0,0	0,0	245,44
<i>A</i> <sub>prot</sub> (mm <sup>2</sup> )	112,4	286,8	112,4

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura 48 – Geometria dos melhores indivíduos (Vf-2%)



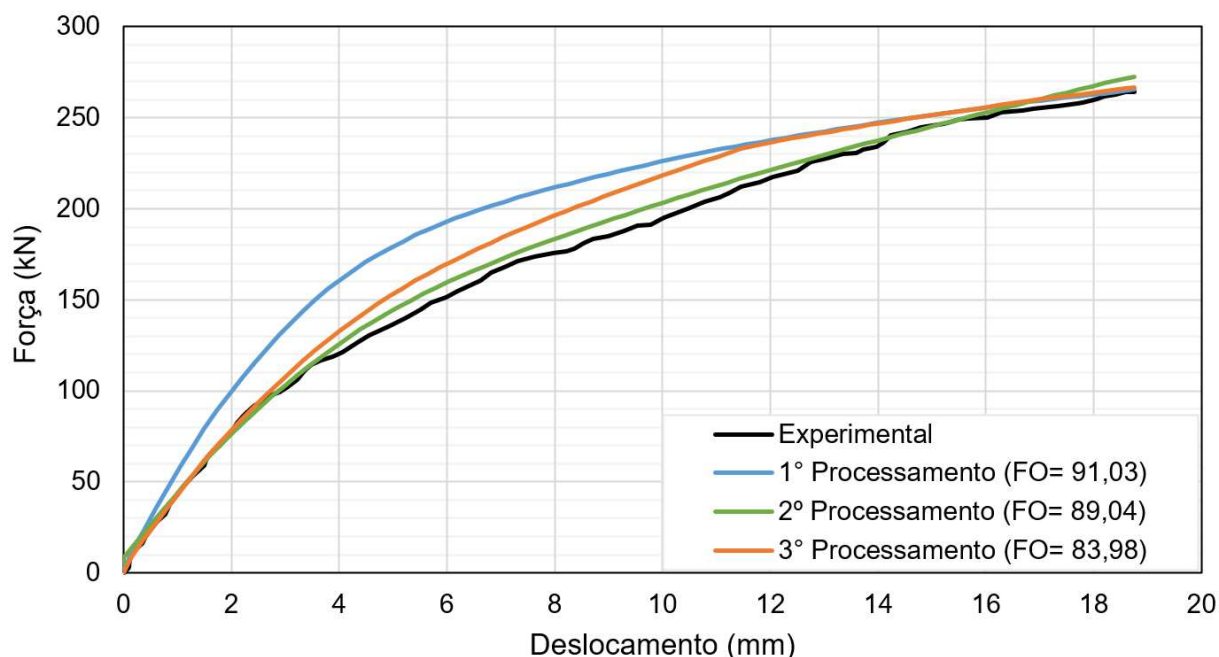
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Em relação às armaduras, observa-se que as soluções ótimas para o UHPFRC com 2% de fibras adotam diferentes estratégias de balanceamento entre a armadura passiva inferior ( $A_{S_{inf}}$ ) e a armadura protendida ( $A_{S_{prot}}$ ). Nos 1º e 2º processamentos não há utilização de armadura passiva inferior, concentrando-se a resistência essencialmente na protensão. Entretanto, o 1º processamento apresenta maior altura da seção associada a uma menor área protendida (112,40 mm²), enquanto o 2º processamento adota uma seção mais baixa combinada a uma área de protensão maior (286,80 mm²). Já no 3º processamento, que resultou no menor valor da função objetivo, observa-se a introdução de armadura passiva inferior (245,44 mm²), com altura intermediária entre as demais e área de protensão igual à do 1º processamento. Além disso, as larguras das seções são próximas entre si e situam-se próximas ao limite mínimo estabelecido (125 mm), evidenciando a tendência do algoritmo em convergir para soluções com seções mais esbeltas e menor impacto ambiental. Na comparação entre as melhores soluções da função objetivo para as vigas otimizadas com Vf -1% e Vf -2%, observa-se que o aumento do teor de fibras permite a redução das áreas de armadura passiva e protendida, mantendo volumes de concreto semelhantes, o que evidencia a maior eficiência estrutural do UHPFRC.

O desempenho estrutural das soluções ótimas foi avaliado pela comparação entre a curva força–deslocamento experimental da viga de referência e as respostas

numéricas dos melhores indivíduos de cada processamento, considerando o mesmo intervalo de deslocamentos do ensaio experimental, adotado como critério de avaliação. As curvas completas podem ser consultadas no Apêndice B. Conforme ilustrado na Figura 49, todas as curvas numéricas permanecem acima da resposta experimental ao longo da faixa de deslocamentos analisada, indicando capacidade resistente global igual ou superior à da viga de referência.

Figura 49 – Verificação das curvas força-deslocamento (Vf-2%)



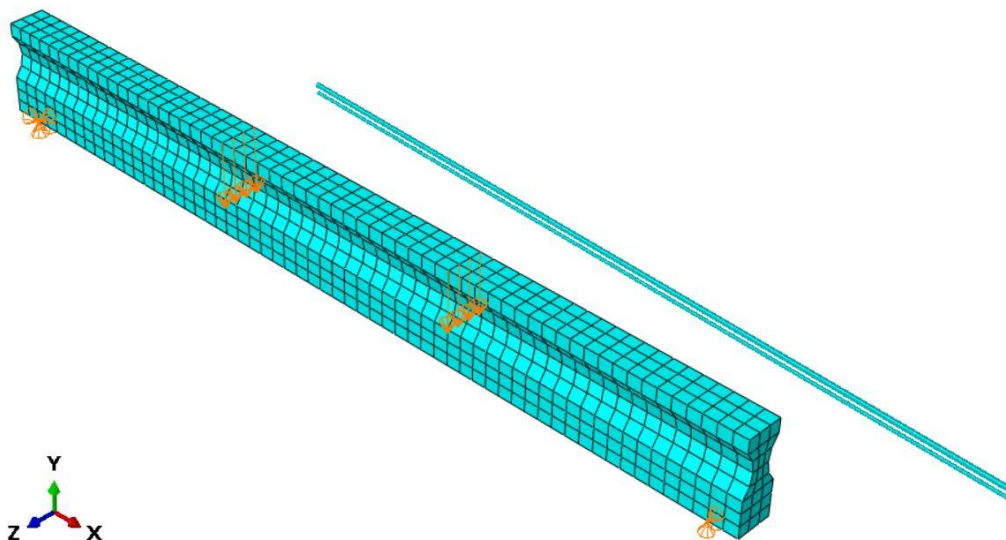
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise das curvas força–deslocamento mostra que o menor valor da função objetivo não está necessariamente associado à menor capacidade resistente. Observa-se que o 2º processamento apresenta a maior capacidade de carga entre as soluções analisadas, embora não corresponda à maior emissão de CO<sub>2</sub>, evidenciando que a otimização ambiental não implica perda de desempenho estrutural. Além disso, os 1º e 3º processamentos exibem respostas estruturais semelhantes, apesar de valores distintos de emissão, confirmando que soluções com desempenho equivalente podem ser obtidas com diferentes impactos ambientais. Esses resultados reforçam que a otimização foi conduzida com base na minimização das emissões de CO<sub>2</sub>.

Com base nos resultados obtidos, a viga do 3º processamento foi selecionada como solução ótima para o UHPFRC com 2% de fibras, por apresentar a menor

emissão de CO<sub>2</sub> (83,98 kgCO<sub>2</sub>). A Figura 50 ilustra a modelagem numérica da viga simplificada e as condições de contorno adotadas.

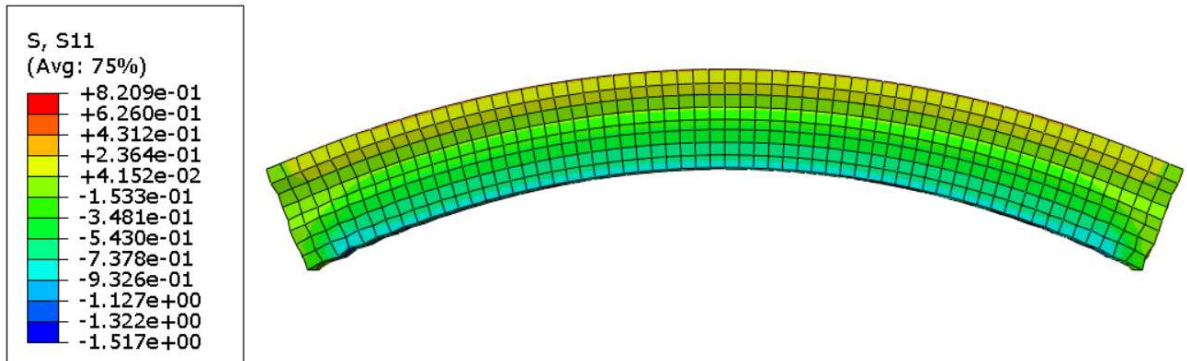
Figura 50 – Representação da viga de solução ótima (Vf-2%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No ato da protensão, antes da aplicação do carregamento externo, conforme apresentado na Figura 51, a viga otimizada em UHPFRC com Vf-2% apresenta tensões normais no concreto com valores máximos de tração da ordem de 0,82 MPa, localizados na região superior da seção, e valores máximos de compressão da ordem de 1,51 MPa, concentrados na região inferior. Considerando que a resistência à tração do UHPFRC com Vf = 2% é de 6,6 MPa, verifica-se que as tensões de tração permanecem amplamente inferiores à capacidade resistente do material. Dessa forma, o estado de tensões no ato da protensão atende ao critério estabelecido pela NBR 6118 (2023) para o estado limite de serviço, segundo o qual a tração admissível no concreto é limitada pela sua resistência à tração, indicando que a seção se mantém em regime elástico no estado inicial, sem risco de fissuração antes do início de sua operação. Em comparação com o caso Vf-1%, observam-se níveis de tração próximos e uma redução do nível máximo de compressão no concreto no estado inicial, indicando um comportamento mais favorável com o aumento do teor de fibras.

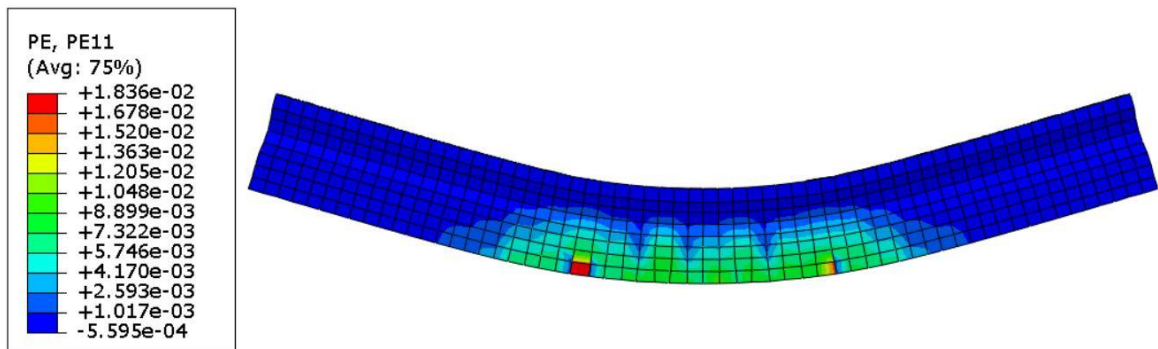
Figura 51 – Tensões no concreto no ato da protensão (Vf-2%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 52 apresenta a distribuição das deformações plásticas longitudinais no concreto (PE11) da viga otimizada com UHPFRC contendo 2% de fibras, avaliada no pico da força resistente. Observa-se que as deformações plásticas permanecem concentradas na região tracionada inferior, porém de forma mais localizada, com picos bem definidos no trecho central do vão. Em comparação com a viga com Vf-1%, observa-se uma resposta mais localizada do concreto, com maiores picos de deformação, possivelmente associada às menores taxas de armadura passiva e protendida adotadas para Vf-2%.

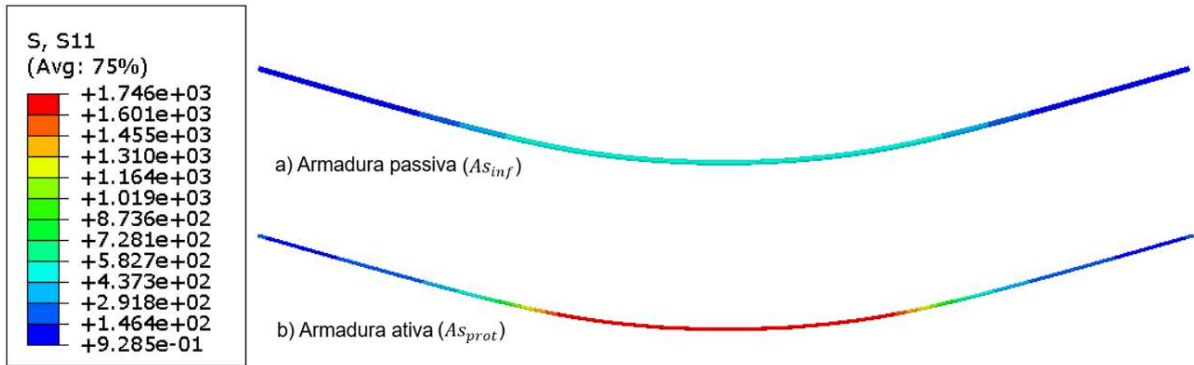
Figura 52 – Deformações plásticas viga otimizada (Vf-2%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 53, referente à viga otimizada, evidencia a concentração das tensões longitudinais (S11) no trecho central do vão, com padrões de distribuição e níveis de tensão semelhantes aos observados na viga de referência.

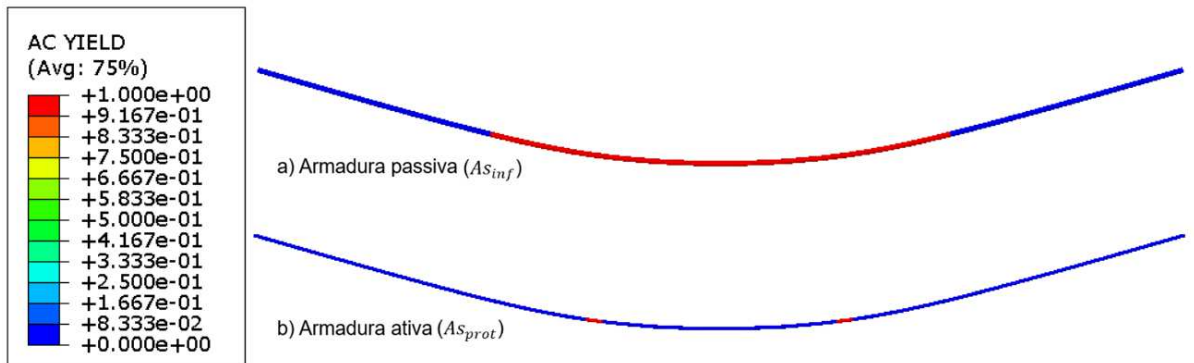
Figura 53 – Tensões armaduras viga otimizada (Vf-2%)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 54 mostra que, na viga otimizada, o escoamento ocorre primeiramente nas armaduras passivas inferiores, enquanto as armaduras protendidas atingem o regime plástico apenas próximo ao pico de carregamento, reproduzindo o comportamento da viga de referência.

Figura 54 – Escoamento das armaduras viga otimizada (Vf-2%)

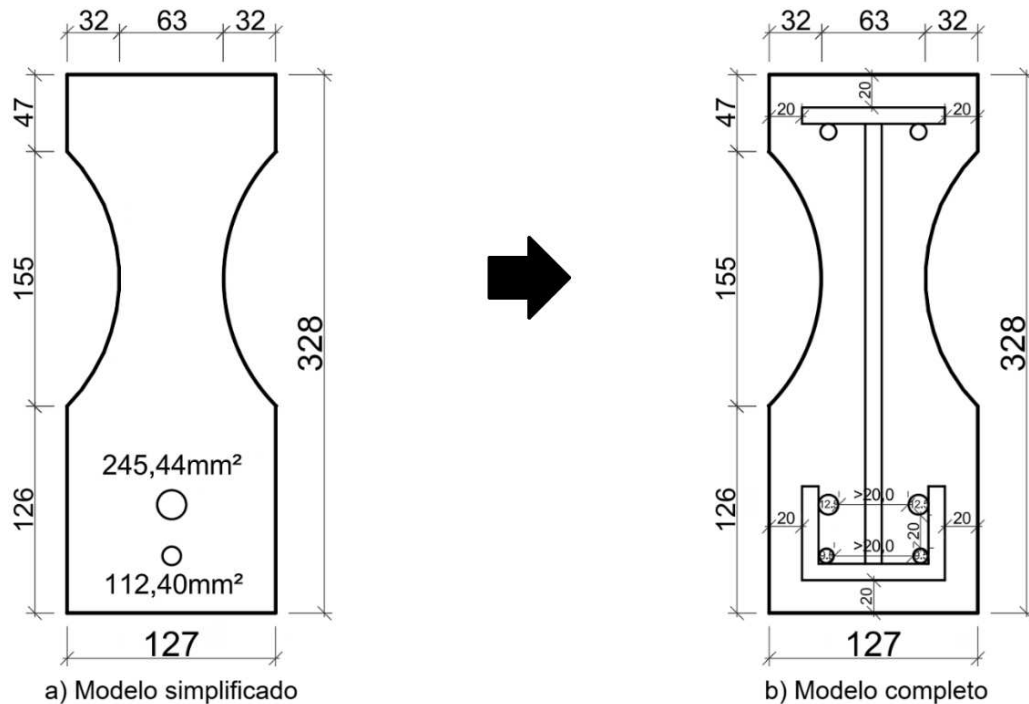


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 55 ilustra a conversão do modelo simplificado para o modelo completo da viga otimizada, demonstrando a viabilidade construtiva da solução proposta. No modelo completo, a área de armadura protendida do modelo simplificado ( $A_{s_{prot}} = 112,40 \text{ mm}^2$ ) é representada por dois cabos de 9,5 mm, enquanto a armadura passiva inferior ( $A_{s_{inf}} = 245,44 \text{ mm}^2$ ) é substituída por duas barras de 12,5 mm, preservando a equivalência de área. As armaduras construtivas superiores e transversais são adotadas com barras de 10 mm, de forma consistente com a viga experimental. Observa-se que, apesar da seção mais esbelta, o detalhamento final respeita os cobrimentos mínimos e os espaçamentos entre barras estabelecidos pela NF P 18-

710 (2016), confirmando a adequação normativa e a exequibilidade da solução otimizada.

Figura 55 – Modelos da viga otimizada (Vf-2%)

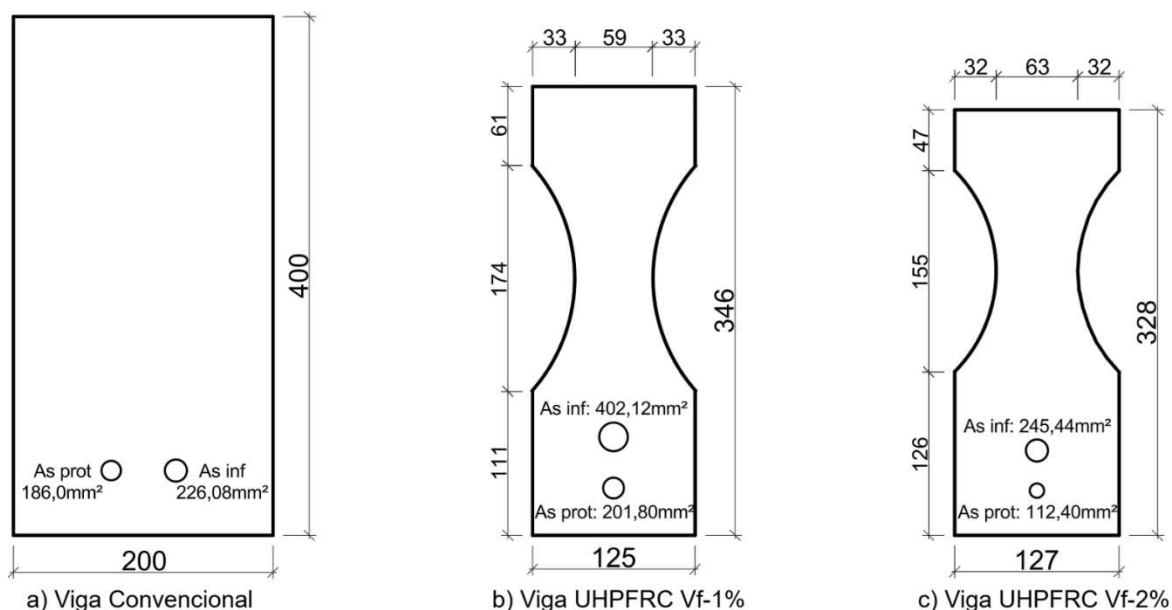


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

#### 4.3 COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E DOS PESOS DAS VIGAS

A Figura 56 apresenta as três vigas consideradas na análise comparativa das emissões de CO<sub>2</sub> e dos pesos próprios, todas avaliadas a partir de seus modelos simplificados, uma vez que a adoção do modelo completo implicaria apenas a inclusão de armaduras construtivas, sem alterações significativas nas emissões totais, especialmente para as vigas otimizadas, cuja geometria mais esbelta tende a demandar menores quantidades dessas armaduras. São analisadas a viga de referência experimental em concreto convencional e as vigas otimizadas com os melhores resultados da função objetivo para UHPFRC, com volumes de fibras de Vf-1% e Vf-2%. A partir dessas configurações, procede-se à avaliação ambiental considerando tanto o impacto dos materiais constituintes quanto o efeito da otimização geométrica promovida pelo algoritmo genético.

Figura 56 – Vigas analisadas quanto às emissões de CO<sub>2</sub> e aos pesos próprios



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para esta seção, adotaram-se os quantitativos dos traços (Tabela 14) e os coeficientes de emissões da etapa A1 (Tabela 15), apresentados na metodologia. Os valores de emissão por material das vigas analisadas são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Emissões de CO<sub>2</sub> por material

Material	Convencional (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	UHPFRC Vf-1% (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	UHPFRC Vf-2% (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	375,3884	380,7005	380,7005
Cinzas volante	-	0,00	0,00
Escória alto-forno	-	14,1341	14,1341
Sílica fume	-	11,18	11,18
Brita	1,7696	-	-
Areia	5,3418	-	-
Areia de sílica	-	19,9288	19,9288
Pó de vidro	-	23,65	23,65
Água	0,0107	0,0092	0,0092
Superplastificante	-	38,304	38,304
Fibras de aço	-	120,87	240,21

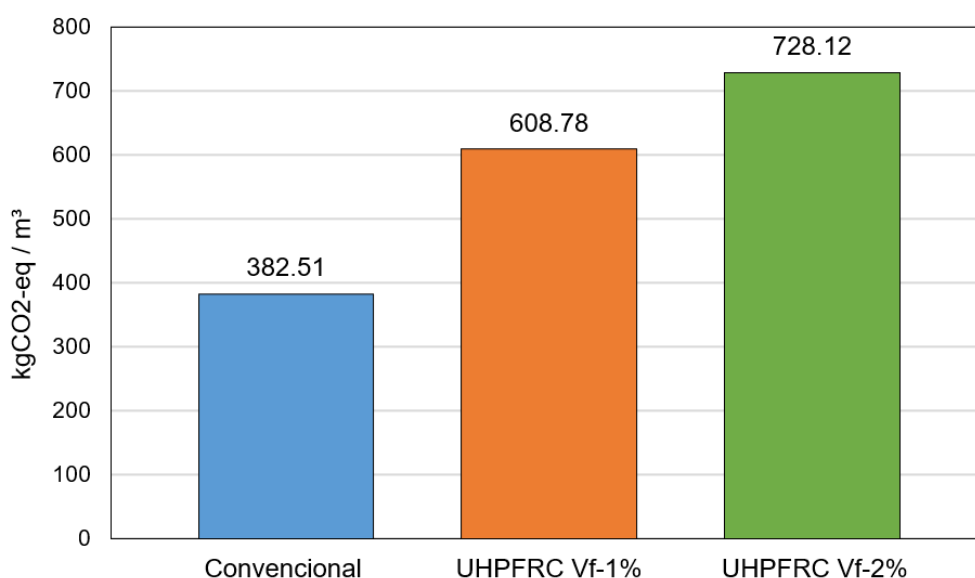
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Ressalta-se que, nos cálculos das emissões por metro cúbico de concreto e do índice de CO<sub>2</sub> incorporado ao concreto, não são consideradas as armaduras. As emissões associadas às armaduras são contabilizadas apenas na análise global das

emissões, na qual a métrica passa a representar o elemento estrutural completo, ou seja, a viga.

As emissões totais por m<sup>3</sup> dos concretos, apresentadas na Figura 57, indicam valores significativamente mais elevados para os UHPFRCs com 1% e 2% de fibras, cerca de 59,2% e 90,3% superiores ao concreto convencional, respectivamente. Esse resultado decorre do fato de a análise ser realizada por unidade de volume (1 m<sup>3</sup>), sem considerar o volume efetivo das vigas.

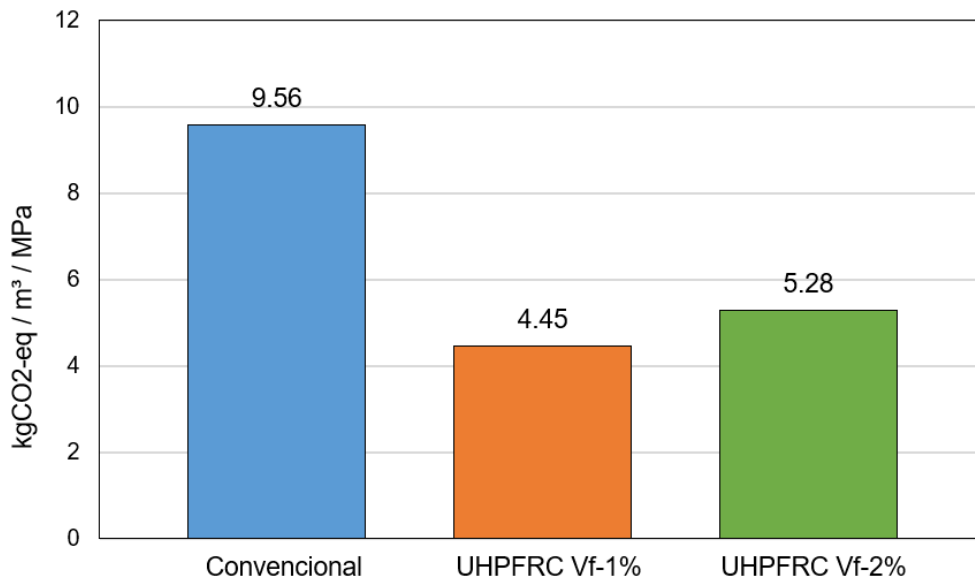
Figura 57 – Emissões de CO<sub>2</sub> por metro cúbico de concreto



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para o cálculo do CI, as emissões por m<sup>3</sup> de concreto foram divididas pelas respectivas resistências à compressão. Embora a análise também considere um volume unitário, o cenário se inverte devido às maiores resistências mecânicas dos UHPFRCs. Conforme a Figura 58, os concretos com 1% e 2% de fibras apresentam valores de CI cerca de 53,5% e 44,8% inferiores ao do concreto convencional, destacando-se o UHPFRC com Vf-1% como a solução de melhor desempenho ambiental nessa métrica.

Figura 58 – Índice de CO<sub>2</sub> incorporado ao concreto



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No cálculo das emissões brutas já se considera o elemento viga como um todo, ou seja, levando em consideração além do concreto, também suas armaduras. Para encontrar a emissão referente ao material concreto multiplica-se a sua emissão por m<sup>3</sup> pelo volume da viga. Já a emissão de aço é feita através do volume de aço multiplicado pelo seu peso específico e pelo seu fator de emissão de CO<sub>2</sub> presente na Tabela 15.

As emissões de CO<sub>2</sub> por constituinte das vigas são apresentadas na Tabela 19. Observa-se que o cimento é o principal responsável pelas emissões em todos os casos, representando aproximadamente 88,4% na viga convencional, com redução para cerca de 51,7% e 47,4% nas vigas em UHPFRC com Vf-1% e Vf-2%, respectivamente. Em contrapartida, a contribuição das fibras de aço torna-se significativa nas vigas em UHPFRC, correspondendo a aproximadamente 16,4% no caso Vf-1% e 29,9% no caso Vf-2%. As armaduras, consideradas conjuntamente (passiva e ativa), contribuem com cerca de 9,9%, 17,4% e 9,4% das emissões totais para as vigas convencional, UHPFRC Vf-1% e UHPFRC Vf-2%, respectivamente, enquanto os outros constituintes do concreto representam aproximadamente 1,7%, 14,5% e 13,3%.

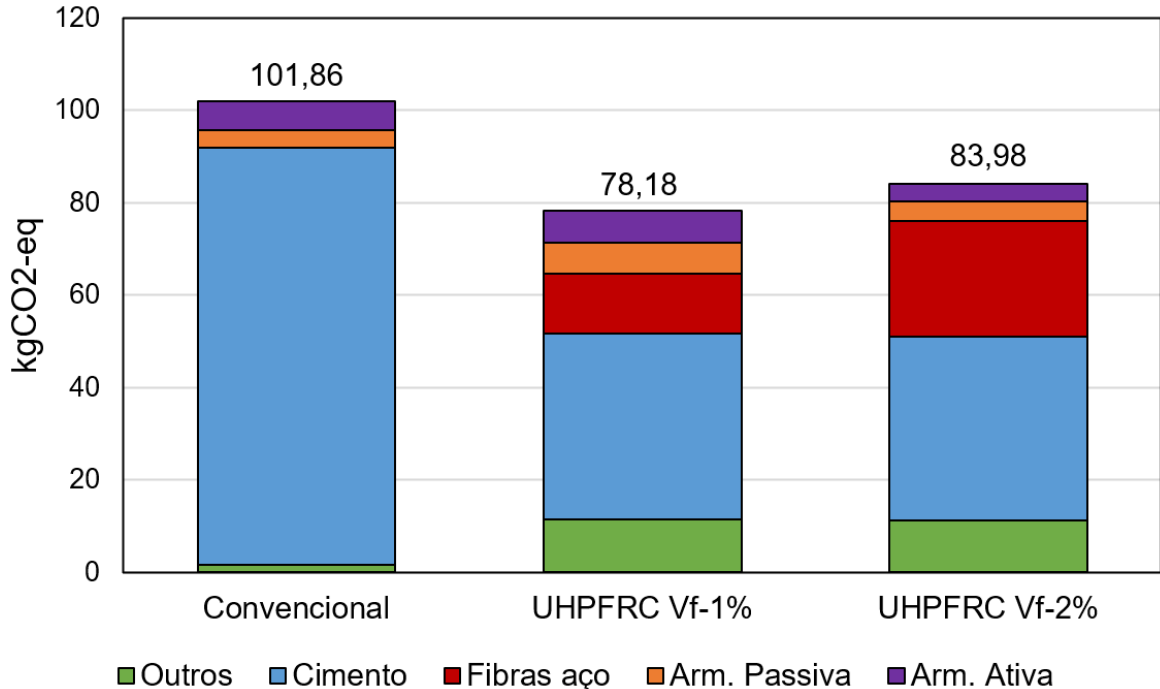
Tabela 19 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> por material

Material	Convencional (kgCO <sub>2</sub> -eq)	UHPFRC Vf-1% (kgCO <sub>2</sub> -eq)	UHPFRC Vf-2% (kgCO <sub>2</sub> -eq)
Cimento	90,09	40,41	39,77
Outros	1,71	11,38	11,20
Fibras de aço	0,00	12,83	25,09
Arm. Passiva	3,83	6,80	4,16
Arm. Ativa	6,23	6,76	3,76

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As emissões totais das vigas convencional, UHPFRC com Vf-1% e UHPFRC com Vf-2% são, respectivamente, 101,86 kgCO<sub>2</sub>, 78,18 kgCO<sub>2</sub> e 83,98 kgCO<sub>2</sub>, conforme a Figura 59. Comparativamente, as vigas em UHPFRC com 1% e 2% de fibras apresentam reduções globais de cerca de 23,3% e 17,6% nas emissões de CO<sub>2</sub> em relação à viga convencional. Destaca-se o UHPFRC com Vf-1% como a solução de menor impacto ambiental, principalmente devido ao menor teor de fibras de aço, embora ambas as soluções em UHPFRC se mostrem ambientalmente vantajosas.

Figura 59 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Além das emissões, avaliou-se o peso próprio das vigas analisadas, uma vez que a redução do volume estrutural influencia diretamente os processos construtivos e as ações permanentes da estrutura. Para os cálculos, adotaram-se as densidades de

2264 kg/m<sup>3</sup> para o concreto convencional, 2482 kg/m<sup>3</sup> para o UHPFRC com Vf-1%, 2560 kg/m<sup>3</sup> para o UHPFRC com Vf-2% e 7850 kg/m<sup>3</sup> para as armaduras, bem como a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

A Tabela 20 apresenta as áreas da seção transversal, os volumes e as massas das vigas, discriminados para o concreto e para as armaduras passivas e ativas. Observa-se que as soluções otimizadas em UHPFRC com Vf-1% e Vf-2% apresentam reduções de aproximadamente 55,8% e 56,5%, respectivamente, nas áreas e volumes de concreto em relação à viga de referência, como resultado direto do processo de desmaterialização promovido pelo algoritmo genético. Embora as vigas apresentem diferentes taxas de armadura, o acréscimo de massa associado ao aço é relativamente pequeno quando comparado à expressiva redução obtida no volume de concreto.

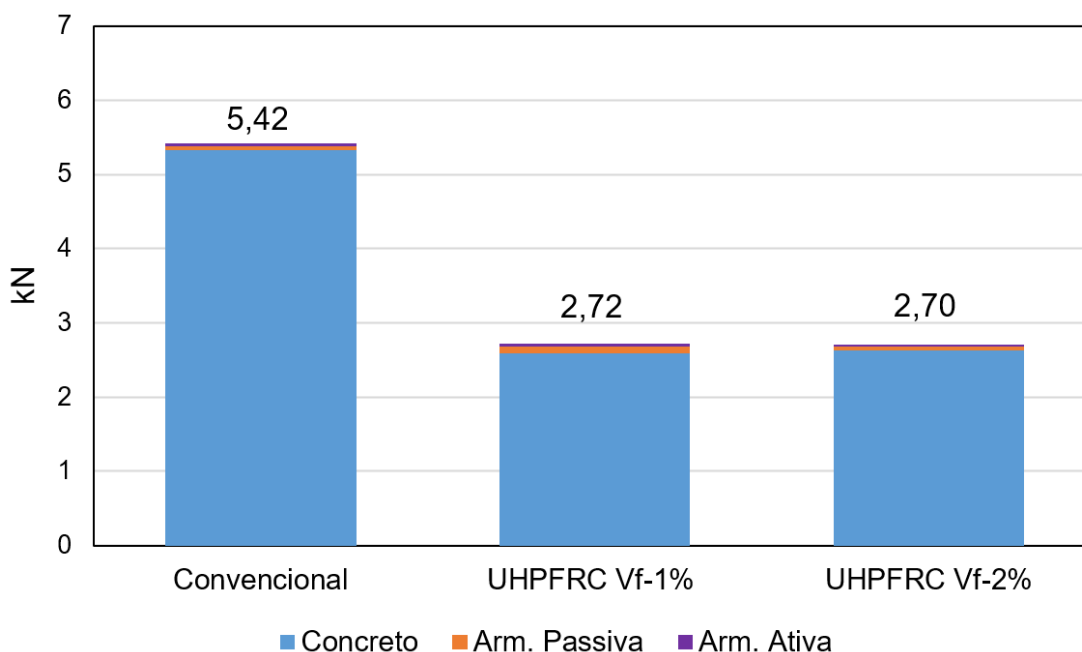
Tabela 20 – Áreas, volumes e massas dos componentes das vigas

<b>Descrição</b>	<b>Convencional</b>	<b>UHPFRC Vf-1%</b>	<b>UHPFRC Vf-2%</b>
Concreto (área m <sup>2</sup> ):	0,08	0,035378	0,034822
Concreto (volume m <sup>3</sup> ):	0,24	0,106134	0,104467
Concreto (massa kg):	543,36	263,42	267,44
Arm. Passiva (área m <sup>2</sup> ):	0,000226	0,000402	0,000245
Arm. Passiva (volume m <sup>3</sup> ):	0,000655	0,001166	0,000712
Arm. Passiva (massa kg):	5,15	9,15	5,59
Arm. Ativa (área m <sup>2</sup> ):	0,000186	0,000201	0,000112
Arm. Ativa (volume m <sup>3</sup> ):	0,000539	0,000585	0,000326
Arm. Ativa (massa kg):	4,23	4,59	2,56
Massa Total (kg):	552,74	277,16	275,59

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Figura 60 apresenta a comparação dos pesos próprios das vigas analisadas. Observa-se que a viga convencional possui peso total de aproximadamente 5,42 kN, enquanto as vigas em UHPFRC com Vf-1% e Vf-2% apresentam, respectivamente, cerca de 2,72 kN e 2,70 kN, o que corresponde a reduções da ordem de 49,8% e 50,2% em relação ao peso próprio da viga de referência, com mínima vantagem para a solução com Vf-2%.

Figura 60 – Peso próprio das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A redução do peso próprio observada nas vigas otimizadas constitui um resultado estruturalmente relevante, sobretudo no contexto de sistemas pré-moldados. Vigas mais leves tendem a reduzir as ações permanentes transmitidas a apoios e fundações, além de favorecer as fases construtivas, como transporte, içamento e montagem em obra. Em particular, a menor massa dos elementos possibilita o transporte de um maior número de vigas por viagem e a utilização de equipamentos de menor capacidade de içamento, o que tende a reduzir o consumo energético e as emissões associadas às fases de construção, especialmente nas subetapas A4 e A5 do ciclo de vida. Embora esses efeitos não tenham sido quantificados no presente estudo, a literatura reconhece que a redução de massa estrutural está diretamente associada a benefícios ambientais adicionais nas fases de transporte e construção (EN 15804; POMPONI & MONCASTER, 2016).

Além disso, o algoritmo genético foi concebido já considerando a viabilidade construtiva das soluções propostas, restringindo a busca a seções retangulares ou em I. Para as seções em I, manteve-se a simetria na largura entre as mesas superior e inferior, de modo que a variação geométrica ocorresse exclusivamente na alma, por meio da retirada lateral de material, assegurando compatibilidade com sistemas de formas modulares ou ajustáveis, com insertos reutilizáveis, prática consolidada na

indústria de pré-moldados. Ressalta-se que o objetivo da otimização não é a execução de uma geometria distinta para cada viga analisada, mas a identificação de soluções mais eficientes dentro de um espaço de projeto viável. Em uma aplicação real, seria mais adequado adotar a padronização de famílias de seções, de forma análoga às vigotas pré-fabricadas, associadas a faixas de vão e carregamento. Adicionalmente, avanços recentes em manufatura aditiva e impressão 3D de formas e moldes podem aumentar a flexibilidade geométrica e a viabilidade econômica de soluções otimizadas, reforçando o potencial de aplicação prática dos resultados obtidos.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar o potencial da utilização do UHPFRC em vigas protendidas como estratégia para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, mantendo-se a capacidade de carga da viga original avaliada. A motivação central da pesquisa esteve associada à necessidade de conciliar desempenho estrutural e sustentabilidade ambiental, considerando que materiais de alto desempenho, como o UHPFRC, apresentam emissões unitárias elevadas, mas possibilitam concepções estruturais mais esbeltas e eficientes do ponto de vista global. Para atingir esse objetivo, adotou-se uma abordagem numérica baseada em elementos finitos aplicada a uma viga protendida de referência, a partir da qual foram avaliadas soluções em UHPFRC com teores de fibras de 1% e 2%, obtidas por meio de otimização automatizada via algoritmos genéticos, considerando as emissões associadas à subetapa A1 do produto.

Os resultados obtidos demonstraram que o processo de otimização convergiu de forma consistente para configurações estruturalmente viáveis e mais eficientes, evidenciando a robustez dos algoritmos genéticos como ferramenta de apoio ao projeto estrutural sustentável. As vigas em UHPFRC apresentaram seções transversais significativamente menores quando comparadas à viga convencional, sem prejuízo do desempenho mecânico global.

Os valores de emissões totais obtidos para as vigas analisadas foram de 101,86 kgCO<sub>2</sub> para a viga convencional, 78,18 kgCO<sub>2</sub> para a melhor viga em UHPFRC com 1% de fibras e 83,98 kgCO<sub>2</sub> para a melhor viga em UHPFRC com 2% de fibras. Esses resultados indicam reduções globais da ordem de 23,3% e 17,6% nas emissões de CO<sub>2</sub> para as soluções com UHPFRC de 1% e 2% de fibras, respectivamente, em relação à viga convencional. Destaca-se, nesse contexto, a solução com UHPFRC e 1% de fibras como a de menor impacto ambiental, principalmente em função do menor consumo de fibras de aço, material associado a elevados coeficientes de emissão. Ainda assim, ambas as soluções em UHPFRC mostraram-se ambientalmente vantajosas.

A análise dos pesos próprios das vigas evidenciou reduções expressivas também. A viga convencional apresentou peso total de aproximadamente 5,42 kN, enquanto as vigas em UHPFRC com 1% e 2% de fibras apresentaram, respectivamente, cerca de 2,72 kN e 2,70 kN. Esses valores correspondem a reduções da ordem de 49,8% e

50,2% em relação à viga de referência. A significativa redução do peso próprio está diretamente associada à eficiência da otimização geométrica da estrutura como um todo. Vigas mais leves implicam menores ações permanentes transmitidas a apoios, pilares e fundações, além de favorecerem as etapas de transporte e montagem em obra.

De forma geral, os resultados obtidos permitem concluir que a utilização do UHPFRC em vigas protendidas apresenta elevado potencial para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, desde que associada a estratégias projetuais de desmaterialização e otimização estrutural. A combinação entre materiais de alto desempenho e métodos de otimização computacional mostrou-se essencial para a obtenção de soluções estruturalmente eficientes e ambientalmente mais favoráveis, superando abordagens tradicionais.

Quanto às limitações, o número de processamentos independentes foi restrito pelo elevado custo computacional, o que inviabilizou a realização de um conjunto mais amplo de simulações dentro do tempo disponível. Ademais, a análise ambiental foi restrita à subetapa A1 do ciclo de vida do UHPFRC, visto que, ao se observarem reduções de emissões já nessa etapa, espera-se um desempenho ambiental ainda mais favorável nas fases de uso e fim de vida.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação das análises para outras etapas do ciclo de vida, a investigação de diferentes composições de UHPFRC e a aplicação da metodologia a vigas mais robustas ou a outros tipos de elementos estruturais. Adicionalmente, estratégias voltadas à redução da demanda computacional, como simplificações adicionais do modelo numérico, maior refinamento no código do algoritmo genético e o desenvolvimento de modelos substitutos baseados em aprendizado de máquina ou abordagens analíticas, podem viabilizar estudos mais abrangentes e aprofundados. Por fim, destaca-se que decisões de projeto adotadas ainda na fase de concepção estrutural exercem influência significativa sobre o impacto ambiental de elementos estruturais.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

ABNT. **NBR 7480 – Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ABNT. **NBR 7483 – Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. **A meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced cementitious composites**. *Composite structures*, v. 222, 2019.

AFNOR. **NF P18-710 – National addition to Eurocode 2: Design of concrete structures – Specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)**. Saint-Denis: Association Française de Normalisation, 2016.

AL-AMEEN, E.; BLANCO, A.; CAVALARO, S. **Comparative life cycle assessment of sprayed-UHPC sandwich panels over brick & block cavity construction**. *Engineering structures*, v. 303, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Roadmap Net Zero – Brasil: Construção e Edificação Sustentáveis**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/roadmap-net-zero-brasil>. Acesso em: 8 dez. 2024.

BÄCK, T. **Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms**. New York: Oxford University Press, 1996.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mechanics of Materials**. New York: McGraw-Hill Education, 7th edition, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London: Taylor & Francis, 2nd edition, 2007.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. **Stress-strain relationship for plain concrete in compression**. *American Concrete Institute Journal*, v. 82, p. 797–804, 1985.

CASTRO, D. C.; MENDES, J. C.; KRAHL, P. A.; RIBEIRO, P. DE O. **Optimization of the reinforced concrete beam with UHPFRC with a focus on reducing CO<sub>2</sub> emissions**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1536, n. 1, p. 012037, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1536/1/012037>. Acesso em: 20 set. 2025.

CEN. **EN 15804 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products.** Brussels: European Committee for Standardization, 2012.

CHI, Y. *et al.* **Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity.** Engineering structures, v. 148, p. 23–35, 2017.

DARWIN, C. **On the Origin of Species.** S.L.: Alma Classics, 1859.

DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus User's Guide.** Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2024.

DE JONG, K. A. **An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems.** 1975. Tese (Doutorado em Computer and Communication Sciences) – University of Michigan, Ann Arbor, 1975.

DE JONG, K. A.; FOGEL, L. J.; SCHWEFEL, H.-P. **The handbook of evolutionary computation.** Bristol: Institute of Physics Publishing; New York: Oxford University Press, 1997.

DIN. **EN 14889-1 – Fibres for concrete – Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity.** Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2006.

DRÉO, J. *et al.* **Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies.** Berlin: Springer-Verlag, 2006.

DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. **Soil mechanics and plastic analysis or limit design.** Quarterly of Applied Mathematics. Brown University, v. 10, n. 2, p. 157–165, 1952.

DU, J. *et al.* **New development of ultra-high-performance concrete (UHPC).** Composites. Part B, Engineering, v. 224, n. 109220, p. 109220, 2021.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to evolutionary computing.** Berlin: Springer, 2003.

EISA, A. S.; *et al.* **Experimental and numerical investigation of prestressed concrete beams strengthened with UHPC.** Buildings, v. 14, n. 1, 2024.

FAN, J. *et al.* **Sustainable reinforced concrete design: The role of ultra-high performance concrete (UHPC) in life-cycle structural performance and environmental impacts.** Engineering structures, v. 316, 2024.

FEGHALI, R.; *et al.* **Genetic-algorithm-based optimization of reinforced UHPC beam cross-sections for material efficiency.** Engineering Structures, v. 307, 2024.

FEHLING, E. *et al.* **Ultra-high performance concrete UHPC: Fundamentals, design, examples**. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2014.

FERROGLOBE. **Environmental Product Declaration – Silica fume**. Disponível em: <[https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1107.EPD\\_Ferroglobe\\_Silica\\_Fume.pdf](https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1107.EPD_Ferroglobe_Silica_Fume.pdf)>. Acesso em: 7 nov.2025.

FU, S.-Y.; LAUKE, B. **An analytical characterization of the anisotropy of the elastic modulus of misaligned short-fiber-reinforced polymers**. Composites science and technology, v. 58, n. 12, p. 1961–1972, 1998.

GARCÍA-SEGURA, T. **Life cycle assessment and optimization of reinforced concrete structures**. Latin American Journal of Solids and Structures, v. 11, p. 1595–1613, 2014.

GIDRÃO, G. M. S. **Estudo numérico e experimental do comportamento cíclico de vigas I protendidas de concreto de altíssimo desempenho**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: 2020.

GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GLOBALABC). **Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. 2020. Disponível em: [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/GlobalABC\\_Roadmap\\_for\\_Buildings\\_and\\_Construction\\_2020-2050\\_3.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/GlobalABC_Roadmap_for_Buildings_and_Construction_2020-2050_3.pdf). Acesso em: 8 dez. 2024.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **Actions to a net zero future - GCCS | Staging**. Disponível em: <<https://gccassociation.org/concretefuture/actions-to-a-net-zero-future/>>. Acesso em: 8 dez. 2024.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. 1st. ed. Addison-Wesley Professional, 1989.

GRAYBEAL, B.; BABY, F. **Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete**. ACI Materials Journal. n, p. 177–186, 2013.

HOANG, A. L.; FEHLING, E. **Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete**. Construction and Building Materials, p. 790–806, 2017.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

HORDIJK, D.A. **Local approach to fatigue of concrete**. PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1991.

INSTEEL. **Environmental Product Declaration – Prestressing steel strand**. Disponível em: <[https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1042.Final\\_Insteel\\_EPD\\_for\\_PC\\_Strand\\_2023.10.09.pdf](https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1042.Final_Insteel_EPD_for_PC_Strand_2023.10.09.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2025.

ISMAEL, M. A.; HAMEED, M. A. **Structural behavior of hollow-core reinforced self-compacting concrete beams**. SN Applied Sciences, v. 4, 2022.

JOE, M.; MOUSTAFA, M. A. **Environmental and economic assessment of UHPC bridge piers**. Proceedings of the Second International Interactive Symposium on UHPC, 2016.

JUNDU. **Environmental Product Declaration – Ground silica**. Disponível em: <<https://jundu.com.br/wp-content/uploads/2024/03/certificado-epd-jundu-ground-silic.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2025.

KANG, S.-T.; KIM, J.-K. **The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC)**. Cement and concrete research, v. 41, n. 10, p. 1001–1014, 2011.

KATO, R.; PAIVA, V.; IZIDORO, S. **Algoritmos genéticos**. BIOINFO – Revista Brasileira de Bioinformática e Biologia Computacional, v. 1, ed. 1, 2021.

KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, M. K. **Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation**. Engineering structures, v.170, p. 63–77, 2018.

KRAVANJA, G.; MUMTAZ, A. R.; KRAVANJA, S. **A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of ultra-high-performance concrete (UHPC)**. Buildings, v. 14, n. 2, p. 382, 2024.

LEE, J. H.; FENVES, G. L. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures**. Journal of engineering mechanics, v. 124, n. 8, p. 892–900, 1998.

LI, J. *et al.* **Durability of ultra-high performance concrete – A review**. Construction and building materials, v. 255, 2020.

LI, V. C.; STANG, H.; KRENCHER, H. **Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete**. Materials and structures, v. 26, n. 8, p. 486–494, 1993.

LUBLINER, J. *et al.* **A plastic-damage model for concrete**. International journal of solids and structures, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

MA, J.; SCHNEIDER, H.; WU, Z. **Fracture-mechanics parameters of UHPC, in Innovations in construction: Ultra-high-strength concrete**. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2003.

MACGREGOR, J. G.; WIGHT, J. K. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. 6. ed. Boston: Pearson Education, 2012.

MARTÍNEZ, L. C. **Otimização dos circuitos de refrigerante nos trocadores de calor de sistemas de refrigeração por compressão de vapor**. Tese (doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro: 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties, and materials**. United States of America: McGraw-Hill Companies, 2006.

METALPRODUCTS. **Environmental Product Declaration – Steel fibers for concrete**. Disponível em: <[https://www.mrpi.nl/epd-files/epd/1.1.00457.2023\\_MRPI-EPD\\_Steel%20fibers%20for%20concrete-%20mortar%20and%20grout\\_FINAL.pdf](https://www.mrpi.nl/epd-files/epd/1.1.00457.2023_MRPI-EPD_Steel%20fibers%20for%20concrete-%20mortar%20and%20grout_FINAL.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2025.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

MONTAUTE, L.; *et al.* **Strategies and design challenges for topology optimization of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete precast beams**. International Journal of Civil Infrastructure, v. 1, n. 1, 2024.

MOURA, G. A. **Otimização de sistemas estruturais mistos aço-UHPFRC com foco na sustentabilidade**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, 2025.

NAAMAN, A. E. **Prestressed concrete analysis and design: Fundamentals**. 2. ed. Ann Arbor, MI: Techno Press 3000, 2012.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS). Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

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

POMPONI, F.; MONCASTER, A. **Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say?** Energy and Buildings, v. 129, p. 193–203, 2016.

RIBEIRO, P. DE O. **Calibração automática de modelos em elementos finitos por meio de métodos de otimização e análise modal**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: 2019.

RIBEIRO, P. *et al.* **Calibração automática de modelo numérico: abordagem de problema inverso**. CILAMCE 2019. Proceedings of the XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2019.

RIBEIRO, P. DE O.; KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R. **Calibration of group effect parameters through genetic algorithms for micromechanical modeling of UHPFRC**. *Composite structures*, v. 280, 2022.

RIBEIRO, P. DE O. **Contributions to a constitutive model for Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: 2023.

SAMEER, H.; *et al.* **Environmental assessment of ultra-high-performance concrete using carbon, material and water footprint**. *Materials*, v. 12, n. 6, 2019.

SCHIESSL, P.; MAZANEC, O.; LOWKE, D. **Investigations on the workability and microstructure development of UHPC**; Part 1: Effect of superplasticisers and silica fume on mixing and workability of UHPC. *Cement International*, v. 8, n. 4, p. 60–71, 2010.

SCHMIDT, M.; FEHLING, E. **Ultra High Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe**. *ACI Spec*, v. 228, p. 51–77, 2005.

SCHMIDT, M.; JEREVIC, D. **Basis for Sustainable Structures - the Gaertnerplatz Bridge in Kassel**. In: FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; STÜRWARD, S. (Eds.). *Ultra High Performance Concrete (UHPC), 2nd Intl. Symp. on Ultra High Performance Concrete*. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2008. p. 619–625.

SHEN, D.; *et al.* **Effect of coarse aggregate incorporation on mechanical and durability performance of UHPC**. *Construction and Building Materials*, v. 392, 2024.

SHI, C.; *et al.* **Life cycle assessment of ultra-high-performance concrete: a comparative study**. *Construction and Building Materials*, v. 99, p. 152–162, 2015.

SIDAC – Sistema de Informações do Desempenho Ambiental da Construção. Disponível em: <<https://sidac.org.br/busca>>. Acesso em: 7 nov. 2025.

SIKA. **Environmental Product Declaration – Plasticizing concrete superplasticizers**. Disponível em: <[https://grc.sika.com/dam/dms/gr01/9/EPD\\_Plasticizing\\_Concrete\\_Superplasticizers.pdf](https://grc.sika.com/dam/dms/gr01/9/EPD_Plasticizing_Concrete_Superplasticizers.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico Temático – Visão Geral Água e Esgoto**. Disponível em: <[https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_AE\\_SNIS\\_2023.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2025.

STANKIEWICZ, W.; ROSZAK, R.; MORZYŃSKI, M. **Genetic algorithm-based calibration of reduced order Galerkin models**. *Computers & Chemical Engineering*, v. 35, n. 2, p. 238–246, 2011.

SU, Y. *et al.* **Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC**. Construction and building materials, v. 114, p. 708–718, 2016.

TANAKA, Y.; MAEKAWA, K.; KAMEYAMA, Y. **The innovation and application of UHPFRC Bridges in Japan**. In: TOUTLEMONDE, F.; RESPLENDINO, J. (Eds.). Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, Part III, New Frontiers for Bridges. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Important notice: embodied carbon**. Disponível em: <<https://www.istructe.org/>>. Acesso em: 7 nov. 2025.

ULM, F. J. **Innovationspotenzial Beton: Von Atomen zur Grünen Infrastruktur**. Beton und Stahlbetonbau, v. 107, n. 8, p. 553–559, 2012.

UMBARKAR, A. J.; SHETH, P. D. **Crossover operators in genetic algorithms: a review**. ICTACT Journal on Soft Computing, v. 6, n. 1, p. 1083–1092, 2015.

VERGLASS. **Environmental Product Declaration – Miraglass and Miragrit**. Disponível em: <[https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1174.Verglass\\_Miraglass\\_and\\_Miragrit\\_EPD\\_protected.pdf](https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/1174.Verglass_Miraglass_and_Miragrit_EPD_protected.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2025.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. **Fracture energy of uhp-frc under direct tensile loading**. In: FraMCoS-7 international conference: p. 65–72, 2010.

WU, Z. *et al.* **Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete**. Construction and building materials, v. 103, p. 8–14, 2016.

YOO, D.-Y.; BANTHIA, N. **Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review**. Cement and Concrete Composites, v. 73, p. 267–280, 2016.

ZHANG, X.; ZHANG, X. **Sustainable design of reinforced concrete structural members using embodied carbon emission and cost optimization**. Journal of building engineering, v. 44, 2021.

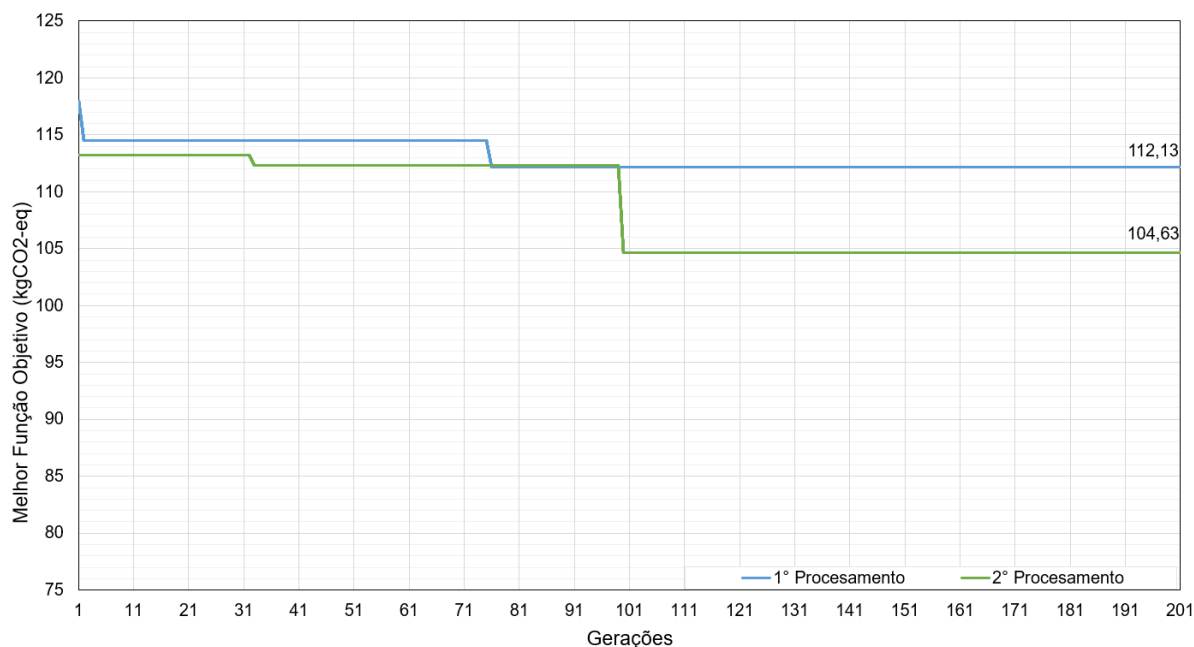
ZHOU, B.; *et al.* **Mechanical performance and sustainability assessment of UHPFRC with hybrid fiber systems**. Cement and Concrete Composites, v. 122, 2021.

## APÊNDICE A

### A.1 UHPFRC-VF1% (185,3 MPA)

Testes preliminares foram realizados com a adoção de UHPFRC com 1% em volume de fibras, apresentado por Fan *et al.* (2024), com resistência à compressão de 185,3 MPa, resistência à tração de 7,0 MPa e módulo de elasticidade de 53,5 GPa. Mantiveram-se constantes as propriedades mecânicas das armaduras ativas e passivas (Tabela 3 e Tabela 4), bem como os demais parâmetros de entrada das curvas constitutivas e do modelo numérico (Tabela 6 e Tabela 8). Foram realizados dois processamentos, respeitando-se os mesmos parâmetros do algoritmo genético (seleção, reprodução, mutação, critério de parada e restrições geométricas). Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> por metro cúbico do UHPFRC, adotaram-se as proporções específicas de seus constituintes, juntamente com os coeficientes de emissão previamente definidos. Por fim, realizou-se um comparativo das emissões totais de CO<sub>2</sub> e do peso próprio entre a viga em UHPFRC, associada ao melhor valor da função objetivo, e a viga de concreto convencional de referência.

Figura AP1 – Evolução do algoritmo genético



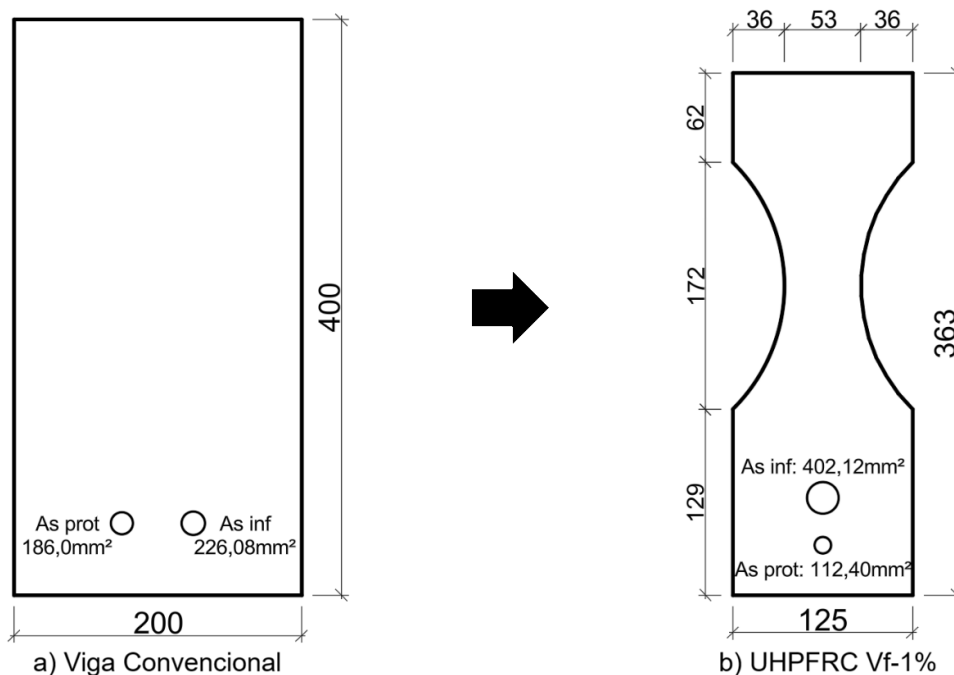
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP2 – Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto

A1 - MATÉRIA PRIMA			
Matéria-prima	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de emissão (kgCO <sub>2</sub> /unid.)	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	712	0.88535	630.3692
Cinzas volantes	0	0.00	0
Escória alto-forno	0	0.06574	0
Sílica fume	231	0.052	12.012
Brita	0	0.0023345	0
Areia	0	0.006255	0
Areia de Sílica	1020	0.0232	23.664
Pó de vidro	211	0.11	23.21
Água	109	0.0000469	0.00511
Superplastificante	61	0.672	40.992
Fibra de aço	79	1.53	120.87
		<b>TOTAL A1:</b>	<b>851.12</b>

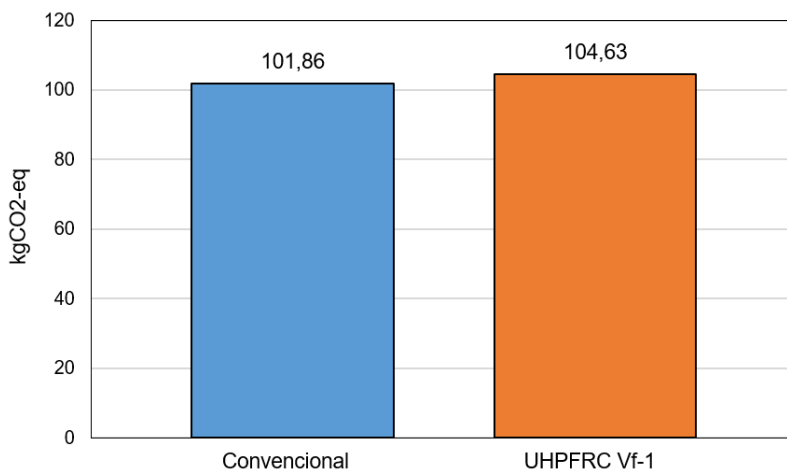
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP3 – Seção transversal otimizada



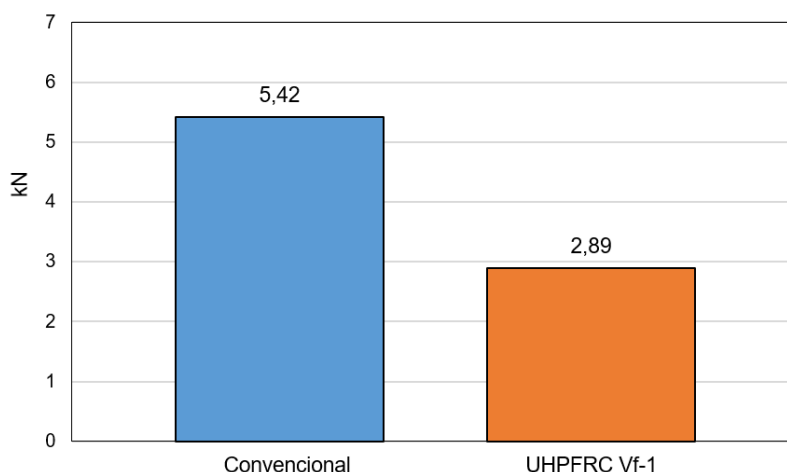
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP4 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP5 – Peso próprio das vigas



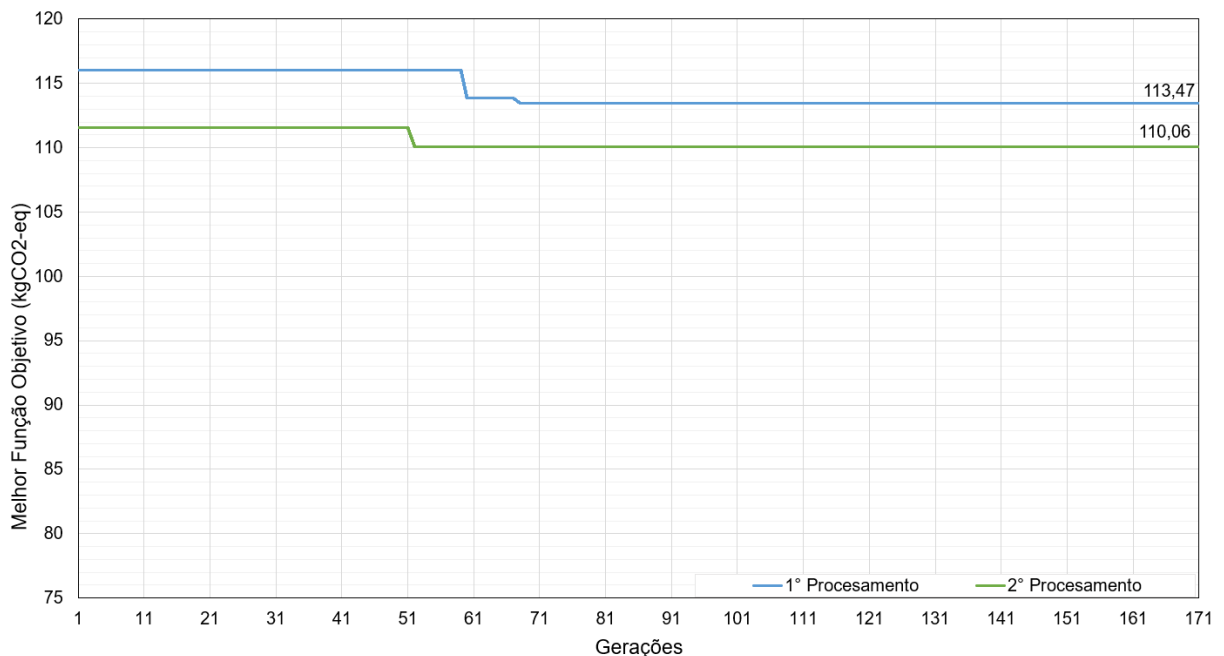
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Verifica-se que este UHPFRC de resistência superior apresentou uma redução de aproximadamente 46,8% no peso próprio da viga, porém emissões cerca de 2,7% maiores quando comparado à viga de referência em concreto convencional, diferença relativamente pequena que pode, eventualmente, ser revertida com a realização de um número maior de processamentos do algoritmo, visando à obtenção de uma solução ótima mais eficiente. Esse cenário desfavorável pode ser atribuído ao elevado valor de emissões por metro cúbico do material, aliado à desmaterialização limitada por restrições geométricas normativas, como cobrimentos e espaçamentos entre barras. Esses resultados indicam que resistências mais elevadas são mais adequadas para processos de desmaterialização de seções estruturais mais robustas, nos quais a otimização tende a ser menos restritiva.

## A.2 UHPFRC-VF2% (185,8 MPA)

Foram conduzidos testes preliminares com a utilização do UHPFRC contendo 2% em volume de fibras, apresentado por Fan *et al.* (2024), com resistência à compressão de 185,8 MPa, resistência à tração de 10,5 MPa e módulo de elasticidade de 53,5 GPa. As propriedades mecânicas das armaduras ativas e passivas foram mantidas inalteradas (Tabela 3 e Tabela 4), assim como os demais parâmetros de entrada das curvas constitutivas e do modelo numérico (Tabela 6 e Tabela 8). Executaram-se dois processamentos, adotando-se os mesmos parâmetros do algoritmo genético, incluindo critérios de seleção, reprodução, mutação, parada e restrições geométricas. Para a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> por metro cúbico do UHPFRC, consideraram-se as proporções específicas de seus constituintes em conjunto com os coeficientes de emissão previamente estabelecidos. Por fim, procedeu-se à comparação das emissões totais de CO<sub>2</sub> e do peso próprio entre a viga em UHPFRC, correspondente à solução de melhor valor da função objetivo, e a viga de concreto convencional de referência.

Figura AP6 – Evolução do algoritmo genético



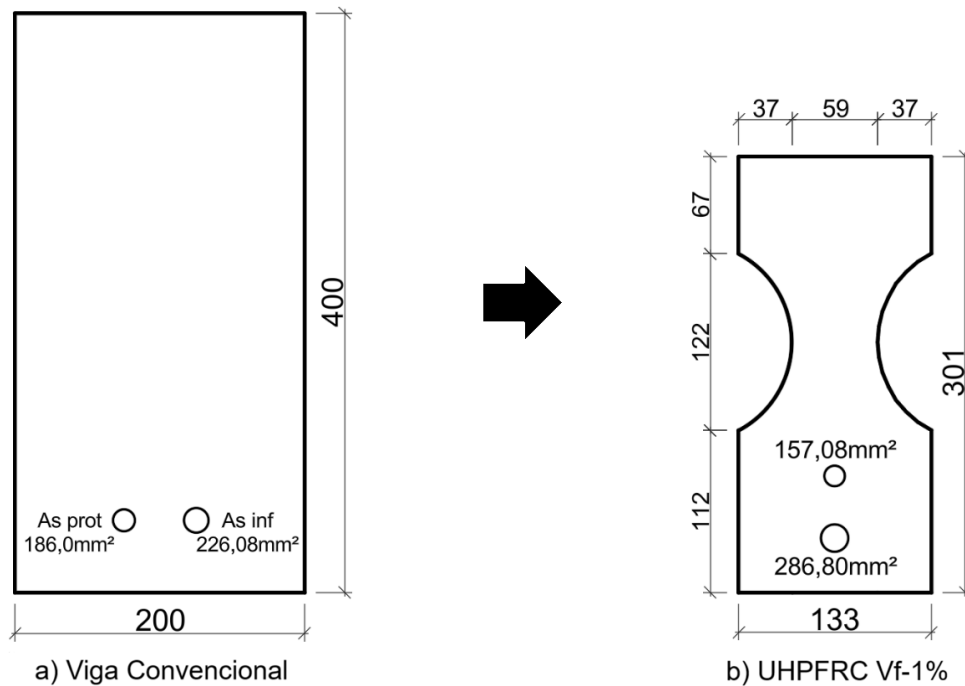
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP7 – Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto

A1 - MATÉRIA PRIMA			
Matéria-prima	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de emissão (kgCO <sub>2</sub> /unid.)	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	712	0.88535	630.3692
Cinzas volantes	0	0.00	0
Escória alto-forno	0	0.06574	0
Sílica fume	231	0.052	12.012
Brita	0	0.0023345	0
Areia	0	0.006255	0
Areia de Sílica	1020	0.0232	23.664
Pó de vidro	211	0.11	23.21
Água	109	0.0000469	0.00511
Superplastificante	61	0.672	40.992
Fibra de aço	157	1.53	240.21
		<b>TOTAL A1:</b>	<b>970.46</b>

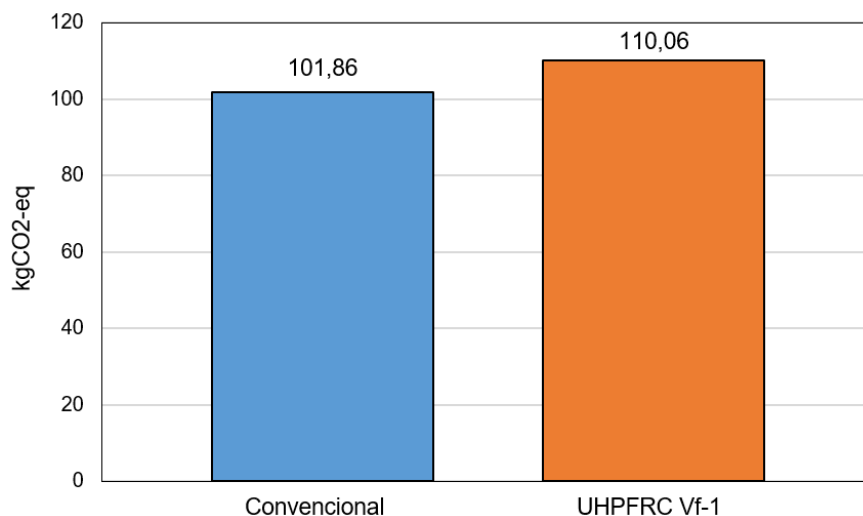
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP8 – Seção transversal otimizada



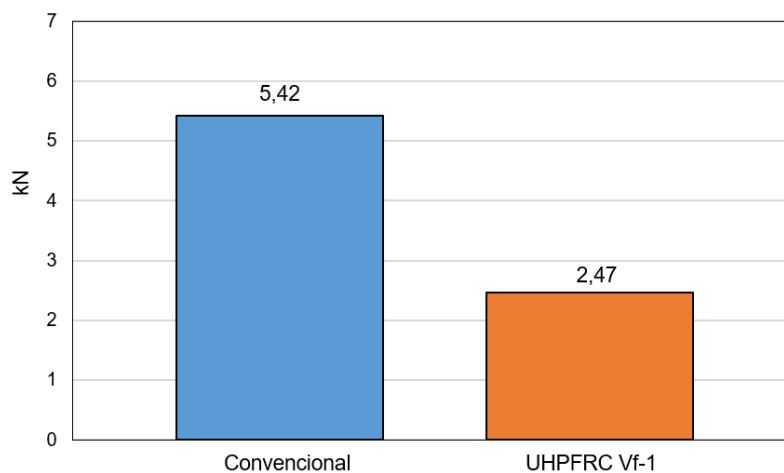
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP9 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Figura AP10 – Peso próprio das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

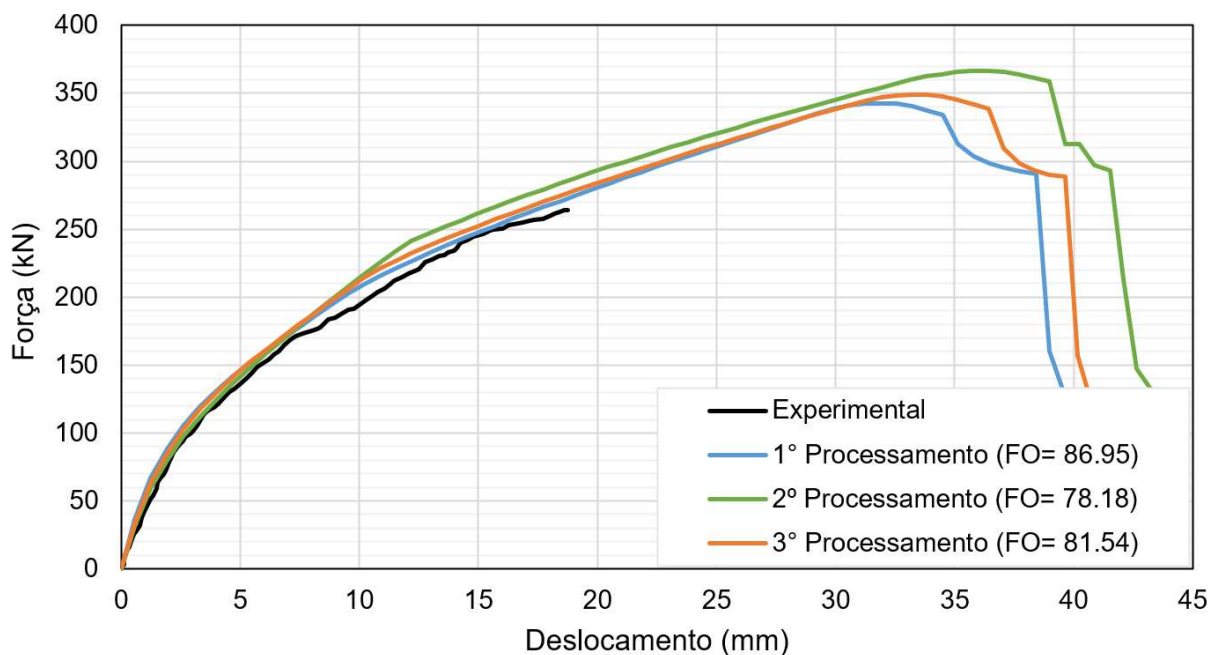
Observa-se que este UHPFRC de resistência superior, apesar de apresentar uma redução de aproximadamente 54,4% no peso próprio (a maior redução observada neste trabalho) apresentou cerca de 8,0% a mais de emissões de CO<sub>2</sub> quando comparado à viga de referência em concreto convencional. Esse comportamento é predominantemente atribuído ao elevado valor de emissões por metro cúbico do material. Além disso, embora a solução tenha apresentado a menor altura das seções transversais, sua largura permaneceu ligeiramente superior ao valor mínimo estabelecido. Por fim, esses resultados sugerem que resistências intermediárias tendem a ser mais eficientes em seções mais esbeltas, nas quais a desmaterialização torna-se mais limitada.

## APÊNDICE B

Este apêndice apresenta as curvas força–deslocamento completas das vigas em UHPFRC com 1% e 2% de fibras, correspondentes às soluções ótimas obtidas nos três processamentos independentes do algoritmo genético. As curvas são exibidas em toda a sua extensão, incluindo o comportamento pós-pico até a ruptura numérica, com o objetivo de complementar a análise apresentada no corpo do trabalho. Ressalta-se que o critério de avaliação estrutural adotado na otimização foi baseado no intervalo de deslocamentos do ensaio experimental.

### B.1 CURVAS COMPLETAS UHPFRC-VF1% (136,8 MPA)

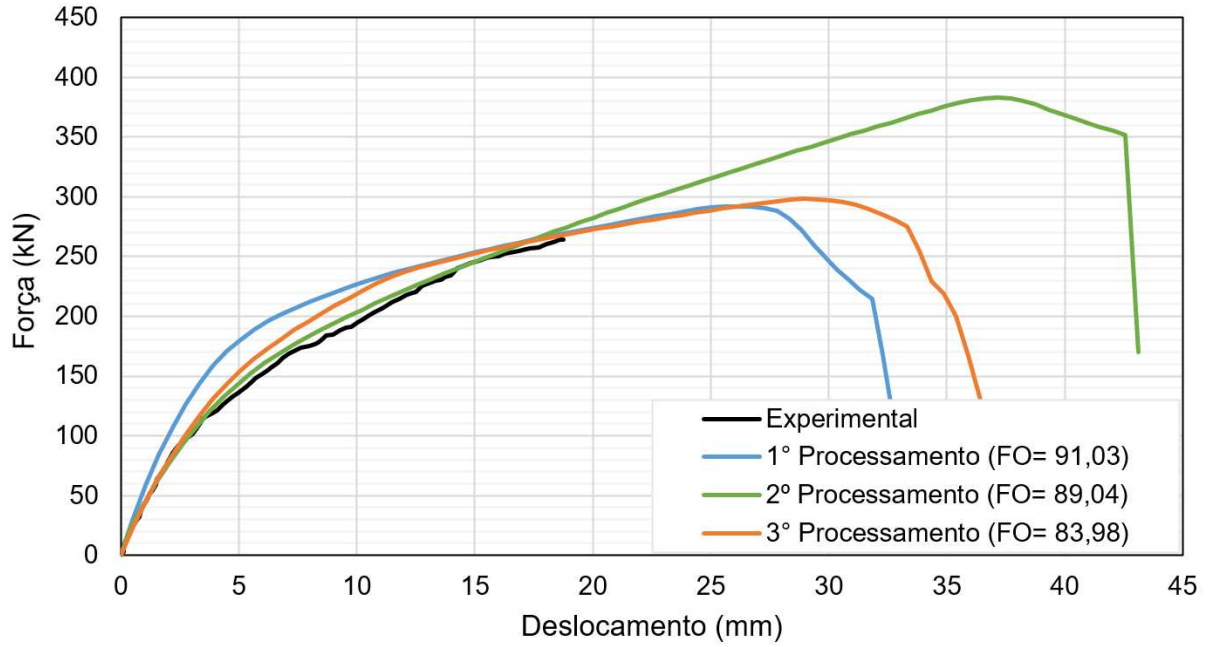
Figura AP11 – Curvas completas dos processamentos com UHPFRC-VF1%



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

## B.2 CURVAS COMPLETAS UHPFRC-VF2% (138 MPA)

Figura AP12 – Curvas completas dos processamentos com UHPFRC-VF2%



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).