

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO ALMEIDA DE MOURA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS AÇO-UHPC COM
SEÇÃO-I E LAJE NERVURADA DE PONTES PARA MINIMIZAÇÃO
DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

MARINGÁ

2025

GUSTAVO ALMEIDA DE MOURA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS AÇO-UHPC COM
SEÇÃO-I E LAJE NERVURADA DE PONTES PARA MINIMIZAÇÃO
DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl

Coorientadora: Profa. Dra. Paula de Oliveira
Ribeiro

MARINGÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

M929o

Moura, Gustavo Almeida de

Otimização estrutural de vigas mistas aço-UHPC com seção-I e laje nervurada de pontes para minimização de impactos ambientais / Gustavo Almeida de Moura. -- Maringá, PR, 2025.

91 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl.

Coorientadora: Profa. Dra. Paula de Oliveira Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Otimização estrutural. 2. Concreto de ultra alto desempenho (UHPC). 3. Algoritmos genéticos. 4. Sustentabilidade. I. Krahl, Pablo Augusto, orient. II. Ribeiro, Paula de Oliveira, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 691.3

GUSTAVO ALMEIDA DE MOURA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS AÇO-UHPC
COM SEÇÃO-I E LAJE NERVURADA DE PONTES PARA
MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 18/02/2025, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

 **PABLO AUGUSTO KRAHL**
Data: 20/02/2025 10:36:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professor Orientador

Documento assinado digitalmente

 **PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO**
Data: 18/02/2025 16:02:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Paula de Oliveira Ribeiro
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
Professora Coorientadora

Documento assinado digitalmente

 **FELIPE PIANA VENDRAMELL FERREIRA**
Data: 20/02/2025 10:32:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Piana Vendramell Ferreira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Documento assinado digitalmente

 **AFONSO CELSO DE CASTRO LEMONGE**
Data: 18/02/2025 17:51:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Afonso Celso de Castro Lemonge
Faculdade de Engenharia
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelas graças recebidas ao longo desta jornada. A Ele, que sempre abençoou meu caminho, iluminou meus pensamentos e me protegeu em cada passo.

Aos meus pais, Rosângela e José Pedro, por todo amor, apoio incondicional e por serem meus pilares. Por me ensinarem os valores que carrego e por sempre acreditarem no meu potencial.

À minha família, pelo carinho, pela torcida e por sempre acreditarem no meu sucesso. Em especial, à minha irmã e ao meu primo Vinícius, por todo apoio ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador e amigo, Pablo Krahl, pela excelente orientação, pela paciência, pelos inúmeros ensinamentos transmitidos com dedicação e pelas longas conversas sobre engenharia e sobre a vida. Sou profundamente grato pelo respeito e incentivo constantes, que foram essenciais para minha evolução acadêmica e profissional.

À minha coorientadora e amiga, Paula Ribeiro, pela dedicação e pelo olhar atento em cada detalhe deste trabalho. Pela paciência e agilidade em ajudar a solucionar os erros do código desenvolvido e, principalmente, pela disposição em contribuir para que este estudo fosse realizado da melhor forma possível. Além disso, sou grato pelas conversas que iam além do trabalho, deixando a orientação mais leve ao longo do mestrado.

Meu sincero agradecimento a ambos por me incentivarem a crescer e a me desenvolver, não apenas na pesquisa e na docência, mas também para a vida.

Aos meus amigos, pelo companheirismo, pela amizade e pelo apoio nos momentos difíceis e nas conquistas. Em especial, ao Eduardo, Vinícius Ramos, Vinícius Parolin, Adriano, André, Guilherme, Mariana, Jonas, Igor e Mateus, pela ajuda ao longo do mestrado e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do programa de mestrado, pelo conhecimento compartilhado e pelas contribuições na minha formação.

Aos servidores da UEM, pelo suporte e auxílio prestados durante essa jornada acadêmica.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória, meu muito obrigado!

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

RESUMO

Com o aumento das emissões de CO₂ e as mudanças climáticas resultantes, há uma urgência em reduzir as emissões de carbono até 2050. As pontes, que desempenham um papel essencial na infraestrutura moderna, estão cada vez mais expostas a eventos climáticos extremos. Para enfrentar esses desafios, é necessário adotar soluções inovadoras que utilizem materiais avançados, como o concreto de ultra alto desempenho (UHPC), enquanto se busca minimizar as emissões de carbono associadas à sua produção e utilização. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo otimizar um sistema estrutural misto composto por aço e UHPC, formado por um perfil I e uma laje nervurada, visando oferecer uma solução mais sustentável em comparação com os métodos convencionais. A otimização foi conduzida com o uso de Algoritmos Genéticos (AGs), que avaliaram uma população inicial de 30 indivíduos ao longo de 10 gerações, totalizando 300 soluções estruturais. Três resistências de UHPC foram consideradas (120 MPa, 150 MPa e 180 MPa), e os resultados indicaram que, conforme a resistência do UHPC diminuiu, as emissões de CO₂ também se reduziram. As soluções com UHPC de 120 MPa apresentaram uma redução global de até 5% nas emissões de CO₂ em relação à estrutura convencional na fase de produto, demonstrando seu maior potencial de sustentabilidade. Em contrapartida, as soluções com UHPC de 150 MPa e 180 MPa apresentaram emissões superiores às da estrutura convencional. A introdução de materiais cimentícios suplementares, como o CGBS (Granulado de Alto-Forno), mostrou-se eficaz na redução do consumo de cimento, contribuindo para traços com alta resistência e menor impacto ambiental. Acredita-se que a utilização de peças mais leves durante a etapa de construção (A4) pode reduzir as emissões associadas ao transporte e movimentação de materiais, além de diminuir o peso total da superestrutura, o que leva a uma redução no consumo de materiais em pilares e fundações. Os materiais avançados, como o UHPC, oferecem maior durabilidade e resistência contra intempéries, aspectos essenciais para enfrentar a previsão de eventos climáticos mais severos decorrentes do aquecimento global. Como resultado, espera-se uma redução nas emissões de CO₂ durante as fases de uso e manutenção devido à menor necessidade de intervenções ao longo da vida útil da ponte. Por fim, as soluções com UHPC de 120 MPa demonstraram um elevado potencial para atender às exigências estruturais, mantendo rigidez, ductilidade e carga máxima, ao mesmo tempo que reduziram as emissões de CO₂ na fase de produto. A pesquisa evidencia que a escolha da solução ideal deve equilibrar desempenho estrutural, durabilidade e impacto ambiental, contribuindo para o desenvolvimento de pontes mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Otimização estrutural, Algoritmos genéticos, Sustentabilidade, Emissão de CO₂, materiais avançados, UHPC, UHFRC.

ABSTRACT

Rising CO₂ emissions and the resulting climate change have created an urgent need to reduce carbon footprints by 2050. Bridges, which play a crucial role in modern infrastructure, are increasingly exposed to extreme weather events. To address these challenges, it is necessary to adopt innovative solutions that utilize advanced materials, such as ultra-high-performance concrete (UHPC), while minimizing the carbon emissions associated with their production and use. In this context, this research aimed to optimize a composite structural system composed of steel and UHPC, consisting of an I-profile and a ribbed slab, to provide a more sustainable solution compared to conventional methods. The optimization was conducted using Genetic Algorithms (GAs), which evaluated an initial population of 30 individuals over 10 generations, totaling 300 structural solutions. Three UHPC strengths were considered (120 MPa, 150 MPa, and 180 MPa), and the results indicated that as UHPC strength decreased, CO₂ emissions also reduced. Solutions with 120 MPa UHPC showed an overall reduction of up to 5% in CO₂ emissions compared to the conventional structure in the product phase, demonstrating its greater sustainability potential. Conversely, solutions with 150 MPa and 180 MPa UHPC had higher emissions than the conventional structure. The introduction of supplementary cementitious materials, such as GGBS, proved effective in reducing cement consumption, contributing to high-strength mixtures with a lower environmental impact. It is believed that using lighter components during the construction phase (A4) can reduce emissions associated with material transport and handling, in addition to decreasing the total weight of the superstructure, which leads to reduced material consumption in columns and foundations. Advanced materials like UHPC offer greater durability and resistance to weather conditions, essential aspects for addressing the predicted increase in severe climate events due to global warming. As a result, a reduction in CO₂ emissions is expected during the usage and maintenance phases due to the lower need for interventions throughout the bridge's service life. Finally, the 120 MPa UHPC solutions demonstrated high potential to meet structural requirements, maintaining stiffness, ductility, and maximum load while reducing CO₂ emissions in the product phase. The research highlights that selecting the optimal solution should balance structural performance, durability, and environmental impact, contributing to the development of more efficient and sustainable bridges.

Keywords: Structural optimization, Genetic algorithms, Sustainability, CO₂ emissions, Advanced materials, UHPC, UHFRC.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	15
CAPÍTULO 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	17
2.1 PISOS MISTOS – AÇO E CONCRETO	17
2.1.1 PISOS DE LAJE NERVURADA EM UHPC	17
2.1.2 PISOS MISTOS – AÇO E UHPC	21
2.2 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CARBONO EM PONTES UTILIZANDO MATERIAIS DE ALTO DESEMPENHO.....	25
2.3 ALGORIMOS GENÉTICOS.....	28
2.3.1 SELEÇÃO	31
2.3.1.1 MÉTODO DA ROLETA	31
2.3.1.2 MÉTODO DE TORNEIO.....	32
2.3.1.3 MÉTODO ELITISTA	32
2.3.2 CRUZAMENTO.....	32
2.3.3 MUTAÇÃO	34
2.3.4 PARÂMETROS GENÉTICOS.....	34
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	36
3 MODELAGEM NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	37
3.1 GEOMETRIA DA VIGA MISTA - ZHU <i>ET AL.</i> (2021).....	37
3.2 GEOMETRIA DA VIGA MISTA CONVENCIONAL CBCA. (2020).....	40
3.3 MODELO NUMÉRICO	41
3.3.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	42
3.3.1.1 MALHA DO MODELO	45
3.3.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO	47
3.3.1.3 CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS ESTRUTURAIS (INTERAÇÕES) E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO.....	48
3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	50
3.5 AUTOMATIZAÇÃO DA ESTRUTURA MISTA UTILIZANDO AGs.....	51
3.6 CÁLCULO DE EMISSÃO DE CARBONO.....	54
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ZHU <i>ET AL.</i> (2021).....	59
4.2 ESTRUTURA CONVENCIONAL	62
4.3 CÁLCULO DE EMISSÃO DE CARBONO.....	63
4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ESTRUTURAL.....	66
4.5 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	71
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A.....	87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em 2020, 37% das emissões de CO₂ foram atribuídas ao setor da construção civil (UNEP, 2021). Dentre as obras civis, destacam-se as pontes, que desempenham um papel fundamental na infraestrutura moderna e na vida das pessoas, uma vez que conectam áreas urbanas e rurais, promovem o crescimento econômico e a eficiência dos transportes (Barker; Puckett, 2021). No entanto, sua construção envolve o uso de grandes quantidades de materiais com elevada emissão de carbono, tais como aço e concreto (Ruck *et al.*, 2023). Além disso, pontes e viadutos apresentam uma maior quantidade de emissão de CO₂/km comparado com ferrovias e rodovias (UIC, 2016).

Em 2020, a emissão antropogênica de CO₂ proveniente da produção de aço e cimento foi de 7-9% e 7-8%, respectivamente (GCCA, 2021; WORLDSTEEL, 2021). Notavelmente, mais de 50% do aço globalmente produzido é destinado à construção civil, enquanto aproximadamente 78% do cimento é empregado nas estruturas de concreto e 22% é utilizado para reboco e argamassa (Cao *et al.*, 2020; Cullen; Allwood; Bambach, 2012). Além disso, há uma projeção anual de crescimento no setor da construção civil de 2,2% até 2060 (INTERNATIONAL RESOURCE PANEL, 2019).

A Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA, 2021) prevê uma contribuição significativa para a meta de zero emissão de CO₂ até 2050, com uma estimativa de 22% de eficiência no projeto e construção em estruturas de concreto. Dentre as estratégias, destacam-se a otimização e aprimoramento dos componentes estruturais, a redução de especificações excessivas, o aumento da durabilidade da estrutura e a adoção de materiais de construção alternativos, como o uso dos materiais de ultra alto desempenho (Habert *et al.*, 2020; Lande; Terje; Thorstensen, 2023; Marsh; Dillon; Bernal, 2023).

A desmaterialização estrutural refere-se à otimização do uso de materiais com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, assegurando, ao mesmo tempo, maior eficiência estrutural e durabilidade (Wernick *et al.*, 1996).

Embora a maioria das pesquisas esteja voltada ao desenvolvimento de novos materiais para tornar o concreto mais sustentável, uma abordagem ainda pouco explorada para a redução das emissões de carbono em elementos estruturais é justamente a desmaterialização na fase de projeto. Essa estratégia envolve o uso de materiais de ultra alto desempenho, como o concreto

de ultra alto desempenho (UHPC), permitindo o dimensionamento de seções mais esbeltas e, conseqüentemente, a redução no consumo de matéria-prima.

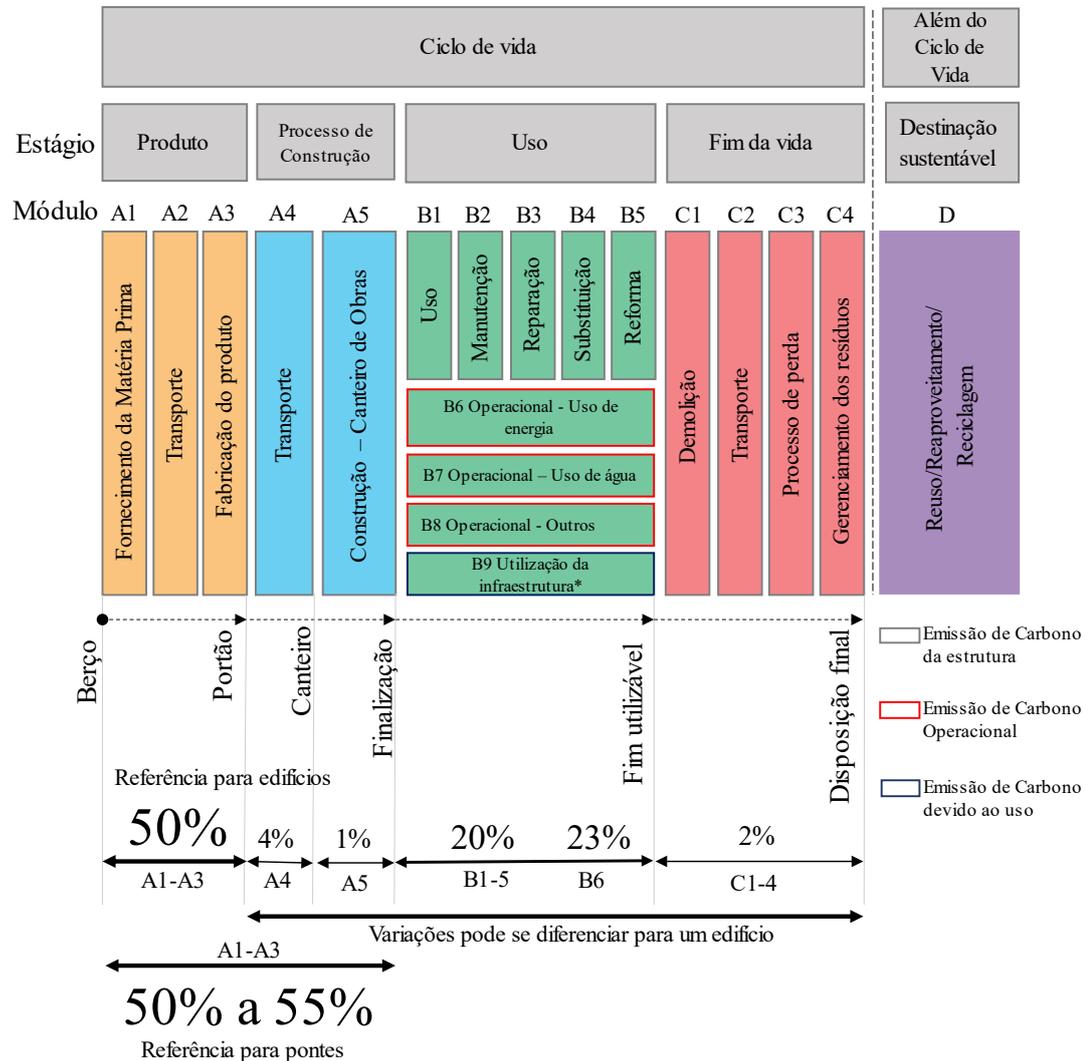
Além disso, pode-se adotar o sistema de viga mista – aço e UHPC – com o uso de conectores de cisalhamento, combinando os efeitos positivos de ambos os materiais e contribuindo ainda mais para a desmaterialização da estrutura.

Algumas pesquisas destacam que a chave para a redução das emissões de carbono ao longo de todo o ciclo de vida de pontes está na otimização do projeto estrutural e na escolha de materiais com maior durabilidade (Collings, 2022; De Paula Filho; Zanon; Glorieux, 2023; Ruck *et al.*, 2023; Wong, 2010). Isso se torna crucial, uma vez que essas estruturas estarão mais suscetíveis a cargas provenientes de eventos ambientais mais severos, os quais tendem a aumentar progressivamente com o aquecimento global (tais como ventos, correntezas, ondas e calor) (NET ZERO BRIDGES GROUP, 2023).

O ciclo de vida de uma estrutura civil é dividido em estágios e módulos, seguindo a BSEN 15978 para os edifícios e PAS 2080 para infraestrutura (**Figura 1**). O termo "estágio" refere-se às etapas gerais do ciclo de vida, abrangendo desde a produção do produto, processo de construção no canteiro, a utilização da estrutura, seu fim de vida e a destinação final. Os "módulos", por outro lado, representam as etapas mais detalhadas dentro de cada estágio. Por exemplo, no estágio do produto, considera-se a produção ou fornecimento da matéria-prima, o transporte dessa matéria-prima até a indústria e, por fim, a confecção do produto final. Por meio deste guia, é possível calcular a emissão de carbono em cada estágio e módulo (THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS, 2022).

O sistema mínimo para a quantificação de carbono emitido na construção de infraestrutura é denominado UPFRONT, que se refere à emissão inicial da estrutura, abrangendo os módulos de A1 a A5. Em outras palavras, esse método quantifica as emissões de carbono desde o A1-3, envolvendo a produção e transporte de materiais, como cimento e aço, até o produto final, como elementos pré-moldados. O escopo se estende até o A4-5, incluindo o transporte e a conclusão da construção da infraestrutura, conforme especificado no guia de emissão destinado a pontes (NET ZERO BRIDGES GROUP, 2023).

Figura 1: Ciclo de vida estrutural



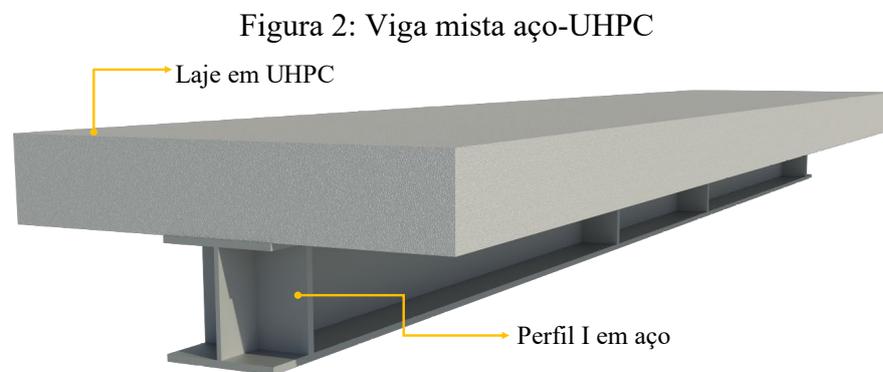
Adaptado: THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (2022).

Para pontes os módulos A1-3 também governam a maior quantidade de emissão de carbono. Contudo, os módulos A4-5 podem ser mais representativos devido a maior movimentação de terra e aterro. O transporte dos materiais, pessoas e maquinários até o canteiro de obras podem ser mais longos que para um edifício. Logo, a emissão de carbono será maior. Além disso, em algumas situações é importante computar, ao menos de forma qualitativa, a quantidade de carbono devido ao uso da infraestrutura (NET ZERO BRIDGES GROUP, 2023):

1. Caso a construção da ponte ou reforma obrigue que os veículos que utilizam essa rota tenham que aumentar o seu percurso, este valor deve ser computado;
2. No projeto, ao escolher entre uma ponte menor com um trajeto mais longo ou uma ponte com vão maior e um trajeto mais curto; e

3. Comparar a emissão do tipo de veículo – rodovia ou ferrovia.

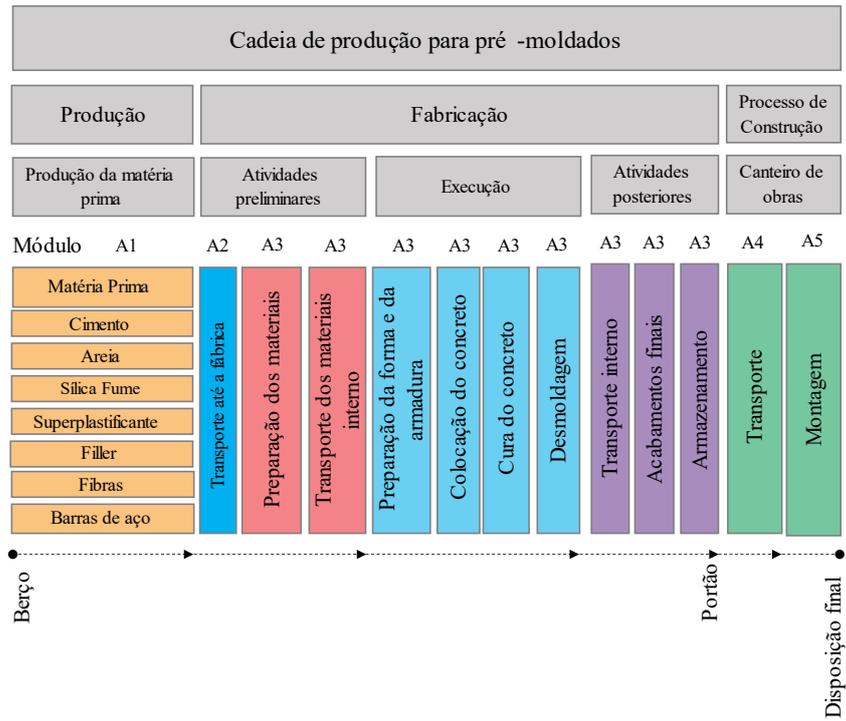
A utilização de vigas mistas aço-UHPC possibilita projetar grandes vãos com menor quantidade de material e seções cada vez mais esbeltas. Este sistema estrutural otimiza a capacidade de ambos os materiais: a elevada resistência à compressão do UHPC e a resistência à tração do aço (**Figura 2**). Além disso, o método construtivo desse componente oferece agilidade e praticidade às construções de pontes viabilizando o processo de construção acelerado de pontes (ABC), uma vez que são pré-fabricados em indústrias. Dessa maneira, torna-se possível reduzir o tempo de construção no canteiro (Benedetty *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2021).



Fonte: Autor (2025)

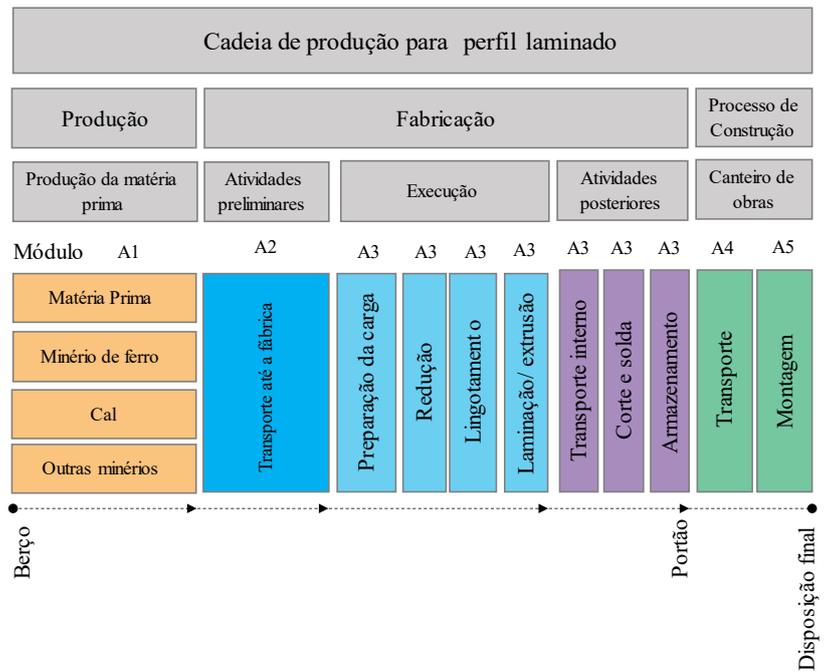
Considerando que uma parcela significativa das emissões de carbono está concentrada na fase do produto, torna-se viável a investigação para a redução dessas emissões em vigas mistas aço-UHPC em toda a cadeia produtiva de um pré-moldado em sua fabricação (**Figura 3**). Isso ocorre não apenas devido à redução na quantidade de material, resultante da desmaterialização das peças estruturais, mas também pelos impactos positivos gerados no processo de fabricação desse produto, como a leveza para transporte e içamento das peças, além da diminuição do número de viagens ao canteiro de obras devido à redução do volume das peças (Debs; Khalil, 2017; Kim; Chae, 2016). Enquanto as lajes são produzidas em uma indústria de pré-moldados, a produção dos perfis é realizada em indústria e sua cadeia produtiva é demonstrada na **Figura 4**.

Figura 3: Cadeia de produção para pré-moldados



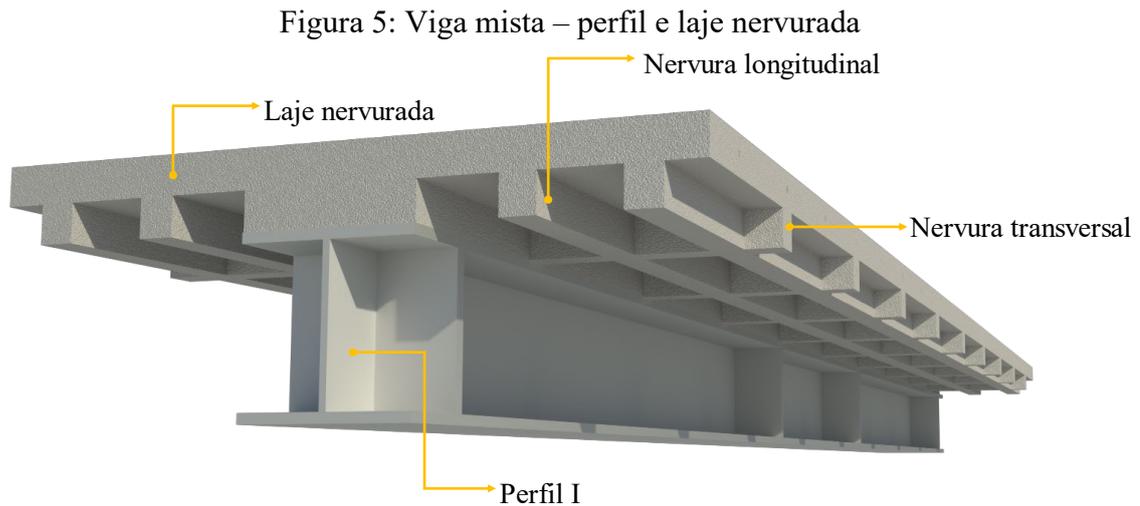
Adaptado: Kim; Chae (2016)

Figura 4: Cadeia de produção para perfil laminado



Adaptado: Cullen; Allwood; Bambach (2012)

A fim de contribuir para a redução de material em vigas mistas aço-UHPC na fase de projeto, Zhu *et al.* (2021) propõem uma otimização estrutural por meio de uma configuração mista com seção I em aço e laje nervurada em UHPC. Essa solução visa melhorar a rigidez global da estrutura, aproveitando a desmaterialização proporcionada pela utilização do UHPC na laje (**Figura 5**).



Adaptado: Zhu *et al.* (2021)

Desta maneira, o objetivo desta pesquisa é otimizar um sistema estrutural misto - composto por aço e concreto de ultra alto desempenho (UHPC) - que consiste em um perfil I e laje nervurada. O intuito é oferecer uma solução mais sustentável em comparação com a solução convencional. O estudo visa demonstrar quais etapas da cadeia produtiva dos elementos que compõem a estrutura mista podem ser beneficiadas com a utilização de materiais de alto desempenho, a fim de reduzir as emissões de CO₂. Para isso, as dimensões, geometria e consumo de materiais serão determinados por meio do método de otimização Algoritmos Genéticos (AGs), buscando uma solução que atenda às solicitações requeridas, mantenha a deslocabilidade controlada e minimize o consumo de materiais. Por fim, será realizada uma comparação das emissões de carbono da fase de produto exclusivamente na superestrutura entre o sistema proposto e o sistema convencional.

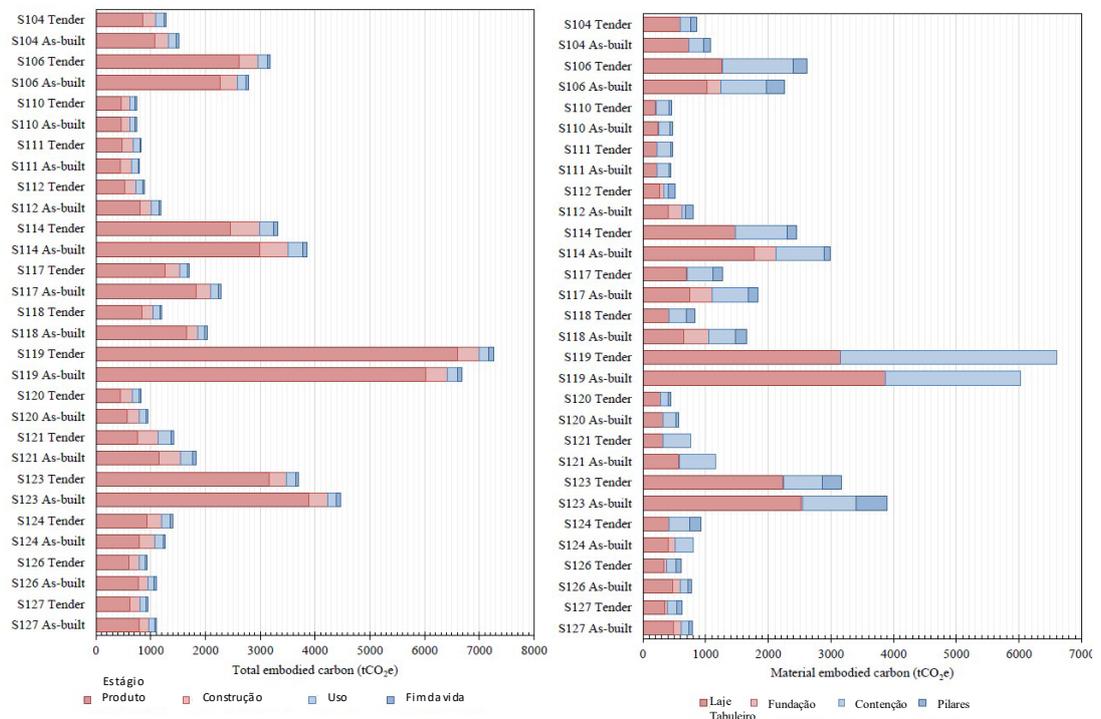
1.1 JUSTIFICATIVA

No estudo conduzido por Watt (2019), foi realizada uma análise das emissões de carbono de 15 pontes, durante duas fases distintas: a fase de projeto, chamada de "*tender*", e a fase pós-construção, referida como "*as built*" na **Figura 6**. A **Figura 6a** destaca a emissão total

de carbono de cada estrutura, dividida em quatro estágios distintos: produto, construção, uso e fim de vida.

Os resultados revelaram que a maior parte das emissões de CO₂ ocorre no estágio de produto (A1-3), considerado o estágio do berço ao portão da fábrica. Além disso, a pesquisa conduziu uma análise detalhada das emissões de carbono atribuídas a cada parte de cada elemento da estrutura, conforme ilustrado na **Figura 6b**. Notavelmente, mais de 50% das emissões de carbono foram identificadas como provenientes da superestrutura (Watt, 2019).

Figura 6: Emissão de carbono de 15 pontes. Onde “*Tender*” é a emissão de projeto e “*As Built*” é a emissão da construção final.



(a) Total de carbono para cada fase do ciclo

(b) Emissão de carbono para cada elemento da estrutura

Fonte: Watt (2019)

El Debs (2017) demonstra que a adoção de materiais de alto desempenho resulta em uma diminuição de custos nos processos de protensão, transporte e estocagem nas instalações de produção de pré-moldados. Adicionalmente, os concretos autoadensáveis contribuem para a otimização dos custos na fase de moldagem, devido à agilidade e menor quantidade de mão de obra, além de contribuírem para minimização do ruído durante o processo. Ainda, a utilização de elementos pré-moldados pode resultar em uma redução de até 10% nas emissões de carbono por metro cúbico de concreto. Isso ocorre porque as formas metálicas podem ser reutilizadas

entre 100 e 200 vezes, enquanto as formas de madeira geralmente têm um limite de reutilização de até 10 vezes (Dong *et al.*, 2015).

Os materiais avançados são caracterizados pela eficiência do produto e da fabricação, assim como, por suas propriedades, desempenho, estrutura, projeto e modelo. A utilização desses materiais será um fator determinante para a construção de um mundo mais sustentável ambientalmente, socialmente e economicamente (Kuhlmann *et al.*, 2024). Os materiais de ultra alto desempenho, como o UHPC, podem se enquadrar nesses requisitos devido às suas propriedades e capacidade de desmaterialização para estruturas de pontes (Dong, 2018; Habert *et al.*, 2012).

Dessa forma, os resultados mencionados por Watt (2019), Dong *et al.* (2015), Dong (2018), Habert *et al.* (2012) e Kuhlmann *et al.* (2024) reforçam a importância de concentrar esforços na mitigação das emissões de carbono durante a produção dos materiais, assim como no desenvolvimento de soluções estruturais eficientes e desmaterializadas, com especial atenção para a superestrutura. Essa abordagem é essencial para garantir uma solução sustentável ao longo de todo o ciclo de vida da infraestrutura.

Portanto, os dados apresentados neste contexto fornecem uma base sólida para a justificativa deste trabalho. Propor alternativas estruturais utilizando materiais de alto desempenho e otimização estrutural para a superestrutura, o que pode resultar em uma significativa redução das emissões de CO₂ em pontes. Isso, por sua vez, contribuirá para o alcance das metas estabelecidas no setor da construção civil no que diz respeito à redução das emissões de carbono.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi criar uma solução estrutural otimizada para a superestrutura de uma ponte, garantindo resistência, rigidez e ductilidade. Além disso, buscou-se minimizar a emissão de carbono durante os estágios de produto, visando a redução de emissão de carbono em comparação a um tabuleiro convencional.

Com o intuito de atingir esse objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Calibrar um modelo numérico não linear para um tabuleiro de ponte utilizando uma seção mista de aço-UHPC com perfil I de aço;

-
- Realizar a otimização estrutural do modelo desenvolvido através de algoritmos genéticos, visando garantir uma carga equivalente à de uma estrutura mista convencional de aço-concreto, com perfil I e laje maciça.
 - Avaliar o comportamento mecânico das estruturas otimizadas realizadas pelos algoritmos genéticos.
 - Avaliar a emissão de carbono para o estágio do produto do modelo proposto com uma estrutura mista convencional, avaliando assim o impacto ambiental relativo dessas abordagens.

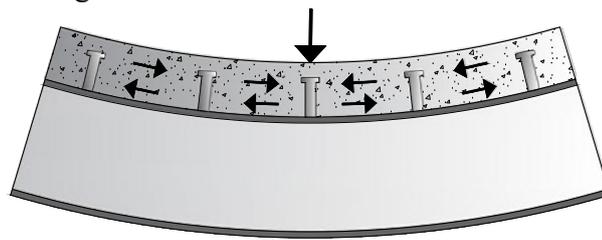
CAPÍTULO 2

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 PISOS MISTOS – AÇO E CONCRETO

Estruturas mistas são sistemas estruturais onde elementos de aço e concreto são integrados efetivamente, devido ao desenvolvimento de conectores de cisalhamento desde a década de 1950 (**Figura 7**). Anteriormente, o comportamento mecânico de flexão, escorregamento e deformação de cada material era considerado de forma independente. Isso possibilitou a criação de uma seção transversal em forma de "T", anteriormente predominantemente empregada em seções de concreto, proporcionando assim, maior eficiência estrutural e capacidade de carga (Johnson, 2018).

Figura 7: Transferência de cisalhamento



Fonte: Autor (2025)

Nakamura *et al.* (2002) menciona em seu trabalho que as pontes mistas apresentam vantagens em relação às pontes feitas exclusivamente de concreto ou de aço. As pontes inteiramente de aço são mais suscetíveis a instabilidades, enquanto as construídas apenas com concreto tendem a ter um peso próprio maior. Ao combinar esses materiais, as pontes mistas podem ser mais leves, oferecendo melhor qualidade e permitindo uma construção mais eficiente e rápida se comparadas às pontes exclusivamente de concreto. Além disso, espera-se que essas estruturas compostas contribuam para a redução dos níveis de ruído e vibração.

2.1.1 PISOS DE LAJE NERVURADA EM UHPC

O primeiro tabuleiro de ponte com nervuras utilizando UHPC foi proposto por Toutlemonde *et al.* (2005) (**Figura 8**). O projeto do protótipo foi desenvolvido em âmbito nacional na França e, além de empregar um compósito de alta resistência, também incorporou

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

protensão nas nervuras. Os resultados demonstraram a viabilidade de um projeto estrutural economicamente vantajoso, mesmo sem considerar a maior durabilidade do material. A estrutura poderia ser mais leve, com uma redução de peso nas vigas de aço e otimização do suporte.

Figura 8: Laje nervurada de UHPC



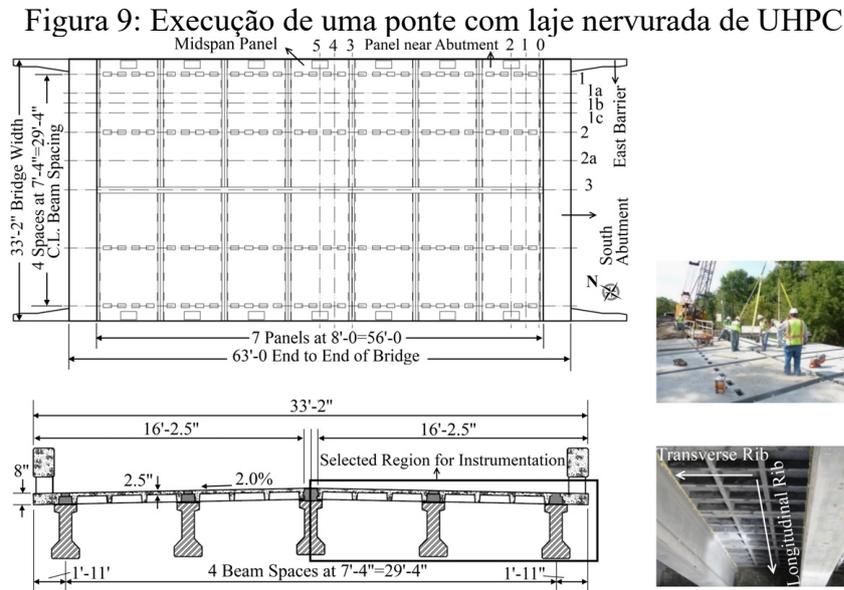
Fonte: Toutlemonde *et al.* (2005)

O primeiro guia de projeto para sistemas de painéis com laje nervurada pré-moldada, levando em consideração os conectores, foi publicado em 2013 pelo Departamento de Transporte dos Estados Unidos, sob o número FHWA-HIF-13-032. Este guia aborda, entre outros aspectos, a porcentagem de redução de material ao utilizar a laje nervurada. A Associação Americana de Rodovias e Transportes (AASHTO) simplificou a análise das lajes nervuradas, tratando-as como uma série de vigas em "T" na transversal.

A primeira execução de uma ponte com laje pré-moldada nervurada em UHPC foi realizada em um projeto de substituição da laje de uma ponte em Wapello County, Iowa. As investigações experimentais foram apresentados por Aaleti *et al.* (2011), com o apoio da FHWA Highways for LIFE program (**Figura 9**). A escolha por utilizar uma laje pré-moldada e em UHPC teve o objetivo de acelerar o processo de execução da reforma e também devido ao material apresentar uma maior vida útil. O estudo Honarvar *et al.* (2016) teve como objetivo analisar o comportamento mecânico do tabuleiro com cargas estáticas e dinâmicas por meio de modelos analíticos e método dos elementos finitos. Além disso, foram realizados testes visando à otimização das nervuras por meio de modelagens numéricas utilizando o software Abaqus

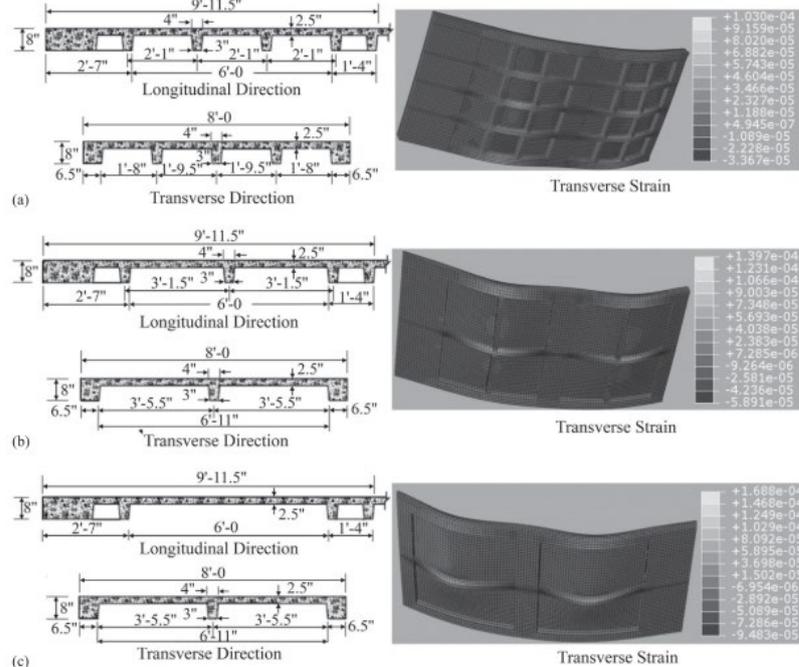
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

(Figura 10). Através desses modelos, foi possível obter uma redução das nervuras longitudinais de cada painel de 4 para 2, ou até mesmo 0, e para as nervuras transversais, de 6 para 2, sem comprometer a estrutura do painel.



Fonte: Honarvar *et al.*, (2016)

Figura 10: Modelo numérico criado por Honarvar *et al.* (2016)



Fonte: Honarvar *et al.*, (2016)

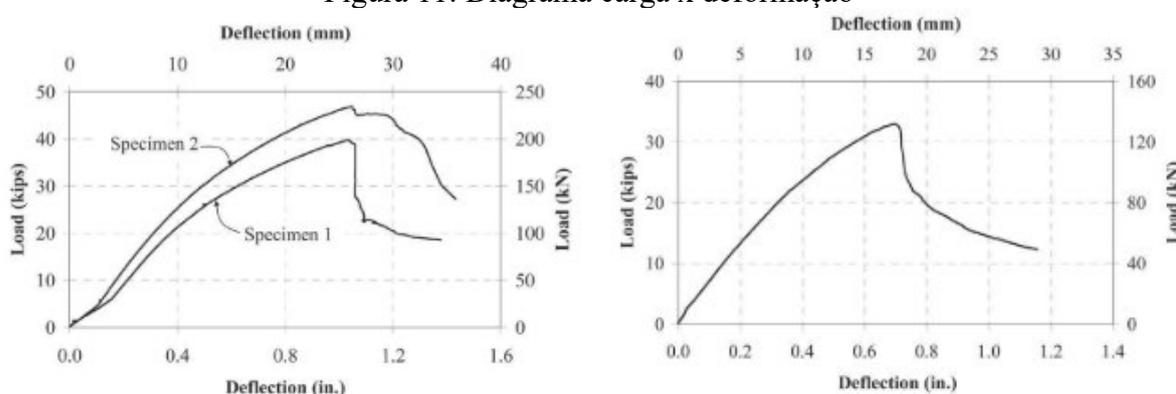
Outra proposta para a aplicação de painéis nervurados utilizando o UHPC foi destinada às pontes móveis na Louisiana. Baghi *et al.* (2017, 2018) conduziram estudos para a substituição

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

das lajes com gradil metálico por lajes nervuradas em UHPC e conclui-se que esta era uma alternativa viável. O emprego desse sistema garantiu a conformidade com os estados limite último e de serviço, conforme especificado pelos códigos especificados pela AASHTO (2014).

No geral, os estudos com lajes nervuradas em pisos de UHPC focaram principalmente no comportamento do UHPC. Sallem *et al.* (2011) tiveram como objetivo analisar os modos de falha em lajes nervuradas em UHPC e demonstraram que a maioria dos modelos apresentava modo de falha por cisalhamento, além disso a carga última obtidas nos ensaios foi superior a carga especificada pela AASHTO (2005). No entanto, a ruptura não ocorria de forma abrupta, como é observado em lajes de concreto convencional (**Figura 11**).

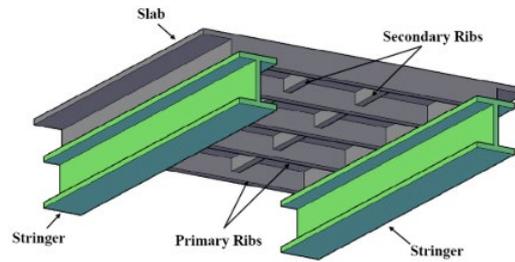
Figura 11: Diagrama carga x deformação



(a) Estrutura com ancoragem em formato de gancho a 180 graus (b) Estrutura sem ancoragem

Fonte: Sallem *et al.* (2011)

D'Alessandro (2013) realizou testes abrangendo dosagens dos componentes, processo de cura, testes biaxiais de tração e compressão, além de desenvolver um modelo de laje nervurada para utilização em pontes. Ghasemi *et al.* (2016a; 2016b) propuseram estudos de otimização de lajes nervuradas de UHPC com a utilização de reforços como fibras de carbono (**Figura 12**).

Figura 12: Modelo proposto por Ghasemi *et al.* (2016a)

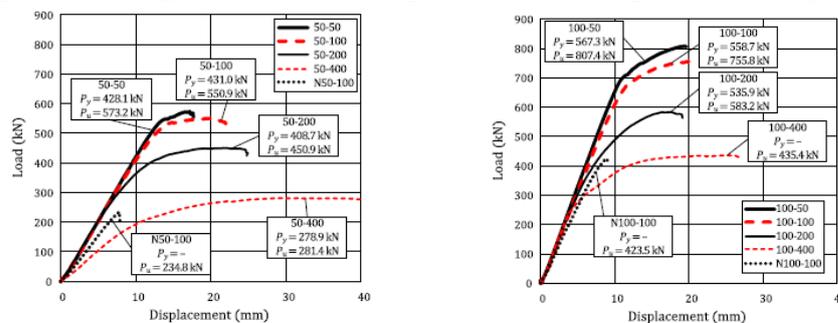
Fonte: Ghasemi *et al.*, (2016a)

2.1.2 PISOS MISTOS – AÇO E UHPC

Estudos avaliando o comportamento à flexão de estruturas de aço-UHPC com a utilização de laje nervurada praticamente não foram realizados, são encontrados apenas estudos apresentados por Zhu *et al.* (2021, 2020). No entanto, há diversos estudos que avaliam o comportamento de vigas mistas de aço-UHPC, demonstrando que é possível obter grande proveito das características mecânicas de cada material.

Yoo; Choo (2016), realizaram comparações entre vigas mistas utilizando concreto convencional e UHPC em lajes maciças. A **Figura 13** apresenta os resultados por meio das curvas carga x deslocamento, onde a sigla "N" indica o concreto convencional. A nomenclatura para cada elemento foi dada da seguinte maneira: o primeiro número indica a espessura da laje e o segundo número indica o espaçamento entre os conectores de cisalhamento, ambos em milímetros. Ao comparar as espessuras da laje, observa-se que a laje de 50 mm de UHPC apresenta uma resistência última maior do que a laje de 100 mm em concreto convencional. Em outras palavras, o UHPC permite obter mesma resistência com menores quantidades de material quando comparado ao concreto convencional.

Figura 13: Carga x deslocamento para diferentes espessuras de laje.



(a) Espessura da laje – 50mm

(b) Espessura da laje – 100mm

Fonte: Yoo; Choo (2016)

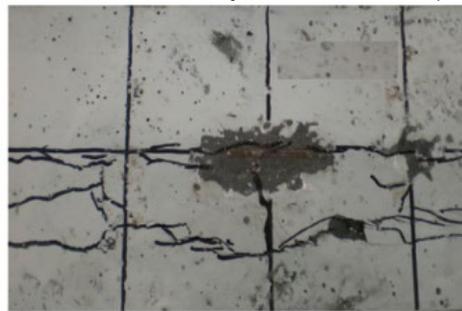
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A **Figura 14** apresenta o padrão de fissuras para estrutura mista com concreto convencional e UHPC, demonstrando a ruptura abrupta para o concreto convencional e as múltiplas fissuras para o UHPC (Yoo; Choo, 2016).

Figura 14: Padrão de fissuras de estruturas mistas realizado por Yoo; Choo (2016)



(a) Vista superior da estrutura em UHPC (50-50)



(b) Vista superior da estrutura em concreto convencional (N50-100)



(c) Vista lateral da estrutura em UHPC (50-50)



(d) Vista lateral da estrutura em concreto convencional (N50-100)

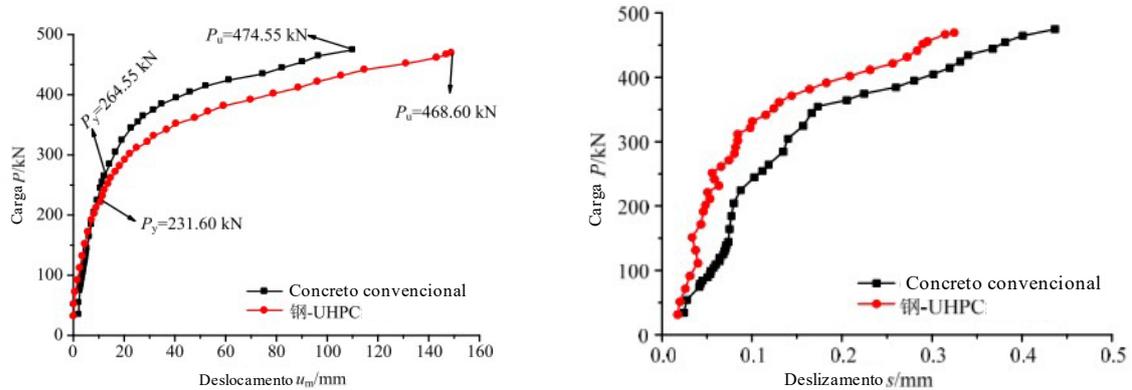
Fonte: Yoo; Choo (2016)

Liu; Xu; Chen (2018), também conduziram estudos para avaliar o comportamento à flexão de lajes em UHPC, comparando com o concreto convencional, e obtiveram os seguintes resultados:

- Redução da espessura da laje em UHPC em 28%, mantendo a mesma capacidade última de flexão e apresentando maior ductilidade em comparação com a laje de concreto convencional (**Figura 15a**).
- Deslizamentos de cisalhamento na interface aço-UHPC são significativamente menores quando comparados com vigas mistas de aço e concreto convencional. Isto pode ocorrer devido as fibras do UHPC redistribuir as tensões das fissuras por fendilhamento, reduzindo a velocidade de deslizamento entre os materiais (**Figura 15b**).

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Figura 15: Resultados obtidos pelo estudo de Liu; Xu; Chen (2018). Onde a curva preta é para estrutura em concreto convencional e a curva vermelha para a estrutura em UHPC



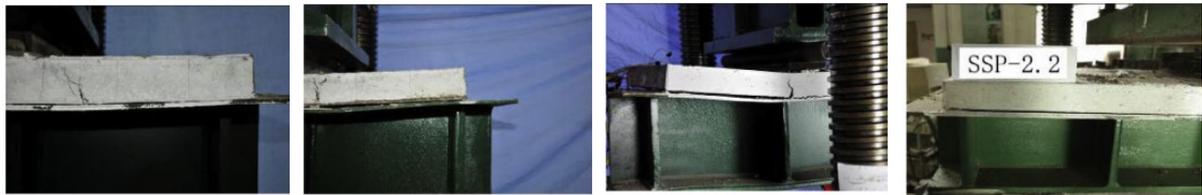
(a) Gráfico carga x deformação

(b) Deslizamento entre a laje e perfil pela atuação dos conectores de cisalhamento

Fonte: Liu; Xu; Chen (2018)

Wang *et al.* (2019), demonstram que os tipos de ligação na interface entre UHPC e o perfil metálico têm impacto significativo no comportamento do elemento estrutural. Foram avaliadas 9 estruturas variando o tipo de conexão entre laje e placa metálica, sendo placa lisa, placa com relevo, adesivo, adesivo e conectores de cisalhamento e apenas conectores de cisalhamento. Além disso, variaram o comprimento da estrutura em 1700 mm e 4700 mm (**Figura 16**). A chapa lisa e a chapa corrugada apresentaram baixo atrito entre os materiais, enquanto as chapas com adesivo apresentaram uma melhor conexão. Além disso, as chapas com adesivo apresentaram 93% da carga última comparada com a estrutura contando apenas com os conectores de cisalhamento.

Figura 16: Resultado do deslizamento entre a laje e chapa metálica



(a) Chapa lisa

(b) Chapa corrugada

(c) Adesivo

(d) Chapa lisa



(e) Chapa corrugada



(f) Adesivo



(g) Adesivo e conector de cisalhamento



(h) Adesivo

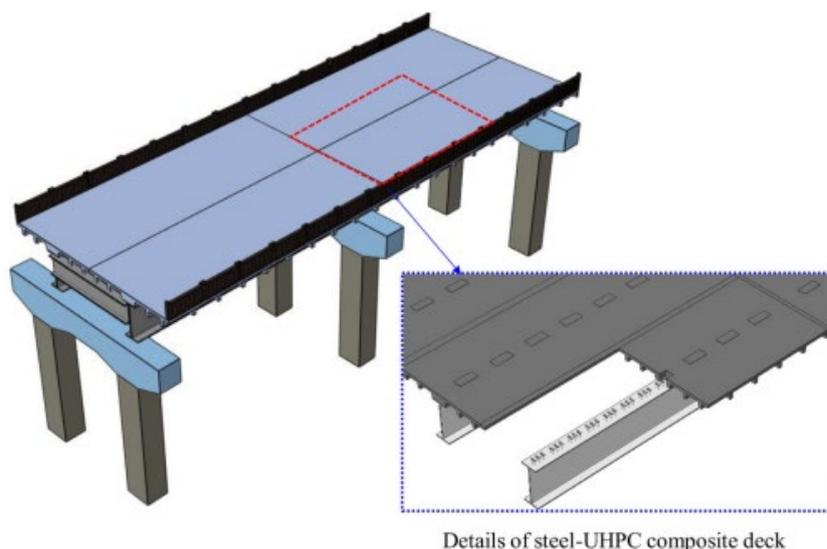
Fonte: Wang *et al.* (2019)

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Com a desmaterialização das lajes em UHPC, a diminuição de rigidez da estrutura pode ser um desafio. Nesse contexto, uma solução seria a utilização de lajes nervuradas. Um fator positivo ao empregar lajes nervuradas de UHPC é a possibilidade de aumentar a rigidez sem aumentar consideravelmente o consumo de matéria prima (Zhu *et al.*, 2021).

Zhu *et al.* (2021, 2020) apresentaram estudos sobre o comportamento ao momento fletor, cisalhamento, modo de falha, propagação de fissuras, otimização das nervuras e altura da laje, a relação carga x deslocamento, deformação e a disposição dos conectores de cisalhamento em estruturas mistas de aço-UHPC com perfil I e laje nervurada (**Figura 17**). Seis vigas mistas foram moldadas para realização de análises experimentais, e a partir dos resultados obtidos, foram desenvolvidos modelos numéricos adicionais para análises mais detalhadas.

Figura 17: Montagem de uma estrutura mista em ponte



Fonte: Zhu *et al.* (2020)

O modo de falha demonstrou ser dependente do espaçamento e altura das nervuras, variando entre flexão pura e flexão com fissuras longitudinais no topo da laje. A utilização da laje nervurada permitiu que o comportamento à flexão aproveitasse 100% das características dos dois materiais, sem a observação de fissuras longitudinais na laje devido ao fendilhamento, que comprometessem a estrutura, mesmo com uma taxa de armadura transversal de 0,33% (Zhu *et al.*, 2021). Esse comportamento se deve ao fato das fibras no UHPC serem capazes de redistribuir as tensões em fissuras devido ao fendilhamento na laje, principalmente no vão de cisalhamento. Caso a altura da laje em UHPC seja grande, o modo de falha da estrutura mista pode ocorrer devido à instabilidade do perfil antes do escoamento, ao invés da ruptura da laje,

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

resultando na incapacidade do aproveitamento máximo de cada material. Também foi observado que, quanto maior o espaçamento entre as nervuras e maior a altura da laje-nervura, menor ductilidade a estrutura apresentou.

2.2 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CARBONO EM PONTES UTILIZANDO MATERIAIS DE ALTO DESEMPENHO

O grupo Zero Emissões para Pontes (2022) elencou 10 tópicos, evidenciando que as estratégias e cálculos para emissões totais de CO₂ em pontes e edifícios apresentam algumas diferenças. Dentre elas, destacam-se:

1. Enquanto um edifício é projetado para durar entre 50 e 60 anos, uma ponte é concebida para uma vida útil de 100 anos ou mais. Em virtude dessa diferença, tanto a construção de novas pontes quanto a manutenção das existentes devem utilizar materiais com melhor desempenho e capazes de suportar as cargas provenientes de eventos ambientais mais severos, que tendem a aumentar progressivamente com o aquecimento global (tais como ventos, correntezas, ondas e calor). A escolha criteriosa de materiais mais eficientes (como os materiais de alta resistência) não apenas promove melhor desempenho estrutural, mas também pode resultar em uma redução significativa nas emissões de carbono durante as fases de construção e manutenção.
2. O critério para escolha do material da estrutura em termos de durabilidade se destaca para construção de uma ponte, uma vez que estes estão sujeitos a uma maior exposição ambiental. Durante o ciclo de vida o aço está sujeito a um maior desperdício de carbono devido à corrosão ou às replicações de produtos contra corrosão. Já nas pontes de concreto, são necessárias as manutenções com uma cobertura adicional de concreto. Outro detalhe importante é que 20% dos materiais empregados na construção de um edifício destinam-se a fachadas e acabamentos, enquanto para pontes a quantidade de material utilizado para os elementos estruturais é mais significativo. Conseqüentemente, algumas soluções que empregam materiais de baixo carbono, viáveis para edifícios, podem não ser aplicáveis em pontes.
 3. Vários estudos evidenciam a redução das emissões de carbono mediante a otimização de elementos estruturais, como vigas e lajes, em edifícios (Eleftheriadis *et al.*, 2018). Essa otimização inclui a diminuição do tamanho dos

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

vãos e a reorganização da disposição dos pilares. No entanto, a aplicação da mesma estratégia na superestrutura de pontes encontra limitações, pois o comprimento mínimo do vão é frequentemente definido por restrições de tráfego sobre a ponte, pelo tipo de transporte que será realizado entre os apoios, por questões ambientais, pelos materiais e pelas técnicas construtivas empregadas, entre outros fatores.

Uma revisão sistemática conduzida por Kuhlmann *et al.* (2024) analisou diversos estudos de caso de pontes construídas com HSS, pontes mistas aço-concreto e pontes mistas madeira-concreto, com o objetivo de propor soluções sustentáveis. Destacou-se que a redução das emissões de CO₂ requer a consideração de alguns aspectos principais, tais como a eficiência dos materiais utilizados e a otimização do projeto estrutural, com especial atenção para o controle da fissuração, visando garantir a durabilidade. Além disso, é crucial pensar em adaptações que possam ser necessárias diante de possíveis mudanças no uso futuro da estrutura, com o aumento das cargas transportadas pelos veículos. Desta maneira, a estrutura de HSS foi considerada uma opção viável para construções sustentáveis ao longo de todo o seu ciclo de vida, enquanto que as estruturas mistas necessitam de uma investigação em relação ao controle de fissuras para que sejam consideradas uma opção vantajosa em pontes rodoviárias.

Pontes com lajes de concreto convencional apresentam algumas desvantagens, como a maior porosidade, o peso próprio elevado e o tempo de vida útil menor quando comparado a concretos com matrizes mais densas. A fim de propor uma solução para estes problemas, o material UHPC vem sendo estudado como alternativa ao concreto tradicional devido aos benefícios das suas propriedades (Honarvar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019a; Zhu *et al.*, 2021).

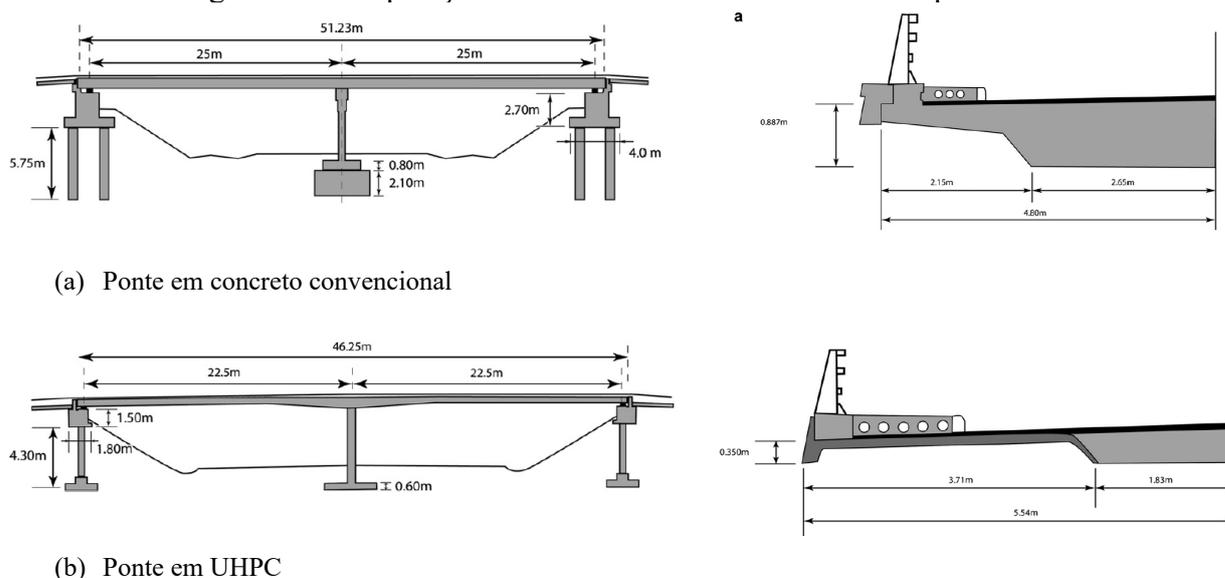
O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um material que se destaca por suas propriedades mecânicas significativamente superiores em comparação com o concreto convencional. O UHPC é notável por apresentar capacidade resistente residual pós fissuração, tanto na tração quanto na compressão, possuir alta resistência a compressão, maior rigidez, ser auto adensável e apresentar múltiplas fissuras de menor abertura em regimes de carregamento de serviço. Além disto, o UHPC é reconhecido por sua maior durabilidade e capacidade auto cicatrizante a depender da sua composição (Fehling *et al.*, 2015; Graybeal *et al.*, 2013; Şahmaran; Li, 2010).

O UHPC possui uma maior quantidade de cimento por metro cúbico se comparado com o concreto convencional. Partindo desta premissa, este compósito apresentaria uma maior

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

emissão de carbono pela quantidade de cimento utilizado. Contudo, com a desmaterialização da estrutura por conta das suas propriedades avançadas a quantidade do material também será reduzida. Com o objetivo de avaliar este problema, Habert *et al.* (2012) realizaram uma comparação entre duas pontes similares, ambas construídas na França – uma em concreto convencional e outra em UHPC (**Figura 18**).

Figura 18: Comparação da emissão de carbono entre duas pontes

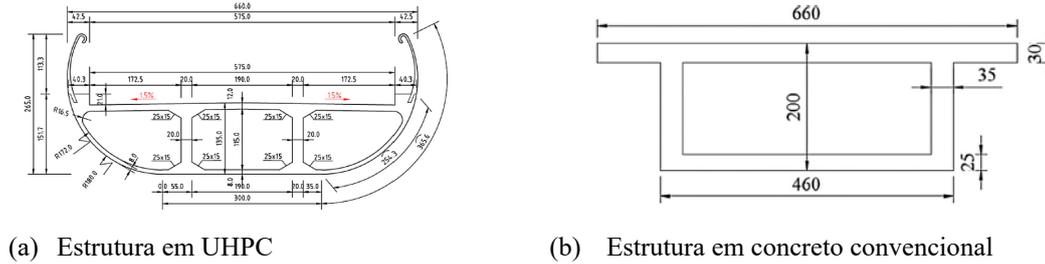


Fonte: Habert *et al.* (2012)

Foi calculada a emissão de carbono de todo o ciclo de vida das pontes e observou-se uma redução de 50% das emissões de gases de efeito estufa para a ponte construída em UHPC. Assim, concluiu-se que a otimização estrutural utilizando o UHPC é uma opção mais sustentável que o concreto convencional, mesmo tendo um consumo de cimento maior por metro cúbico (Habert *et al.*, 2012).

Outra pesquisa realizada por Dong (2018) analisou o mesmo aspecto, demonstrando que a otimização estrutural em estruturas de pontes utilizando UHPC pode ser uma opção mais sustentável, obtendo uma redução de 48% nas emissões de CO₂ quando comparada com as estruturas de concreto convencional. (**Figura 19**).

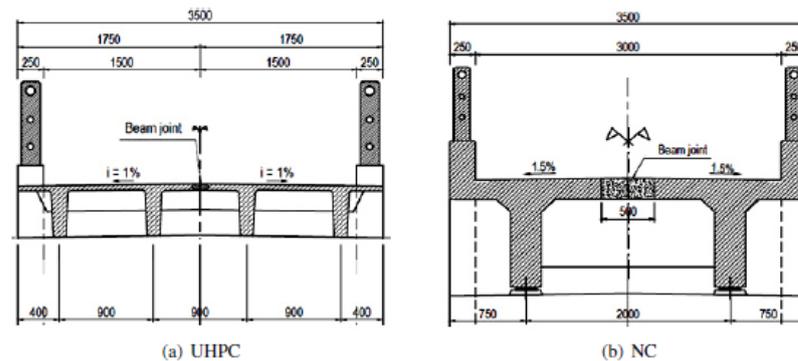
Figura 19: Comparação de emissão de carbono entre duas estruturas



Fonte: Dong (2018)

Da mesma maneira, Kien (2023) realizou a otimização de uma ponte rural utilizando UHPC e comparou a solução com uma estrutura em concreto convencional (**Figura 20**). Apenas na fase “*cradle to gate*” obteve-se uma redução de 30% nas emissões de carbono e estendendo os cálculos para todo o ciclo de vida, chegou a uma redução de 65%.

Figura 20: Comparação de emissão de carbono entre duas soluções estruturais



(a) Estrutura em UHPC

(b) Estrutura em concreto convencional

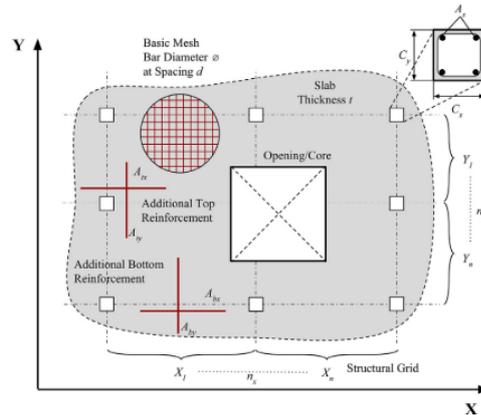
Fonte: Kien (2023)

2.3 ALGORIMOS GENÉTICOS

Para automatizar o processo de otimização estrutural de seções, materiais e disposição dos elementos, têm-se utilizado os algoritmos genéticos (AGs). Em um estudo de Eleftheriadis *et al.* (2018), a otimização múltipla foi realizada usando AGs combinados com modelagem BIM. Esse estudo abordou a otimização da configuração dos pilares, das variações nas seções transversais dos pilares, da altura da laje, bem como das barras de reforço para lajes e pilares (**Figura 21**).

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

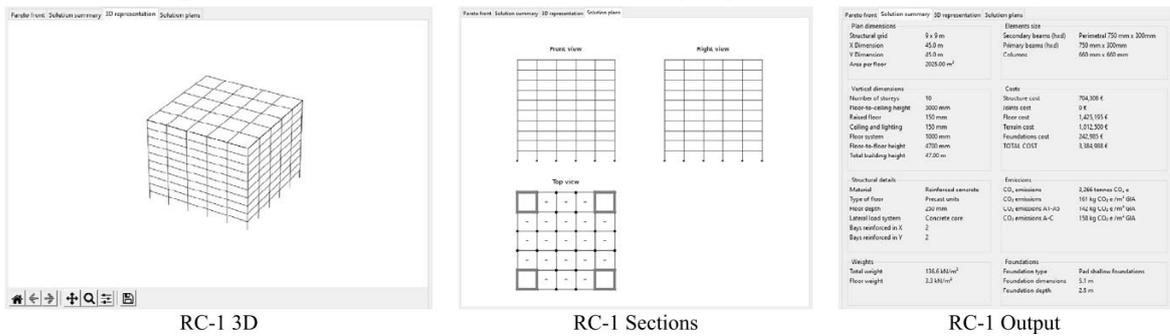
Figura 21: Otimização das seções, armaduras de reforço e disposição dos pilares



Fonte: Eleftheriadis *et al.* (2018)

Na pesquisa conduzida por Kanyilmaz, Tichell e Loiacono (2022), foi realizada a variação do tipo de material da laje, do tipo de piso, das dimensões da laje e do número de pavimentos, também utilizando algoritmos genéticos (AGs). A partir dos resultados obtidos, o software empregado era capaz de apresentar os dados referentes à emissão de CO2 associada às diferentes configurações estudadas (**Figura 22**).

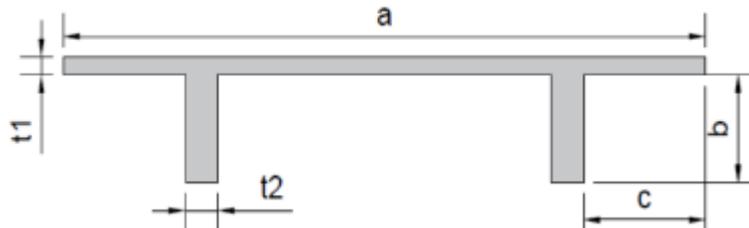
Figura 22: Interface de resultados de um programa de otimização



Fonte: Kanyilmaz, Tichell e Loiacono (2022)

Ribeiro (2019), desenvolveu uma rotina para otimizar a seção transversal de um elemento em simulações que utilizam modelos de elementos finitos. As dimensões que variaram são apresentadas na **Figura 23**.

Figura 23: Variáveis de decisão



Fonte: Ribeiro (2019)

Os algoritmos genéticos (AGs) se baseiam no princípio da seleção natural, de acordo com a teoria de C. Darwin (*Origem das Espécies*, 1859). Este princípio diz que os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de sobreviver e, conseqüentemente, de se reproduzir. Indivíduos com mais descendentes têm maior chance de transmitir seus genes para as próximas gerações, o que perpetua suas características genéticas.

As primeiras investigações sobre os AGs foram conduzidas por John Holland. Ao longo do tempo, Holland refinou suas ideias e, em 1975, publicou seu livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*". Desde então, esses algoritmos têm sido amplamente aplicados com sucesso na resolução de uma variedade de problemas de otimização, tais como otimização de cronograma e orçamento, análise de abalos sísmicos, compatibilização de projetos em BIM, automatização no procedimento de calibragem de modelos em elementos finitos (Lima, 2011; Ribeiro, 2019; Silva, 2006, Liu *et al.*, 2024; Mei *et al.*, 2020; Shen; Zhang, 2021).

Nos AGs, a população de indivíduos representa as possíveis soluções de um determinado problema. O método apresenta uma abordagem de busca e otimização da solução, que é representada pela evolução da população. Esses algoritmos operam de forma paralela, estruturada e aleatória, envolvendo três operações básicas: seleção, cruzamento e mutação (Castilho, 2003; Silva, 2006; Goldberg, 1989).

O processo de otimização é iterativo, onde cada conjunto de soluções é denominado geração. Dessa forma, os AGs exploram informações históricas com o objetivo de encontrar novas soluções, esperando que apresentem um melhor desempenho ao decorrer das gerações, ou seja, espera-se a evolução da população (Carvalho, 2009 apud Goldberg, 1989; Holland, 1975).

Os algoritmos genéticos não garantem a obtenção da melhor solução ótima, mas sim de um conjunto de soluções ótimas locais dentro do espaço de busca. Isso ocorre porque o método se baseia em um processo estocástico de evolução populacional, que, embora eficaz para encontrar boas soluções, pode convergir para mínimos ou máximos locais sem alcançar a

solução global ótima. Durante a otimização, os indivíduos mais adaptados são selecionados com base em uma função de aptidão, e operadores genéticos, como mutação e cruzamento, promovem a exploração do espaço de soluções. No entanto, devido a fatores como a diversidade inicial da população e os critérios de seleção, o algoritmo pode ficar preso em regiões do espaço de busca que representam boas soluções, mas não necessariamente a melhor possível. Para mitigar esse efeito e melhorar a qualidade das soluções encontradas, técnicas como aumento da diversidade da população inicial, elitismo e ajuste dos parâmetros de mutação e cruzamento podem ser aplicadas. Contudo, mesmo com essas estratégias, os algoritmos genéticos ainda oferecem um compromisso entre eficiência computacional e qualidade da solução, sendo amplamente utilizados para problemas onde encontrar a solução global exata é computacionalmente inviável (Ribeiro, 2019).

2.3.1 SELEÇÃO

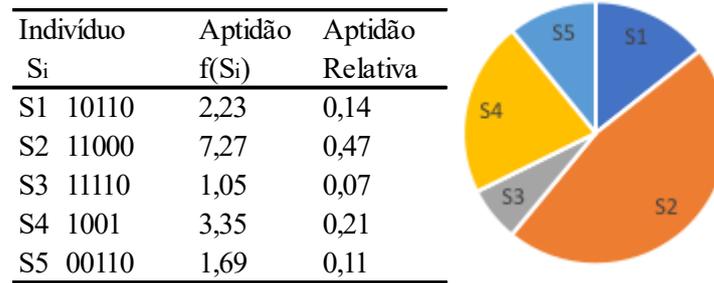
Os operadores de seleção têm como objetivo principal escolher os indivíduos com maior aptidão. Ou seja, aqueles cujas soluções apresentam melhores valores de função aptidão têm maiores chances de serem selecionados. Dessa forma, os indivíduos escolhidos participam da etapa de reprodução (cruzamento) e contribuem para a formação da próxima geração, visando à convergência para uma solução ótima. Espera-se que, por meio desse processo seletivo, o conjunto inicial de indivíduos dê origem a descendentes mais adaptados (Silva, 2006).

A seguir, serão apresentados alguns dos métodos de seleção mais utilizados em algoritmos genéticos.

2.3.1.1 MÉTODO DA ROLETA

No método da roleta, os indivíduos são selecionados por meio de um sorteio, representados em uma roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão (**Figura 24**). Assim, os indivíduos com maiores aptidões ocupam porções maiores na roleta, enquanto os de menor aptidão ocupam porções menores. Em seguida, a roleta é girada n vezes, onde n representa a quantidade de indivíduos da população, e os indivíduos sorteados são escolhidos para compor a nova geração. Esse método proporciona uma seleção natural baseada na aptidão dos indivíduos, permitindo uma variedade na escolha dos pais para a próxima geração (Castilho, 2003).

Figura 24: Método da roleta



Adaptado: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/genetic/>

2.3.1.2 MÉTODO DE TORNEIO

Um par de indivíduos é escolhido aleatoriamente, e aquele com a maior pontuação de aptidão é selecionado para ser copiado para a próxima população. Esse processo é repetido para a criação completa da nova população. Essa abordagem não apenas previne a convergência prematura e a estagnação do valor da função objetivo, mas também reduz significativamente o tempo e o custo computacional necessários para ordenar os indivíduos de acordo com o valor da função de aptidão (Silva, 2006).

2.3.1.3 MÉTODO ELITISTA

O método elitista é frequentemente combinado com outros métodos de seleção. Os indivíduos com maior aptidão são automaticamente selecionados para a próxima geração, evitando modificações. Assim, o objetivo desse método é garantir que os melhores indivíduos não sejam excluídos da população devido às operações genéticas. No entanto, ao utilizar esse método, existe o risco de ocorrer uma convergência prematura, por isso a importância de escolher a quantidade adequada de indivíduos que devem ser preservados (Silva, 2006).

2.3.2 CRUZAMENTO

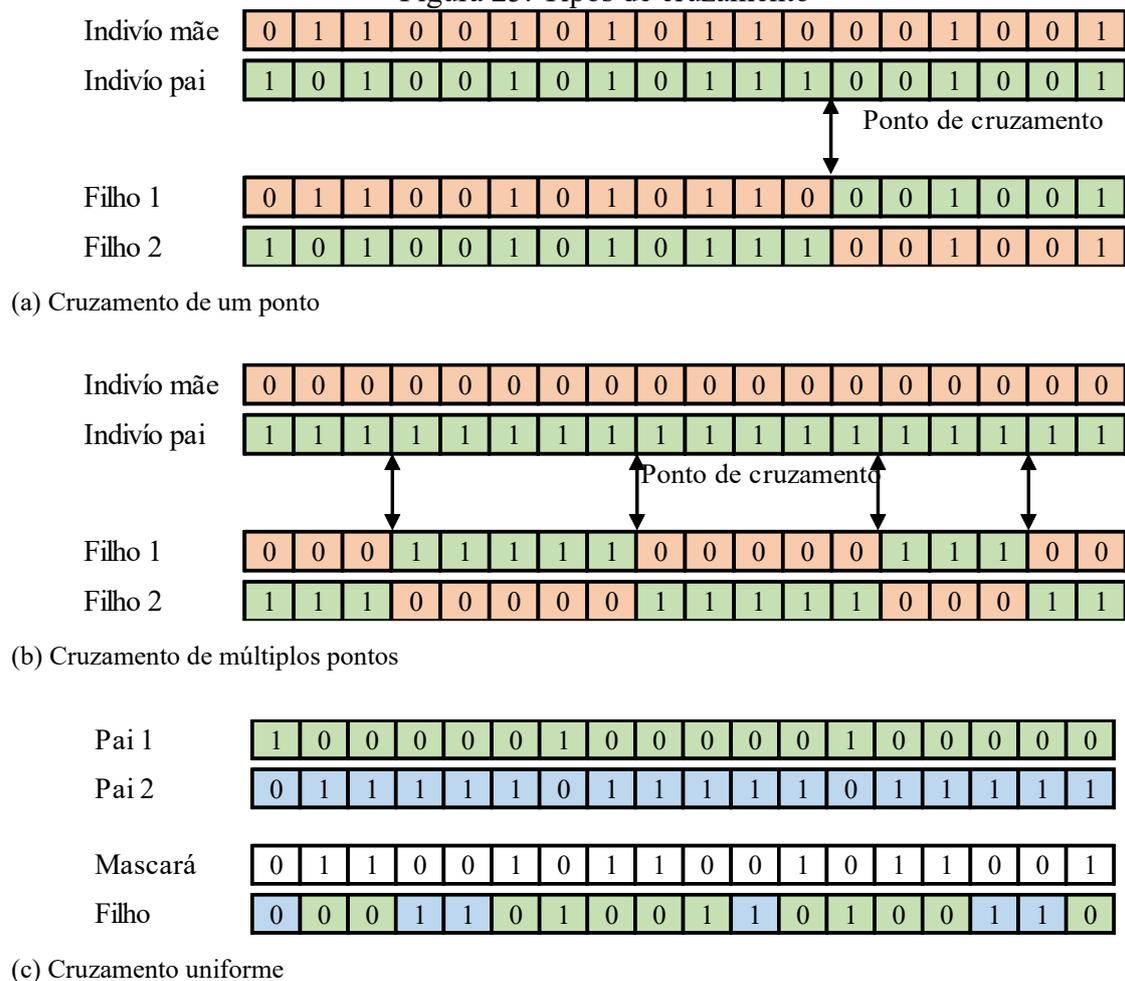
Durante a fase de reprodução, o operador de cruzamento desempenha um papel crucial ao combinar as características genéticas dos pais para criar descendentes com novas combinações genéticas. Este operador é acionado com uma probabilidade determinada pela taxa de cruzamento, a qual é sempre superior à taxa de mutação, conforme discutido por Goldberg, 1989. Existem três tipos principais de cruzamento que se destacam neste processo: o cruzamento de um ponto, o cruzamento de múltiplos pontos e o cruzamento uniforme. Cada

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

um desses tipos de cruzamento possui suas próprias estratégias para combinar as informações genéticas dos pais e gerar descendentes com variabilidade genética (Castilho, 2003).

No cruzamento de um ponto, um ponto específico é selecionado, e as informações genéticas dos pais são trocadas a partir desse ponto (**Figura 25a**). Em outras palavras, as informações genéticas anteriores a esse ponto em um dos pais são combinadas com as informações posteriores a esse ponto no outro pai. Já no cruzamento de múltiplos pontos, mais de um ponto é escolhido para as trocas de informações genéticas ocorrerem (**Figura 25b**) (Kaya; Murat; Tekin, 2011). Por fim, no cruzamento uniforme, não há a necessidade de pontos específicos para determinar quais informações serão trocadas (**Figura 25c**). Em vez disso, uma máscara de bits aleatórios é empregada, na qual os genes de cada pai são herdados por cada um dos filhos, resultando em uma mistura mais aleatória das características genéticas dos pais nos descendentes (Castilho, 2003).

Figura 25: Tipos de cruzamento



Fonte: Autor (2024)

2.3.3 MUTAÇÃO

A mutação tem como objetivo preservar a diversidade genética da população por meio de alterações em componentes selecionados aleatoriamente. Além disso, esse operador contribui para evitar o problema de mínimos locais, ao modificar levemente a direção da busca. A aplicação do operador de mutação ocorre com uma probabilidade determinada pela taxa de mutação, que geralmente é baixa, a fim de evitar que o processo se torne excessivamente aleatório (Castilho, 2003).

2.3.4 PARÂMETROS GENÉTICOS

Os parâmetros genéticos são características que têm um impacto direto no funcionamento do algoritmo. A seleção dos valores desses parâmetros é fundamental, pois determinará a eficácia do algoritmo em convergir para uma solução ótima ou quase ótima do problema. Os principais parâmetros são: tamanho da população, taxa de cruzamento e taxa de mutação (Castilho, 2003; Hassanat et al., 2019).

Segundo Hassanat *et al.* (2019) apud Holland, 1975, o tamanho da população refere-se à quantidade total de indivíduos. Uma população pequena pode restringir a abrangência do espaço de busca, resultando em convergências prematuras. Por outro lado, uma população grande proporciona uma cobertura mais abrangente, auxiliando na prevenção de convergências prematuras para soluções locais em detrimento das soluções globais. No entanto, os custos computacionais e o tempo necessários para processar populações maiores aumentam consideravelmente.

A taxa de cruzamento representa a quantidade de trocas entre os indivíduos na geração de descendentes. Quando essa taxa é de 0%, toda nova geração é uma cópia da população anterior, com exceção dos indivíduos resultantes do processo de mutação. Porém, quando a taxa é de 100%, todos os descendentes são gerados apenas pelo cruzamento (Hassanat *et al.*, 2019). A variação da taxa de cruzamento geralmente ocorre entre 60% e 100%. Quanto maior a taxa, mais rapidamente novos indivíduos são introduzidos na população. No entanto, isso pode levar à perda de indivíduos com boas aptidões em um ritmo mais acelerado do que a geração de novos indivíduos promissores, o que pode ser mitigado pelo elitismo. Por outro lado, se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar (Castilho, 2003).

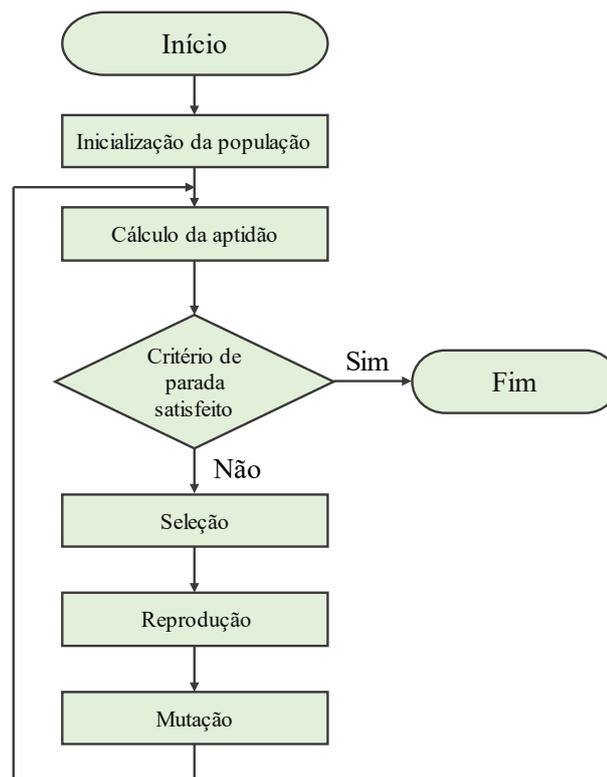
A taxa de mutação determina quantas variáveis sofrerão mutação em uma geração. A taxa de mutação varia entre 0,1% e 1%. Uma taxa baixa é adotada para evitar que uma determinada posição fique estagnada em um valor e permitir a exploração de todo o espaço de

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

busca. Por outro lado, uma taxa de mutação alta torna a busca basicamente aleatória (Castilho, 2003).

O fluxograma (**Figura 26**) demonstra as etapas para a construção de um processo de otimização utilizando os algoritmos genéticos. Em cada iteração, as operações de cálculo de aptidão, seleção, cruzamento e mutação são aplicadas à população atual. Após essas operações, uma nova população é gerada, com a expectativa de representar uma melhoria na solução do problema de otimização em comparação com a população anterior. Para finalizar o processo, é necessário adotar um critério de parada. Existem diversos critérios de parada, tais como alcançar um valor máximo (ou mínimo) da função objetivo, atingir um número máximo de iterações e alcançar um erro mínimo para um determinado parâmetro do problema.

Figura 26: Fluxograma dos algoritmos genéticos



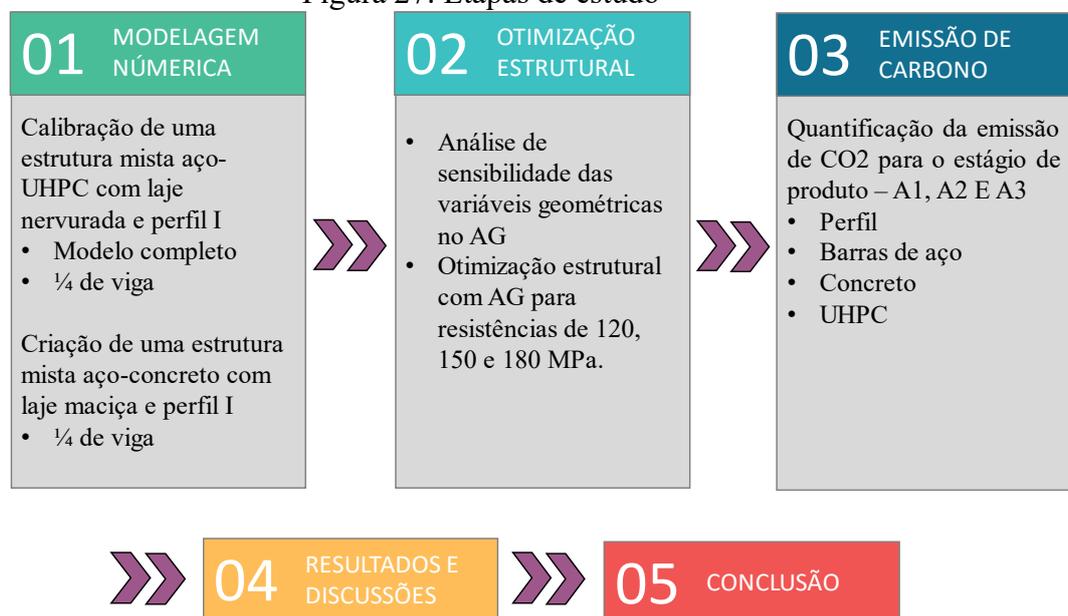
Adaptado: Ribeiro (2019)

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se os modelos numéricos, o processo de otimização utilizando o método dos Algoritmos Genéticos (AGs) e a quantificação das emissões de carbono, com ênfase na fase de produto para estruturas típicas de pontes. A **Figura 27** ilustra, de forma esquemática, as etapas realizadas ao longo do estudo.

Figura 27: Etapas de estudo



Fonte: Autor (2025)

A metodologia desenvolvida para a otimização estrutural foi conduzida da seguinte maneira: inicialmente, calibrou-se um modelo numérico de uma viga mista de UHPC com laje nervurada (Zhu *et al.*, 2021), garantindo a confiabilidade das análises. Em seguida, criou-se um modelo representativo da seção efetiva de uma ponte convencional (CBCA). Com base nesse modelo, elaborou-se uma proposta de solução inovadora utilizando materiais avançados, substituindo a laje maciça convencional por uma laje nervurada de UHPC, mantendo a geometria da ponte CBCA. Posteriormente, realizou-se uma análise de sensibilidade para identificar as variáveis de decisão mais relevantes no processo de otimização, considerando aspectos mecânicos e as emissões de CO₂. Com as variáveis definidas, aplicou-se um algoritmo genético para resistências do UHPC de 120 MPa, 150 MPa e 180 MPa, buscando configurações que mais se aproximassem do comportamento mecânico da estrutura convencional. Por fim, foi

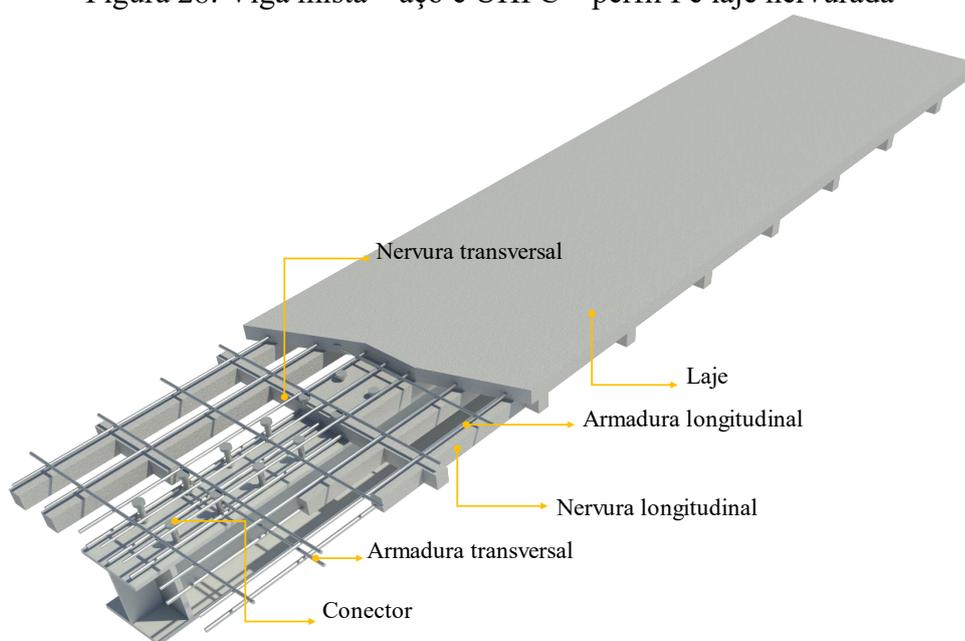
realizada a quantificação das emissões de CO₂ associadas a cada seção estudada, com o objetivo de selecionar a estrutura que apresentasse menor emissão de CO₂ e, ao mesmo tempo, o mesmo comportamento mecânico da estrutura convencional.

3 MODELAGEM NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)

3.1 GEOMETRIA DA VIGA MISTA - ZHU *ET AL.* (2021)

Para realização das análises de emissão de carbono, o modelo validado foi o da estrutura mista aço-UHPC testada experimentalmente por Zhu *et al.* (2021) (**Figura 28**). Para a realização da modelagem numérica utilizou-se o software de análise de estruturas por elementos finitos ABAQUS (ABAQUS, 2014).

Figura 28: Viga mista – aço e UHPC – perfil I e laje nervurada



Adaptado: Zhu *et al.* (2021)

O estudo de Zhu *et al.* (2021) avaliou a variação da altura da laje e nervuras e espaçamento entre as nervuras longitudinais e transversais. O perfil adotado foi de 200x200, com a altura (h_{sp}) e espessura da alma (T_w) de 176 mm e 8 mm respectivamente, e largura (bf) e espessura da mesa (t_f) de 200 mm e 12 mm. Os enrijecedores (t_e) possuem espessura de 15mm. O diâmetro da armadura transversal da laje foi de 8mm, enquanto a armadura longitudinal possui diâmetro de 10mm para as nervuras e de 8mm. A laje de concreto nervurada apresenta uma largura (b_{es}) de 810 mm, comprimento (L) de 3710 mm e altura (h_{ws}) de 90 mm. Os conectores adotados foram de 16 mm de diâmetro e 65 mm de altura. As dimensões e

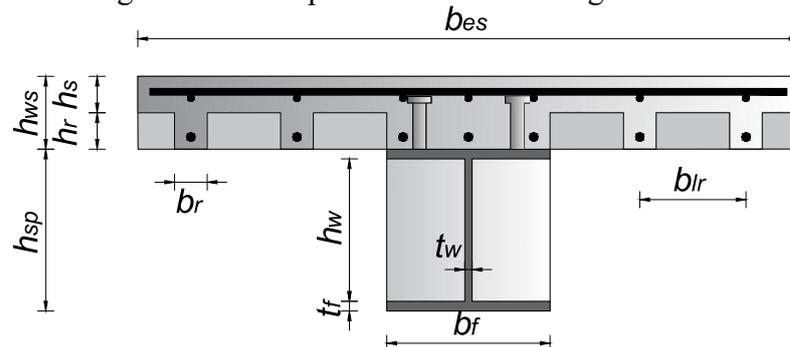
espaçamento são apresentadas na **Tabela 1 e Figura 29**. O experimento foi projetado pelos autores para garantir interação total entre laje e perfil, ou seja, é válida a hipótese da seção plana.

Tabela 1: Parâmetros principais das vigas-mistas

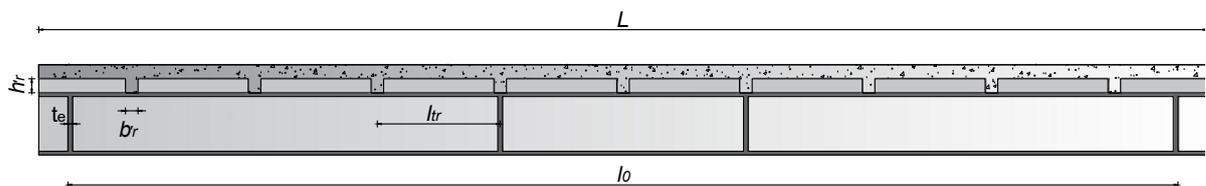
Modelo	h_s (mm)	h_r (mm)	h_r/h_s	b_r (mm)	b_{lr} (mm)	b_{lr}/b_r	l_{tr} (mm)	l_{tr}/b_{lr}	Variação dos parâmetros
SUWB1	45	45	1	40	130	3,25	390	3	Padrão
SUWB2	45	45	1	40	130	3,25	780	6	l_{tr}/b_{lr}
SUWB3	45	45	1	40	220	5,50	390	1,8	b_{lr}/b_r
SUWB4	30	60	2	40	130	3,25	390	3	h_r/h_s
SUWB5	30	90	3	40	130	3,25	390	3	h_{ws}

Adaptado: Zhu *et al.* (2021)

Figura 29: Principais dimensões das vigas-mistas



(a) Vista frontal

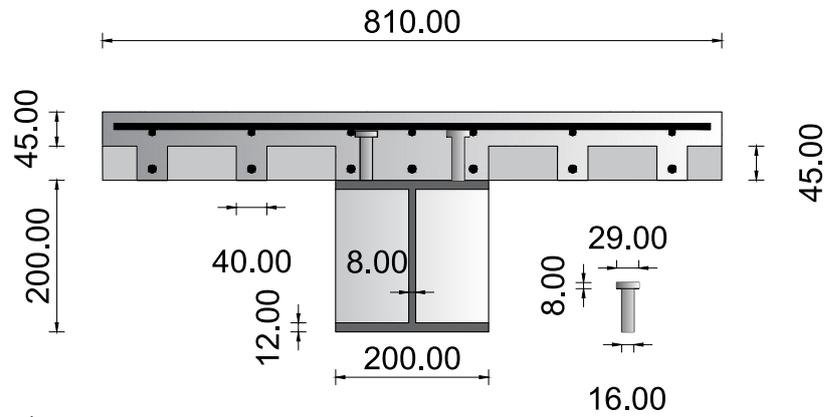


(b) Vista Lateral

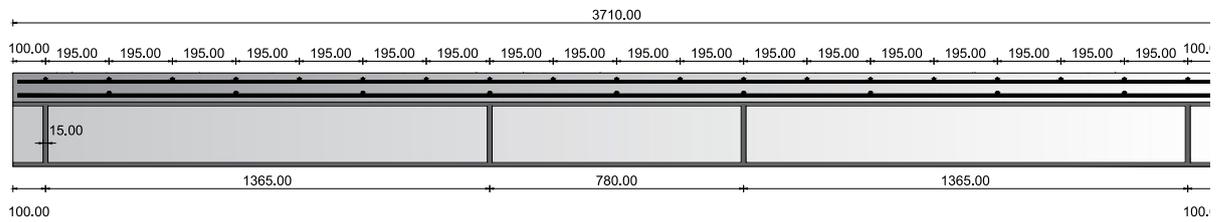
Adaptado: Zhu *et al.* (2021)

O detalhamento do posicionamento, dimensionamento e distribuição das armaduras e conectores da SUBW1 é demonstrado na **Figura 30**, que ilustra a seção transversal, longitudinal e características das vigas mistas de aço a ser modelada.

Figura 30: Detalhamento SUBW1



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral

Adaptado: Zhu *et al.* (2021)

A **Tabela 2** apresenta as propriedades mecânicas dos materiais empregados para modelagem e calibração dos modelos:

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos materiais

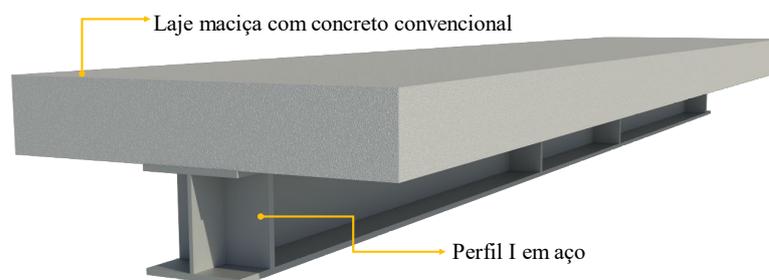
Elementos	E_{ci} (GPa)	ν	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Along. (%)
UHPC	44,06	0,2	153	-	-	-
Concreto	26,63	0,2	30	-	-	-
Perfil I - Mesa	200	0,3	-	396	564	28
Perfil I - Alma	200	0,3	-	378	549	24
Enrijecedores	200	0,3	-	350	540	-
Armaduras Ø 6mm	200	0,3	-	500	643	-
Armaduras Ø 8mm	200	0,3	-	500	643	-
Armaduras Ø10 mm	200	0,3	-	500	643	-
Pino com cabeça	200	0,3	-	320	400	14
Pino com cabeça (CBCA)	200	0,3	-	345	420	20

Fonte: Autor (2025)

3.2 GEOMETRIA DA VIGA MISTA CONVENCIONAL CBCA. (2020)

A viga mista com laje maciça e concreto convencional dimensionada pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2020 (**Figura 31**), foi tomada como referência para a otimização. O objetivo deste modelo é ter uma solução tradicional, e projetar a solução com materiais de alto desempenho para atender a mesma demanda mecânica, entre elas, deslocabilidade, resistência e ductilidade. O modelo criado é a seção efetiva de cálculo de uma ponte vicinal mista de 14 metros.

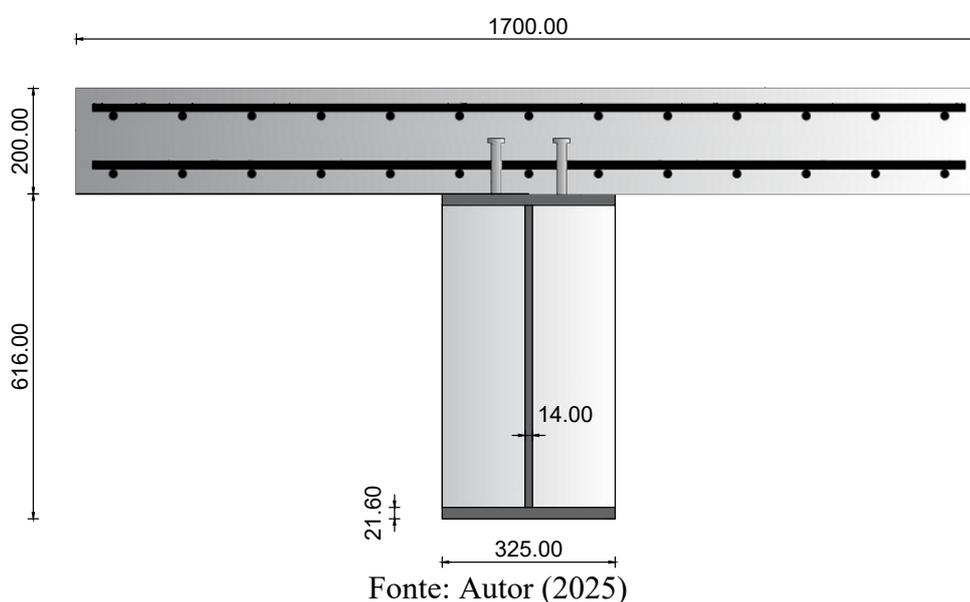
Figura 31: Estrutura mista com laje maciça e concreto convencional



Fonte: Autor (2025)

O perfil adotado foi de 610 mm x 174 mm, com a altura e espessura da alma de 573 mm e 14 mm, respectivamente, e comprimento e espessura da mesa de 325 mm e 21,60 mm. O diâmetro da armadura, longitudinal e transversal, de reforço superior e inferior foi de 8 mm e 6 mm. A laje de concreto apresenta uma largura de 1700 mm, comprimento de 14000 mm e altura de 200 mm. Os conectores têm 19 mm de diâmetro e 130 mm de altura. O detalhamento do posicionamento, dimensionamento e distribuição das armaduras e conectores é mostrado na **Figura 32**, que ilustra a seção transversal e da viga mista de aço a ser modelada.

Figura 32: Detalhamento viga mista convencional



3.3 MODELO NUMÉRICO

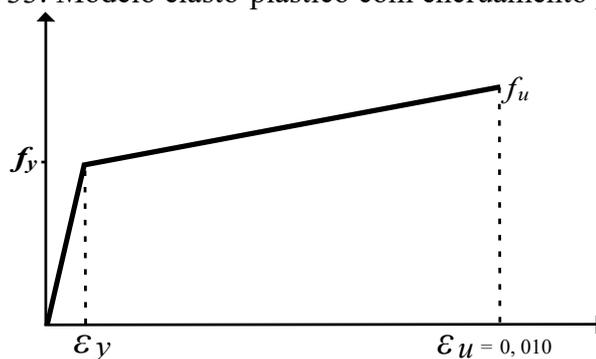
Foram criados dois modelos numéricos para representar a viga experimental de Zhu *et al.* (2021): um modelo completo, que considerou a interação entre a laje e os pinos de cisalhamento, e um modelo simplificado, no qual foi representado um quarto da viga mista, aplicando-se condições de simetria tanto no sentido longitudinal quanto no transversal. No modelo simplificado, os conectores de cisalhamento foram suprimidos, visando facilitar o processo de modelagem e reduzir o tempo de processamento. Os modelos foram comparados para validação das hipóteses adotadas. A partir disso, o modelo simplificado foi utilizado na criação da viga mista da ponte com concreto convencional (CBCA), garantindo uma análise eficiente sem prejudicar a representatividade do comportamento estrutural.

Além disso, os modelos com simetria restringem os deslocamentos laterais e possíveis instabilidades na alma da viga. Assim, espera-se que os modos de falha observados sejam limitados ao esmagamento do concreto e ao escoamento do aço, desconsiderando outras formas de colapso relacionadas à instabilidade.

3.3.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

O regime elasto-plástico perfeito para o aço do perfil e conectores de cisalhamento foi adotado com base no alongamento do aço apresentados na **Tabela 2**. Quanto as armaduras de reforço da laje, utilizou-se o modelo elasto-plástico com encruamento positivo de acordo com a **Figura 33**.

Figura 33: Modelo elasto-plástico com encruamento positivo



Fonte: Rossi *et al.* (2020)

Para o comportamento não linear do concreto foi adotado o modelo CDP (Concrete Damage Plasticity). O modelo constitutivo CDP, implementado no ABAQUS, baseia-se na formulação proposta por Lubliner *et al.* (1989) e posteriormente estendida por Lee; Fenves (1998). Os parâmetros utilizados para caracterizar a plasticidade incluem o ângulo de dilatação (ψ), a excentricidade (ξ), a razão entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}), a forma da superfície de ruptura no plano octaédrico (K_c), e o parâmetro de viscosidade (μ). As equações do CDP e demais parâmetros são apresentadas no manual do ABAQUS (ABAQUS, 2014). A **Tabela 3** contém os valores destes parâmetros que foram empregados no desenvolvimento do modelo numérico.

Tabela 3: Parâmetros de entrada CDP para o UHPC

Parâmetro	Valor	Referência
ψ (o)	56	Ge <i>et al.</i> (2023)
ξ	0,1 (<i>Default</i>)	Sousa <i>et al.</i> (2021)
σ_{b0}/σ_{c0}	1,07 (<i>Default</i>)	Krahl; Gidrão; Carrazedo (2019)
K_c	2/3 (<i>Default</i>)	Sousa <i>et al.</i> (2021)
μ (s-1)	0,0005	Zhu; Ding; Wang (2022)

Fonte: Autor (2025)

Foi adotado o modelo de Carreira e Chu (1985) para representar o comportamento da evolução da superfície de ruptura em estados de compressão, conforme as Equações 1 e 2.

$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{\beta(\varepsilon/\varepsilon_c')}{\beta - 1(\varepsilon/\varepsilon_c')^\beta} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c'}{\varepsilon_c' E_i}} \quad (2)$$

Onde:

f_c : Tensão no concreto;

f_c' : Tensão máxima resistida pelo concreto;

ε : Deformação do concreto;

ε_c' : Deformação para a tensão f_c' ;

β : parâmetro do material por meio da relação tensão-deformação;

E_i : Modulo de elasticidade inicial.

O modelo constitutivo adotado para simular o comportamento a tração do UHPC foi proposto por Li e Leung (1992). Este modelo descreve o comportamento do material antes e depois do arrancamento das fibras na matriz submetida a tração. Considera-se a resistência máxima de arrancamento das fibras, σ_{f0} e a abertura de fissura de pico w_0 na curva. Após o arrancamento das fibras, ocorre o *softening* da matriz, representado pela Equação 4. A Figura 3 ilustra o comportamento do compósito, que é a soma dos efeitos das fibras e da matriz, conforme descrito pelas Equações 3 e 4.

$$\sigma_f(w) = \begin{cases} \sigma_{f0} \left(2 \sqrt{\frac{w}{w_0}} - \frac{w}{w_0} \right)^2 & \text{Para } w \leq w_0 \\ \sigma_{f0} \left(1 - \frac{4w}{L_f} \right)^2 & \text{Para } w \geq w_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_m(w) = f_t \cdot \exp \left(-2 \frac{f_t \cdot w}{G_f} \right) \quad (4)$$

Onde:

w : Abertura de fissuras;

w_0 : Abertura com maior resistência;

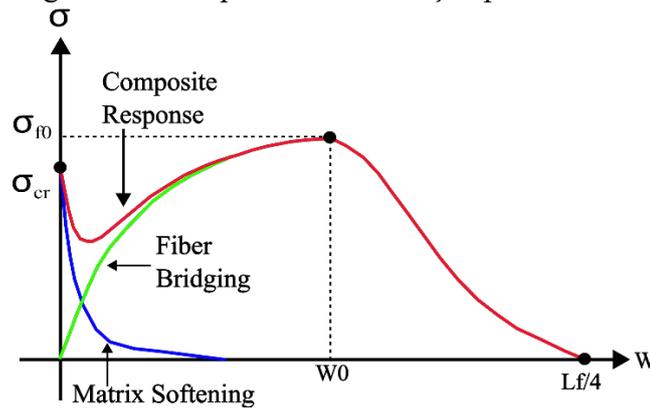
σ_{f0} : Resistência máxima à tração;

L_f : Comprimento das fibras;

f_t : Resistência à tração do concreto;

G_f : Energia de fratura.

Figura 34: Comportamento a tração para o UHPC



Fonte: (Benedito *et al.* (2023))

Foi utilizado o modelo de Bitel e Mark (2006), descrito pela Equação 5, para representar a variável de dano na compressão (d_c) do UHPC.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (5)$$

Em que b_c é um fator constante de valor 0,7 e que está de acordo com os ensaios cíclicos à compressão do concreto apresentado por Sinha *et al* (1964). A variável de dano sob tração não é considerada para o UHPC, de acordo com Mobasher (2011).

Para simular a variável de dano (d) para compressão (f_c) e tração (f_t) do concreto convencional, foram utilizadas as Equações 6 e 7, conforme descritas por Pavlović *et al.* (2013).

Os valores dos parâmetros de entrada do CDP para o concreto convencional são apresentados na **Tabela 4**.

$$d_c = 1 - (\sigma / f_c) \quad (6)$$

$$d_t = 1 - (\sigma / f_t) \quad (7)$$

Tabela 4: Parâmetros de entrada CDP para concreto convencional

Parâmetro	Valor	Referência
ψ (o)	36	Rossi <i>et al.</i> (2020)
ξ	0,1 (<i>Default</i>)	Rossi <i>et al.</i> (2020)
σ_{b0}/σ_{c0}	1,16 (<i>Default</i>)	Rossi <i>et al.</i> (2020)
Kc	2/3 (<i>Default</i>)	Rossi <i>et al.</i> (2020)
μ (s-1)	0,001	Rossi <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autor (2025)

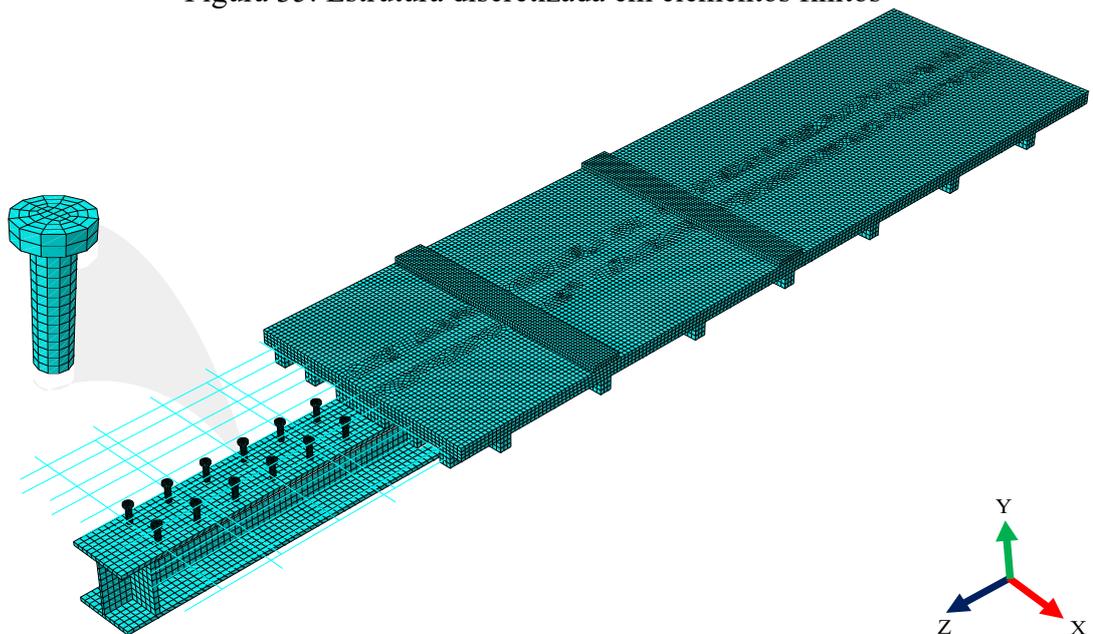
3.3.1.1 MALHA DO MODELO

Os perfis de aço, laje de concreto nervurada, os conectores de cisalhamento e atuadores foram divididos em elementos sólidos C3D8R, que são hexaédricos de aproximação linear com oito nós, possuindo três graus de liberdade por nó e integração reduzida. Por meio do elemento C3D8R, é possível realizar análise não linear e ainda permitir a visualização de fissuras de acordo com o critério de resistência Concrete Damage Plasticity. Por fim, as armaduras da laje foram divididas em elementos de treliça T3D2, que possuem dois nós com aproximação linear e três graus de liberdade por nó. A **Tabela 5** fornece informações sobre os elementos finitos e suas dimensões correspondentes que foram empregados para discretizar as vigas mistas de aço e concreto que foram analisadas. A **Figura 35** apresenta a discretização do modelo. Estas dimensões foram adotadas após análise de malha fazendo o balanço entre representatividade do problema mecânico e custo computacional.

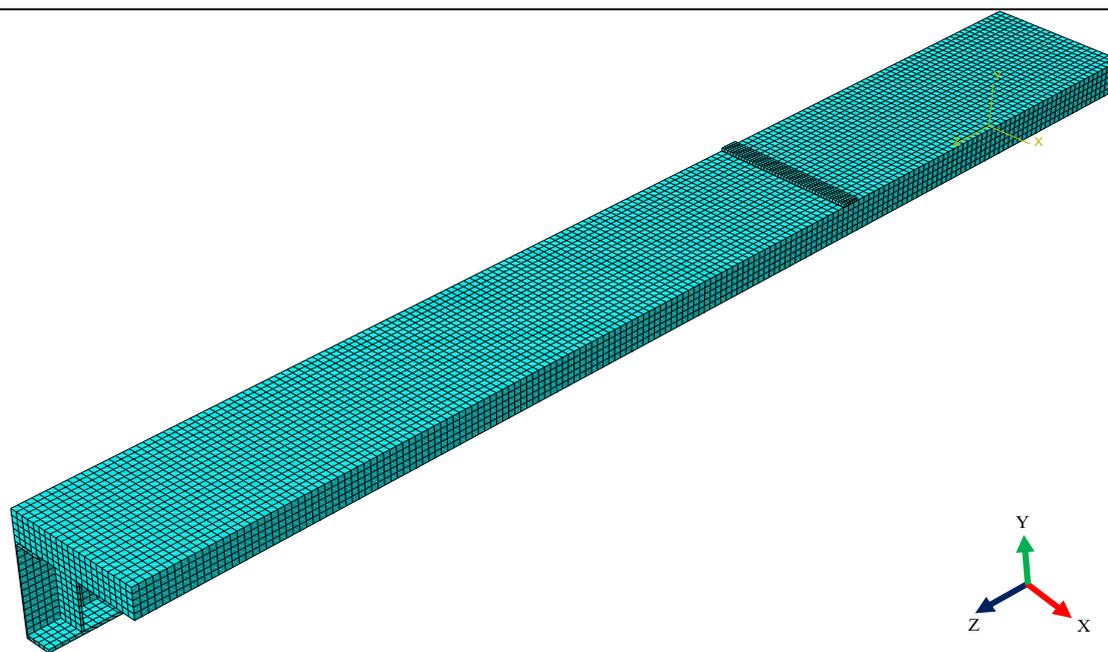
Tabela 5: Discretização do modelo			
Parte do modelo	Tipo do elemento	Modelo Completo Dimensão do elemento	¼ de Modelo Dimensão do elemento
Armaduras	T3D2	20 mm	20 mm
Atuador	C3D8R	20 mm	20 mm
Conector pino com cabeça	C3D8R	4 mm	-
Laje de concreto	C3D8R	15 mm	40 mm
Perfil I	C3D8R	20 mm	40 mm

Fonte: Autor (2025)

Figura 35: Estrutura discretizada em elementos finitos



(a) Modelo completo laje nervurada em UHPC



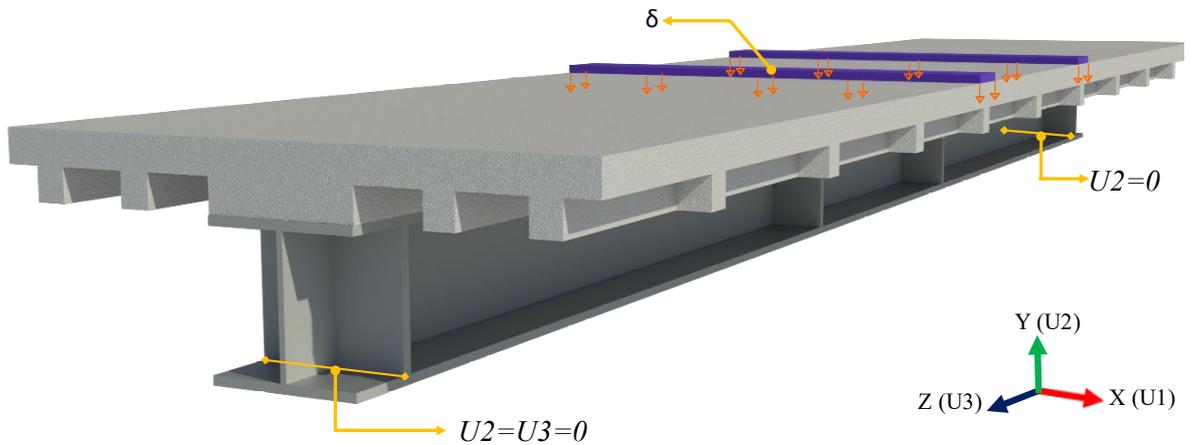
(b) Modelo simplificado $\frac{1}{4}$ de viga mista convencional

Fonte: Autor (2025)

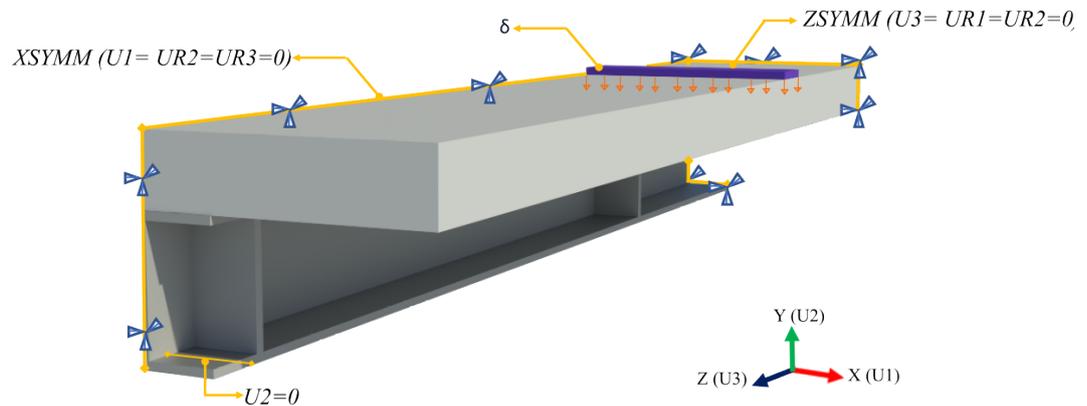
3.3.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno são apresentadas na **Figura 36**. Para o modelo completo (**Figura 36 a**), a viga mista foi simplesmente apoiada, desta forma, restringiu-se os deslocamentos verticais (U_2) em ambas as extremidades e o deslocamento longitudinal (U_3) em apenas uma delas. Para o modelo simplificado (**Figura 36 b**), restringiu-se os deslocamentos verticais (U_2) em uma das extremidades e aplicou-se simetria nos eixos X ($XSYMM U_1=UR_2=UR_3=0$) e Z ($ZSYMM U_3=UR_1=UR_2=0$). Para uma melhor distribuição da aplicação do deslocamento, foram utilizados dois atuadores de aço com dimensões de 100 mm x 810 mm e 20 mm de espessura. Assim, a área de atuação do deslocamento foi de 100 x 810 mm² para cada lado, estando posicionados a 390 mm a partir do centro do vão para calibração da viga experimental Zhu *et al.* (2021) e um terço para viga mista CBCA. Além disso, enrijecedores foram empregados nos pontos de aplicação de deslocamento e nas reações de apoio.

Figura 36: Condições de contorno e aplicação do deslocamento



(a) Modelo completo laje nervurada em UHPC



(b) Modelo simplificado 1/4 de viga mista convencional

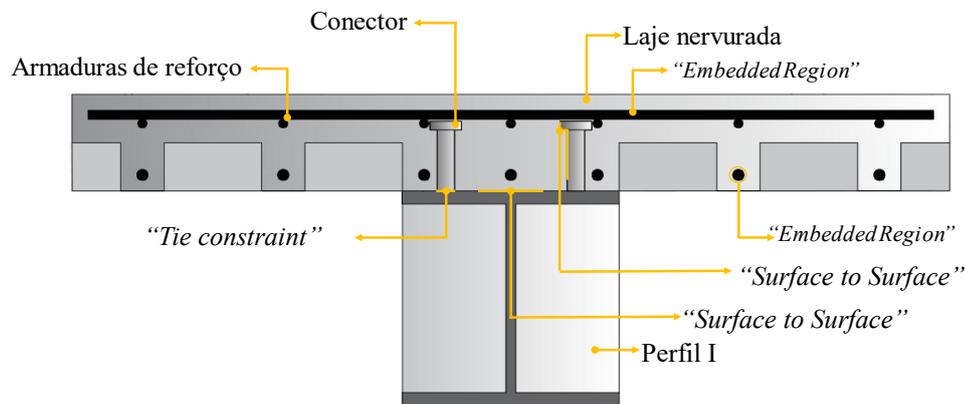
Fonte: Autor (2025)

3.3.1.3 CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS ESTRUTURAIS (INTERAÇÕES) E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

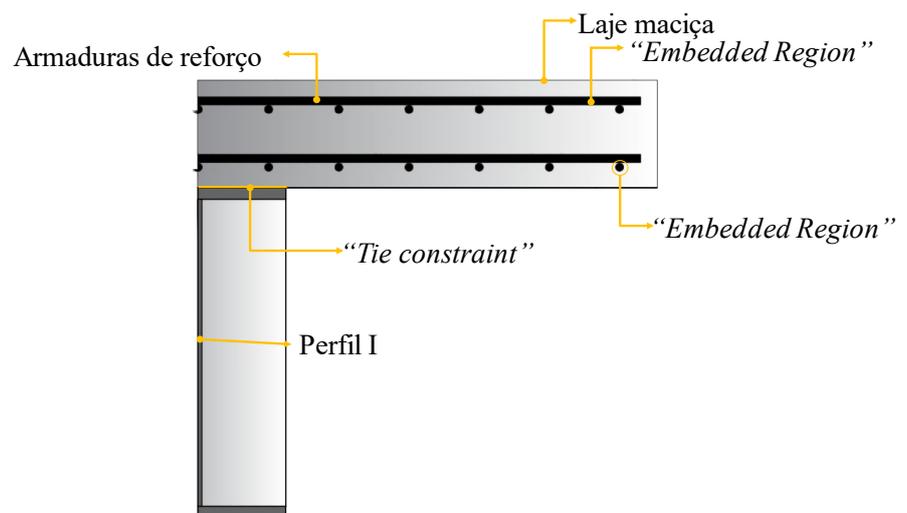
Para o modelo completo (**Figura 37a**) a interação perfil-conector, foi utilizada a opção “*Tie constraint*”, que simula a conexão soldada entre esses dois elementos, impedindo o deslocamento relativo entre eles. Essa mesma opção foi utilizada para a interação laje-atuador. Já para as interações perfil-laje e conector-laje, optou-se pela interação de superfície (*surface-to-surface interaction*), na qual o comportamento normal foi definido como “*Hard contact*” e o comportamento tangencial para considerar deslizamento como “*Penalty*”. O coeficiente de atrito foi definido como 0,4, seguindo a referência de Rossi *et al.*, (2020).

Já para modelo simplificado (**Figura 37b**) foi utilizada a opção '*Tie Constraint*' para representar a interação entre o perfil e a laje, bem como entre a laje e o atuador. Essa restrição impede deslocamentos relativos entre os elementos, simulando um grau de interação total de uma estrutura mista e, assim, dispensando o uso de conectores de cisalhamento no modelo simplificado. Esta hipótese é adotada como válida com base em todas as simulações e experimentos considerados nesta pesquisa. Cabe destacar que é importante a verificação da interação parcial quando se realiza o projeto de vigas mistas segundo a ABNT NBR 8800:2024. Por fim, a interação entre a armadura e o concreto da laje foi incorporada por meio da utilização da opção de elementos embebidos (*embedded region*).

Figura 37: Interações entre os elementos



(a) Modelo completo laje nervurada em UHPC



(b) Modelo simplificado 1/4 de viga mista convencional

Fonte: Autor (2025)

Para a calibração de ambos modelos, foi realizada uma análise não linear estática utilizando-se a técnica de Newton-Raphson, com controle de deslocamento. Para análise e critério de parada da viga do Zhu *et al.* (2021), considerou-se a o deslocamento vertical para cada modelo e carga última aplicada conforme **Tabela 6**. Já para CBCA o critério foi analisado pela curva carga x deslocamento. Não foi considerado as imperfeições iniciais.

Para a calibração dos modelos foi realizada uma análise não linear estática utilizando-se a técnica de Newton-Raphson, com controle de deslocamento. Como critério de parada da viga do Zhu *et al.* (2021), considerou-se o deslocamento vertical correspondente a carga última aplicada conforme **Tabela 6**. Já para CBCA o critério de parada foi o deslocamento de 200mm referente a queda da curva x deslocamento. Não foi considerado as imperfeições iniciais.

Tabela 6: Dados experimentais

Modelo	P experimental (kN)	ϵ_c	Deslocamento exp (mm)
SUBW1	631.32	-0.00416	93.41
SUBW2	627.66	-0.00359	86.95
SUBW3	700	-0.00414	108.24
SUBW4	623.2	-0.00435	75.96
SUBW5	637.6	-0.00454	89.57

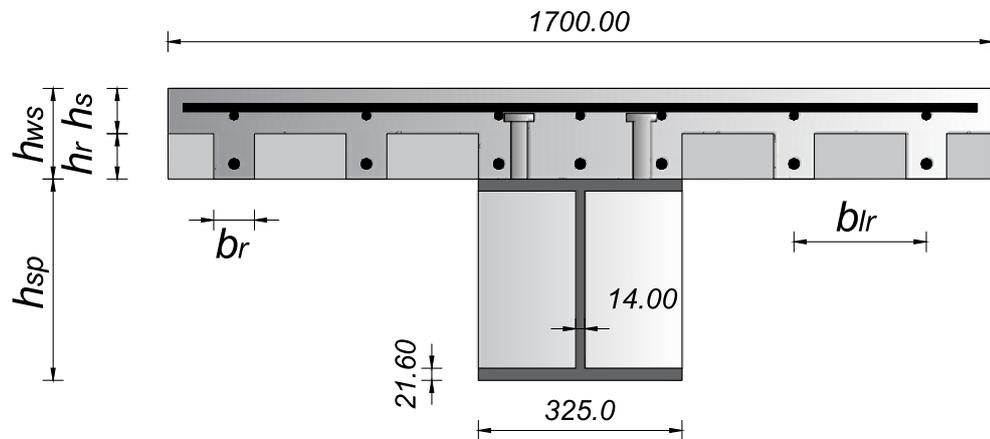
Fonte: Autor (2025)

3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a calibração dos modelos, foi realizado uma análise de sensibilidade para escolher as variáveis que serão otimizadas e as restrições. Desta maneira, poderá ser analisada quais variáveis possuem maior impacto na redução do CO₂. Assim, criou-se uma estrutura com dimensões semelhantes às de uma viga mista da ponte CBCA, substituindo-se a laje convencional maciça por uma laje nervurada em UHPC, conforme a proposta de Zhu *et al.* (2021).

Para o perfil foi variado apenas altura do perfil (h_{sp}), já para laje nervurada variou-se altura da laje (h_s), altura da nervura (h_r), largura da nervura (b_r) espaçamento das nervuras longitudinais (b_{lr}) e espaçamento das nervuras transversais (l_{tr}). A espessura da mesa de 21,60 mm, a espessura da alma do perfil de 14 mm, a largura da mesa de 325 mm e o comprimento da seção de 14000 mm foram considerados como parâmetros de referência, equivalentes às dimensões da seção da ponte convencional. Essas dimensões serão mantidas fixas ao longo do processo de otimização (Figura 38).

Figura 38: Variáveis de decisão

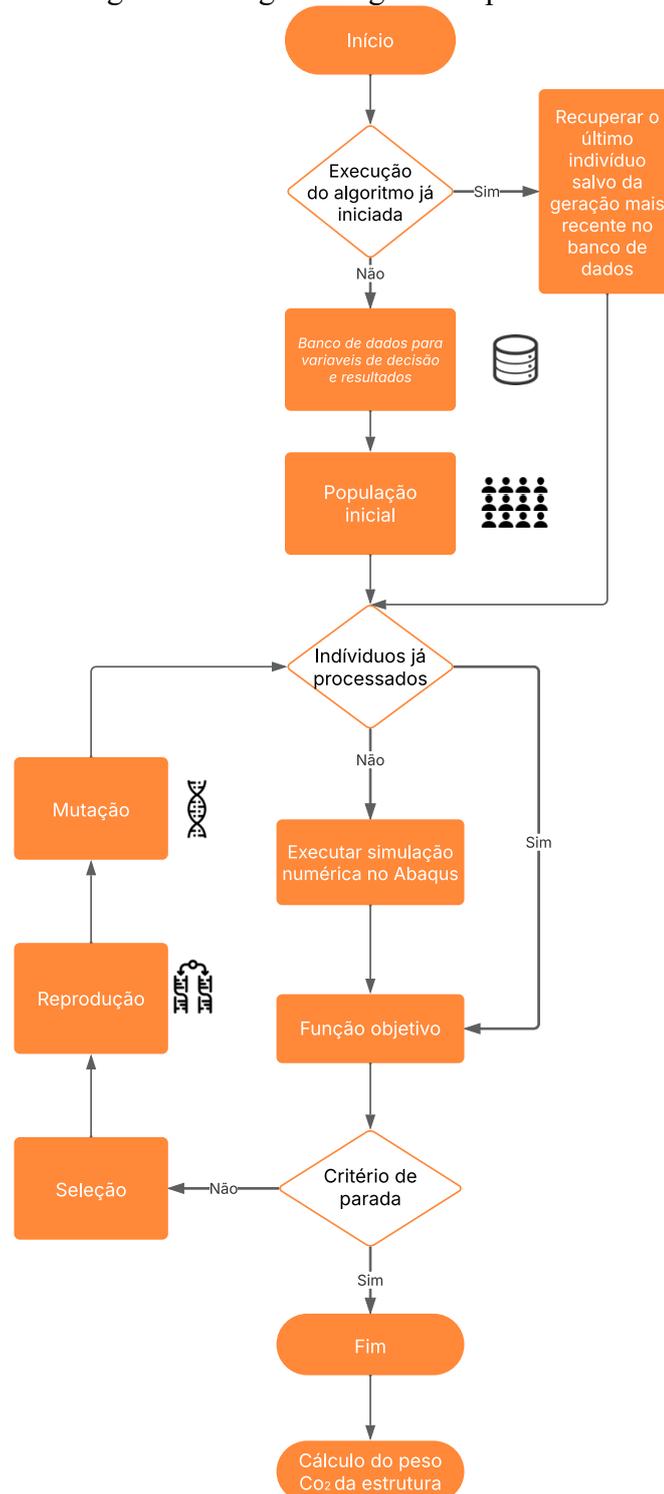


Fonte: Autor (2025)

3.5 AUTOMATIZAÇÃO DA ESTRUTURA MISTA UTILIZANDO AGs

Posteriormente à definição das variáveis de decisão do problema de otimização, foi desenvolvida uma rotina em linguagem Python utilizando algoritmos genéticos (AG) para otimizar a seção transversal da viga mista com laje nervurada em UHPC, a partir das variáveis selecionadas no estudo de sensibilidade. Essa rotina foi executada no ambiente do ABAQUS, integrando o processo de otimização com as simulações numéricas do modelo estrutural. Foram utilizadas variáveis discretas inteiras na formulação deste AG, de modo a representar adequadamente os parâmetros geométricos do problema. A estrutura do processo de otimização é apresentada na **Figura 38**. O processo de otimização consistiu em gerar uma população inicial de 30 indivíduos, que evoluiu ao longo de 10 gerações, totalizando 300 indivíduos avaliados durante toda a execução do AG. O critério de parada utilizado foi definido como o número máximo de gerações, com base em uma análise prévia da convergência do Algoritmo Genético (AG). A **Figura 39** apresenta o fluxograma do AG criado para este trabalho.

Figura 39: Fluxograma do algoritmo genético para o trabalho proposto



Fonte: Autor (2025)

A função objetivo deste problema foi minimizar a diferença entre a curva carga \times deslocamento do modelo numérico com laje nervurada de UHPC e a curva de referência da estrutura da ponte CBCA, com laje convencional, considerada como o caso de referência. Para

isso, foram definidos cinco pontos fixos de deslocamento ao longo da curva: 80 mm, 100 mm, 120 mm, 160 mm e 200 mm. Em cada ponto de deslocamento, compararam-se as cargas obtidas no modelo numérico com as cargas de referência da ponte CBCA, e o erro relativo foi calculado por meio da Equação 8:

$$Erro_{rel} = \left| \frac{Carga_{ref} - Carga_{obtida}}{Carga_{ref}} \right| \quad (8)$$

Assim, a função objetivo foi definida como a média aritmética simples dos erros relativos calculados nos cinco deslocamentos, conforme apresentado na Equação 9. O objetivo é minimizar esse valor para cada indivíduo, buscando soluções com melhor desempenho em relação às medições de deslocamento.

$$Função\ objetivo = \min_{hsp, hs, hr, br, ltr} \left(\frac{\sum_i^5 Erro_{rel,i}}{5} \right) \quad (9)$$

Sujeito a:

$$450\text{ mm} < h_{sp} < 550\text{ mm}$$

$$45\text{ mm} < h_s < 100\text{ mm}$$

$$50\text{ mm} < h_r < 200\text{ mm}$$

$$45\text{ mm} < b_r < 60\text{ mm}$$

$$700\text{ mm} < l_{tr} < 800\text{ mm}$$

Em que o $Erro_{rel,i}$ é o erro calculado para cada ponto de deslocamento i . O deslocamento de 200 mm foi adotado como critério de parada do modelo numérico, limitando a análise ao comportamento estrutural até esse ponto. Essa abordagem permitiu quantificar a qualidade de cada indivíduo, de modo que valores menores da função objetivo indicavam uma melhor aproximação da curva carga x deslocamento em relação à estrutura de referência da ponte CBCA.

Para a seleção dos indivíduos, foi aplicado o método da roleta, no qual indivíduos com menor erro da função objetivo têm maior probabilidade de serem escolhidos para o cruzamento. O cruzamento foi realizado com uma taxa de 80%, utilizando o método de múltiplos pontos, que promove uma maior diversidade genética (Hassanat et al., 2019).

A mutação foi aplicada com uma taxa de 5% para cada variável de cada indivíduo, exceto para o melhor da população (elitismo), que é preservado sem alterações. A cada geração,

para cada indivíduo (exceto o melhor), cada uma das seis variáveis de projeto tinham 5% de chance de ser modificada. Caso a mutação ocorresse, o valor da variável era substituído por um novo valor aleatório dentro dos limites pré-definidos para aquela variável. Essa estratégia permite a introdução de novas soluções no espaço de busca e ajuda a evitar a convergência prematura para mínimos locais (Castilho, 2003).

Além disso, foi adotado o elitismo, um mecanismo no qual o melhor indivíduo da geração anterior é mantido intacto na geração seguinte, garantindo que as melhores soluções não sejam perdidas ao longo do processo evolutivo.

Além da função objetivo, foi calculada a emissão de CO₂ associada a cada solução estrutural gerada. Dessa forma, ao término da execução do AG, foi possível identificar os indivíduos que melhor equilibraram a precisão na aproximação da curva carga x deslocamento e a minimização da emissão de CO₂. Essa estratégia final possibilitou a escolha de soluções otimizadas tanto em termos de desempenho estrutural quanto de impacto ambiental.

Assim, foram criados nove Algoritmos Genéticos (AG) distintos, sendo três AGs para cada resistência à compressão do UHPC: 120 MPa, 150 MPa e 180 MPa. O objetivo principal foi avaliar o desempenho estrutural da viga mista em diferentes cenários de resistência e identificar a melhor solução otimizada para cada resistência considerada. Essa abordagem foi conduzida para analisar o impacto da otimização estrutural correlacionado com a emissão de CO₂, buscando compreender se o aumento da resistência do UHPC influencia na redução do consumo de material e, conseqüentemente, na pegada de carbono.

Adicionalmente, para o UHPC com resistência de 150 MPa, foi realizada uma análise complementar que envolveu a verificação da emissão de CO₂ associada a diferentes traços de UHPC (Hassan *et al.*, 2012; Ganesh; Murthy, 2019; Zhu *et al.*, 2021), visando identificar as soluções mais sustentáveis e mantendo o desempenho estrutural adequado.

3.6 CÁLCULO DE EMISSÃO DE CARBONO

O cálculo da emissão de carbono deve ser realizado para cada estágio do ciclo de vida de uma estrutura. Neste estudo serão considerados os módulos A1, A2, A3. Para isso, é necessário calcular as emissões separadamente para cada módulo, realizando o somatório do produto entre a quantidade de cada material unitário (M) da estrutura e seu respectivo fator de emissão de CO₂, conforme indicado na Equação 10.

$$E_{co2} = \sum Mx f_{co2} \quad (10)$$

Onde:

E_{co2} : Emissão de CO2 (kg CO2);

M : Quantidade unitário do material (unidade);

f_{co2} : Fator de emissão de CO2 (kg CO2/ unidade)

Para o cálculo do módulo A1, utiliza-se a Equação 10. Já para o módulo de transporte (A2), o cálculo é realizado de acordo com a equação 11, onde D representa a distância em quilômetros entre o portão da fábrica onde a matéria-prima é produzida até o local de preparação do produto, e a massa da matéria-prima (M) deve ser expressa em toneladas.

$$E_{co2} = \sum MxDx f_{co2} \quad (11)$$

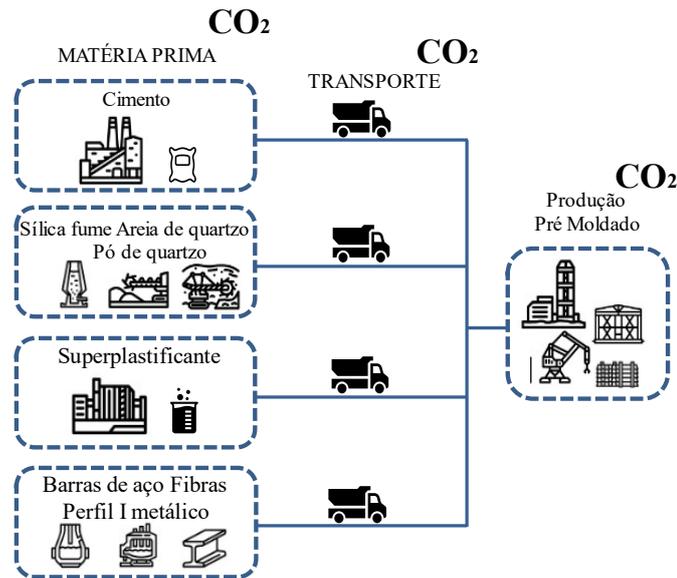
Onde:

E_{co2} : Emissão de CO2 (kg CO2);

M : Quantidade unitário do material (t.Km);

f_{co2} : Fator de emissão de CO2 (kg CO2/t.Km).

Por fim, para o cálculo do módulo A3, todas as etapas de fabricação devem ser consideradas, utilizando também a Equação 10. A **Figura 40** demonstra as etapas para a quantificação da emissão de CO2 no estágio do produto.

Figura 40: Fluxograma para quantificação de CO₂ para o estágio do produto

Fonte: Autor (2025)

O fator de emissão de CO₂ deve ser obtido pelas empresas fabricantes dos produtos. THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (2022) indica que, para uma melhor aproximação da quantidade real de emissão de carbono, é recomendado utilizar os fatores de emissão das empresas regionais ou do país onde a edificação será realizada. Caso não se disponha desse fator das empresas da região ou do país, pode-se utilizar o fator mundial ou de outra região. Segundo Silva. *et al* (2024) a Sidac (Sistema de informação do desempenho ambiental da construção) é a primeira organização a quantificar os fatores de emissão de CO₂ no Brasil. Em seu banco de dados, são fornecidos os valores de emissão máxima e mínima de carbono para alguns materiais da construção civil, incluindo composições já criadas, como concretos de 30, 45 e 50 MPa. Para fins de cálculo de emissão de CO₂, o fator de emissão pode ser a média dos valores máximos e mínimos fornecidos.

Para este trabalho, será priorizado o uso de materiais brasileiros. Contudo, para os materiais que não estiverem disponíveis no banco de dados da Sidac, serão utilizadas referências internacionais. Como o concreto de 30 MPa já possui composição definida pela Sidac, a quantificação de emissão de carbono para a estrutura mista convencional foi realizada levantando-se os fatores de emissão de carbono dos elementos constituintes. Por outro lado, como a estrutura em UHPC não possui composição definida, foi necessário realizar o levantamento da emissão de carbono para 1 metro cúbico de UHPC para, então, calcular a emissão total. Portanto, foi realizada uma composição baseada no traço de UHPC desenvolvido

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

por Zhu et al. (2021), com resistência de 153 MPa. Para isso, foi necessário levantar o fator de emissão de carbono para cada material constituinte do UHPC. A emissão de carbono foi calculada para um metro cúbico de concreto, utilizando o mesmo método que a Sidac aplicou para o concreto de 30 MPa.

A **Tabela 7**, **Tabela 8**, **Tabela 9** e **Tabela 10** apresentam referências dos fatores de emissão CO₂ para matérias-primas, transportes, fontes de energia e elementos fabricados, respectivamente. A composição de concreto com f_{ck} 30MPa já inclui os módulos A1, A2 e A3. É importante destacar também que a emissão de CO₂ para a produção da viga mista (estágio do produto) considerou apenas a produção do cimento no módulo A3.

Tabela 7: Fator de emissão de CO₂ para matéria-prima

Matéria-prima	Unidade	Fator de emissão CO ₂ (kg CO ₂ /unidade)	Referências
Cimento	Kg/m ³	0.83	Chiaia et al. (2014)
Sílica fume	Kg/m ³	0.0039	Mahjoubi et al. (2022)
Areia	Kg/m ³	0.01251	Ganesh; Murthy (2019)
Areia de quartzo	Kg/m ³	0.001290	Müller; Haist; vogel (2014)
CGBS	Kg/m ³	0.07	Ganesh; Murthy (2019)
Pó de vidro	Kg/m ³	0.123	Fan et al. (2024)
Pó de quartzo	Kg/m ³	0.00316	Müller; Haist; vogel (2014)
Superplastificante	Kg/m ³	0.72	Chiaia et al. (2014)
Água	Kg/m ³	-	-
Fibras	Kg/m ³	1.49	Chiaia et al. (2014)

Fonte: Autor (2025)

Tabela 8: Fator de emissão de CO₂ para transporte

Transporte Modelo	Fator de emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /t.Km)	Referências
Carreta 5E	0.06091	Sidac
Truck 3E	0.06801	Sidac
Toco 2E	0.09778	Sidac

Fonte: Autor (2025)

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Tabela 9: Fator de emissão de CO₂ para energia utilizada na produção do concreto

Fontes de energia	Unidade	Fator de emissão CO ₂ (kg CO ₂ /unidade)	Referências
Eletricidade	kWh	0.07	Sidac
Oléo Diesel	L	2.29	Sidac

Fonte: Autor (2025)

Tabela 10: Fator de emissão de CO₂ para produtos fabricados

Material	Unidade	Fator de emissão CO ₂ (kg CO ₂ /unidade)	Referências
Concreto 30 MPa	kg/m ³	283.8	Sidac
perfil solido	Kg	1.58	Istructe (2022)
Barra de aço	Kg	0.74	Sidac
Pinos	Kg	2.45	Istructe (2022)

Fonte: Autor (2025)

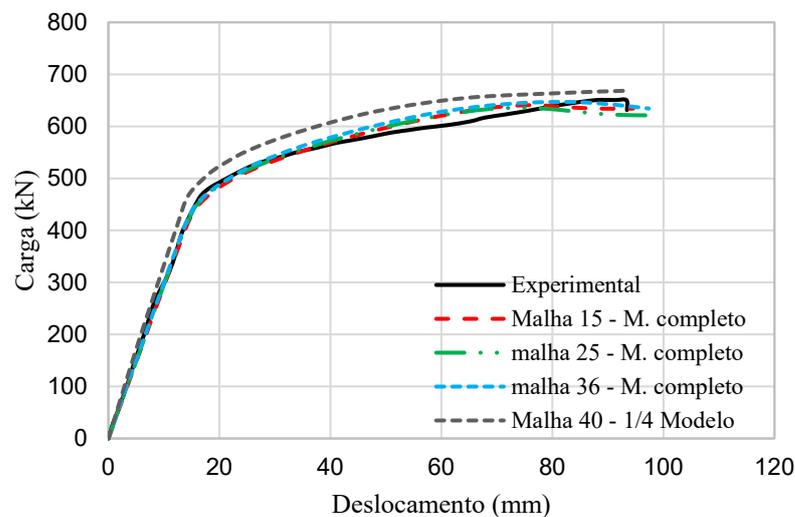
CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ZHU *ET AL.* (2021)

A **Figura 41** ilustra o estudo de sensibilidade da malha comparando as curvas carga-deslocamento realizado do modelo completo e do modelo simplificado da viga SUBW1. As curvas apresentaram comportamentos similares, indicando que o modo de falha e o comportamento global do modelo para as malhas utilizadas foram pouco influenciados pelos modelos constitutivos de aço e concreto. O modelo adotado para otimização foi o de $\frac{1}{4}$ da viga, e o elemento finito de malha escolhido possui dimensão de 40 mm para a laje e o perfil, devido a boa representatividade do comportamento mecânico e menor custo computacional. Além disso, a interação por 'Tie Constraint' entre a laje e o perfil no modelo simplificado apresentou boa representatividade ao simular o grau de interação completa da estrutura mista. Dessa forma, as estruturas que serão otimizadas por meio dos AGs sempre considerarão a interação completa da estrutura mista. Esta hipótese foi corroborada com base na calibração dos experimentos de Zhu et al. Vale ressaltar que a verificação da interação da estrutura mista deve ser realizada conforme os critérios estabelecidos na ABNT NBR 8800:2024, o que, no entanto, não foi o foco deste trabalho.

Figura 41: Relação carga x deslocamento de acordo com tamanho do elemento finito

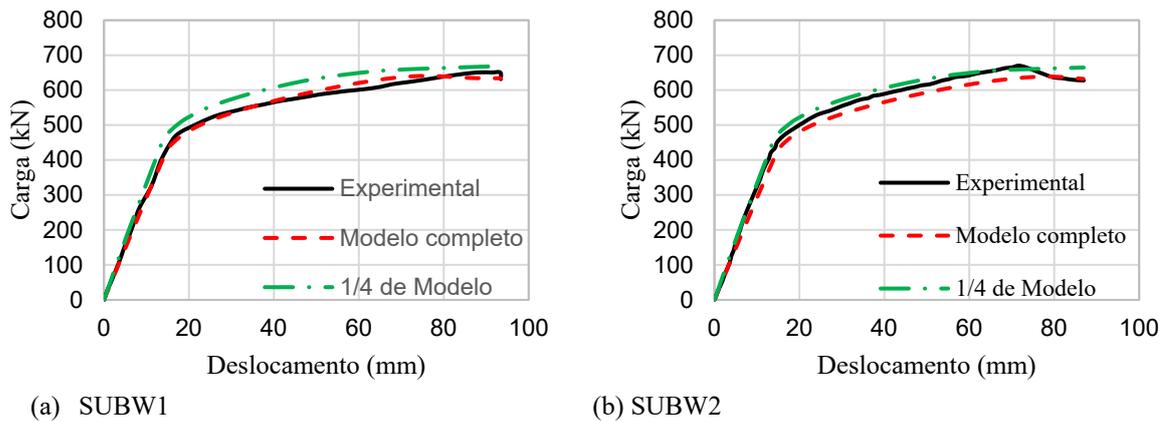


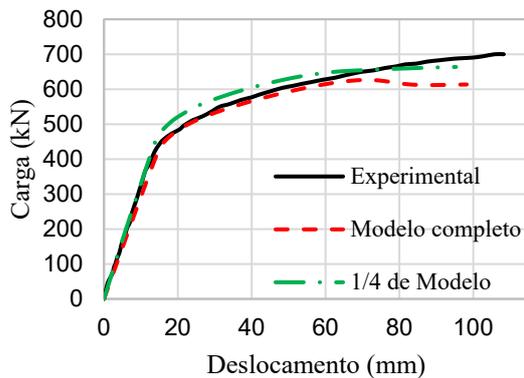
Fonte: Autor 2025

Portanto, com o objetivo de calibrar os modelos para o estudo paramétrico, as curvas de carga x deslocamento geradas pelo MEF para as cinco configurações da estrutura mista com laje nervurada em UHPC foram comparadas com as curvas correspondentes obtidas em ensaios experimentais (Figura 42).

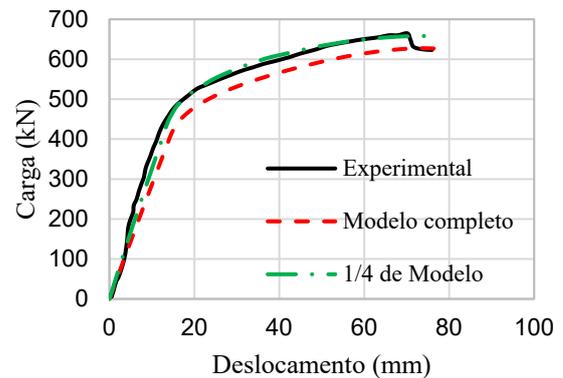
Zhu *et al.* (2021) definiram o comportamento mecânico da estrutura em três estágios: elástico, plástico e de ruptura. A fase elástica foi caracterizada pelo comportamento linear até o início do escoamento da mesa inferior do perfil. A fase plástica correspondeu ao intervalo entre o escoamento da mesa inferior do perfil e o início da fissuração das nervuras longitudinais. Já a fase de ruptura foi marcada pela progressão das fissuras nas nervuras longitudinais, com a linha neutra deslocando-se gradativamente em direção ao concreto. Nesse processo, uma das fissuras se tornou predominante, desenvolvendo-se como a fissura principal, enquanto as demais permaneceram pouco perceptíveis. Por fim, ocorreu o esmagamento da face superior da laje de UHPC. A deformação de compressão na fase elástica para o UHPC foi de 0,00045, enquanto a deformação de tração no aço foi de 0,001. Na fase de ruptura, a deformação de compressão no UHPC foi de 0,0045, e a deformação no perfil variou entre 0,002 e 0,0028.

Figura 42: Relação carga x deslocamento

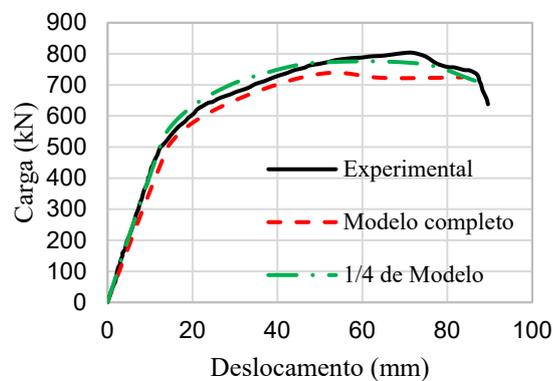




(c) SUBW3



(d) SUBW4



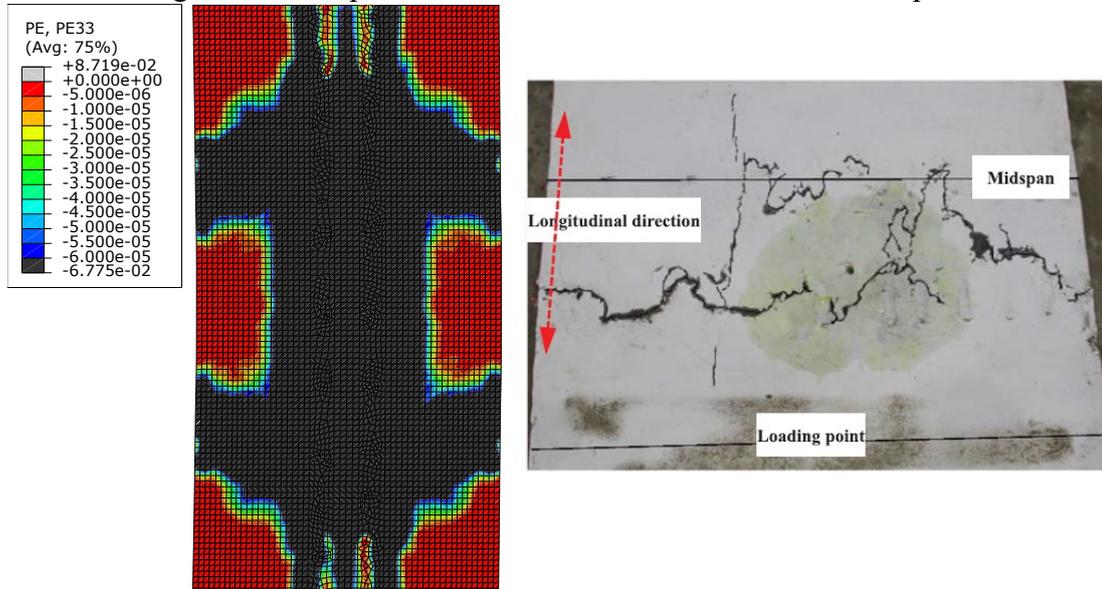
(e) SUBW5

Fonte: Autor (2025)

No estudo experimental conduzido por Zhu *et al.* (2021), o modo de falha observado para todas as configurações envolveu o esmagamento do UHPC e o escoamento do aço, seguindo um padrão típico de falha por flexão. A fissura principal ocorreu entre duas nervuras transversais. Além disto, para as configurações SUBW2, SUBW3 e SUBW5 também foi observado fissuras longitudinais entre o apoio e aplicação de carga nas regiões dos conectores. Este fato decorreu devido a taxa de reforço das nervuras transversais. Para SUBW1, SUBW3, SUBW4 a taxa de reforço foi de 0,45%, enquanto para a SUBW2 e SUBW5 a taxa de reforço foi de 0,40% e 0,33%, respectivamente. Por mais que a taxa para SUBW3 tenha sido igual as outras, esta configuração apresentava um espaçamento maior entre as nervuras longitudinais, afetando assim a integridade da laje. As fissuras começaram pelas nervuras longitudinais e se propagaram até o topo. Conforme o incremento da carga a linha neutra ultrapassou o perfil gerando tensões de tração na nervura longitudinal. No experimento, foi identificada apenas uma fissura principal a tração, enquanto as outras não evoluíram de maneira similar. Isto acontece porque as fibras do UHPC desempenharam um papel crucial na redistribuição das cargas,

ajudando a impedir a progressão das fissuras. Por fim, ocorreu a fissuração por esmagamento no topo da laje (**Figura 43**).

Figura 43: Comportamento mecânico da SUWB3 – vista superior



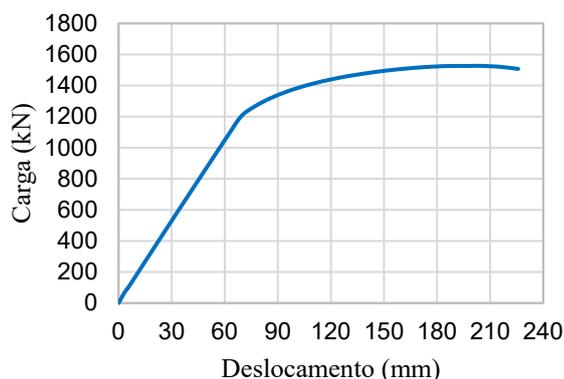
Fonte: Autor (2025)

4.2 ESTRUTURA CONVENCIONAL

A **Figura 44** apresenta a relação carga x deslocamento para seção efetiva de cálculo de uma ponte vicinal mista de 14 metros dimensionada pelo CBCA, sendo o vão efetivo de 13,6 m. Para a análise estrutural e definição do critério de carga última, foi adotado o deslocamento de 200 mm como referência, correspondente ao ponto da curva carga x deslocamento em que se observa o início da perda da capacidade de carga da estrutura. O momento de plastificação da seção mista, reportado pelo manual do CBCA, é de 1857 kN.m, calculado com base na norma ABNT NBR 8800:2024. Por sua vez, o valor máximo de carga obtido por meio da simulação numérica foi de 1526 kN.m. Considerando um modelo estático de viga biapoiada, com cargas concentradas aplicadas nos terços médios do vão (metade da carga total em cada ponto), o momento fletor máximo pode ser estimado pela Equação 12. A diferença entre o momento de plastificação obtido pela abordagem analítica e o resultado numérico foi inferior a 10%, indicando boa aproximação entre os métodos.

$$M = \frac{P.L}{12} = \frac{1526.13,6}{12} = 1729 \text{ kNm} \quad (12)$$

Figura 44: Relação carga x deslocamento do MEF para estrutura convencional



Fonte: Autor (2025)

4.3 CÁLCULO DE EMISSÃO DE CARBONO

A **Figura 45** apresenta as emissões de CO₂ para a produção das matérias-primas referentes ao estágio A1 para a produção de 1 m³ de UHPC (Concreto de Ultra-Alto Desempenho) de diferentes traços da literatura. A imagem exibe três traços distintos de UHPC com resistência de 150 MPa (Ganesh; Murthy, 2019), além de um traço com resistência de 120 MPa (Ganesh; Murthy, 2019), e outro de 180 MPa (Fan *et al.*, 2024). Observa-se que as matérias-primas que mais contribuem para a emissão de CO₂ no UHPC são o cimento e as fibras de aço, reforçando a importância de otimizar a formulação do traço visando à sustentabilidade. A otimização estrutural deve ser acompanhada pela escolha adequada do traço de UHPC, uma vez que misturas com resistências similares podem apresentar emissões de CO₂ significativamente diferentes. Um exemplo dessa variação pode ser observado ao comparar os traços de Hassan *et al.* (2012); Ganesh; Murthy (2019); Zhu *et al.* (2021), todos com resistência nominal de 150 MPa, porém com emissões distintas. O traço de Zhu *et al.* (2021) apresenta uma emissão 30% maior em comparação ao traço de Ganesh; Murthy (2019), demonstrando que uma seleção criteriosa de materiais e proporções pode reduzir significativamente o impacto ambiental, sem comprometer a resistência final da mistura.

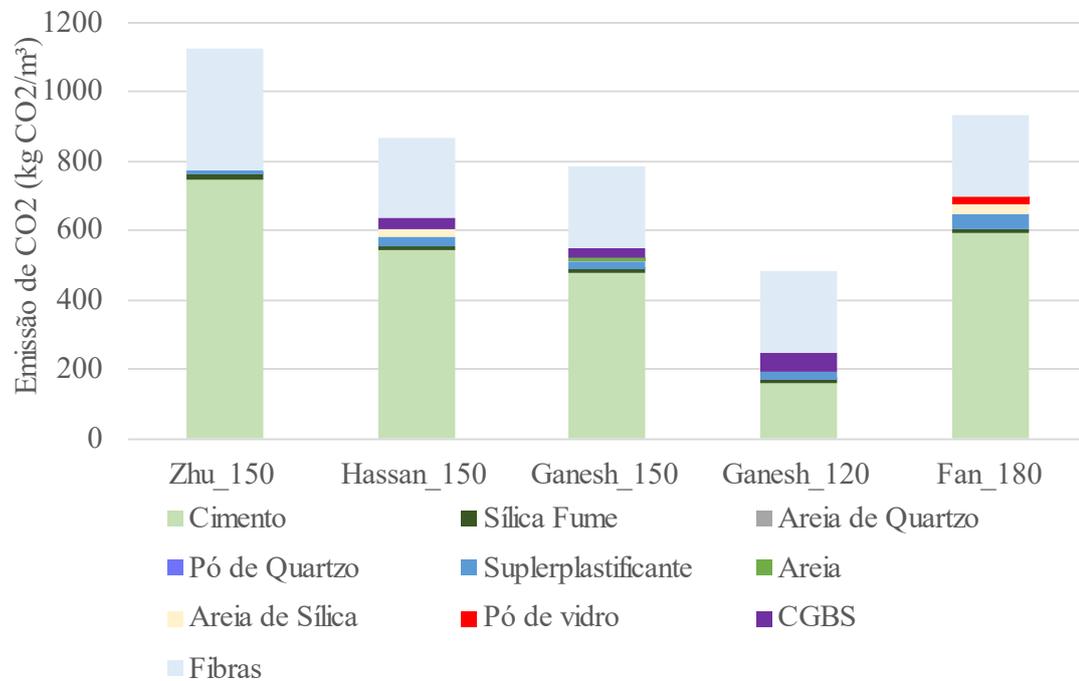
Essa figura também evidencia a possibilidade de utilizar materiais que contribuem para a resistência do concreto, permitindo a substituição parcial do cimento. Um exemplo notável é o traço de Fan *et al.* (2024), que, mesmo com uma quantidade 20% menor de cimento em comparação ao traço de Zhu *et al.* (2021), atingiu uma resistência superior devido à inclusão de pó de vidro. Esse material suplementar desempenhou um papel importante no desenvolvimento

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

da resistência mecânica, reduzindo, ao mesmo tempo, o impacto ambiental associado ao uso excessivo de cimento.

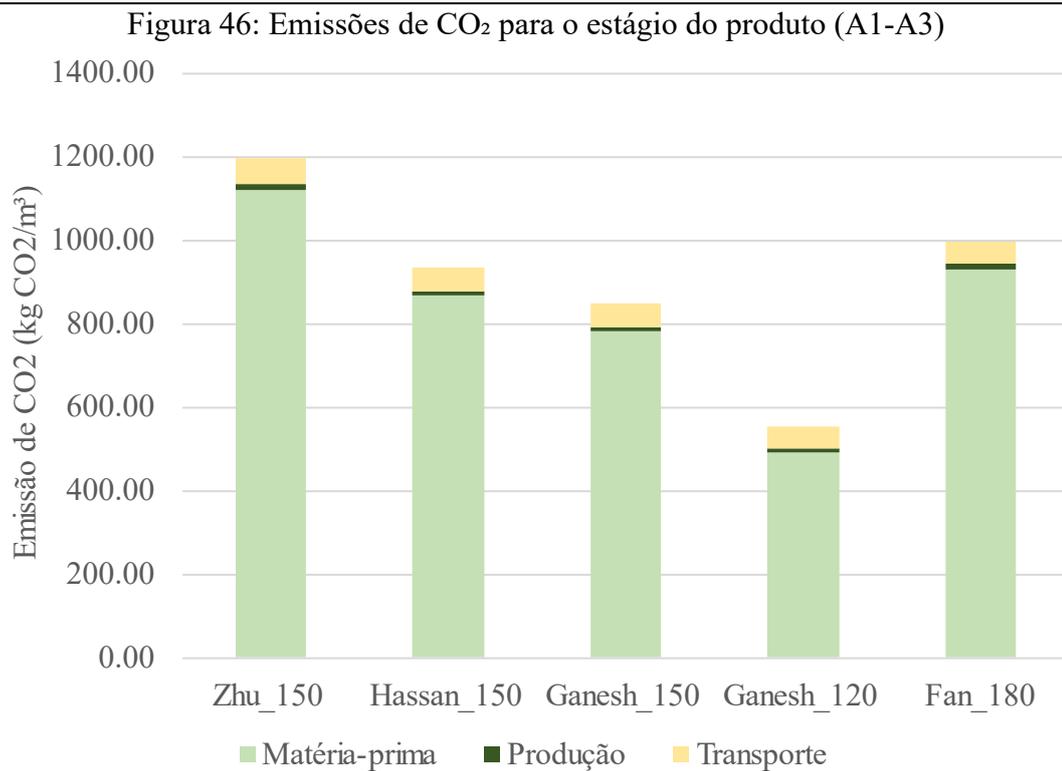
Outro ponto relevante é o uso de CGBS (Granulado de Alto-Forno) nos traços de Ganesh; Murthy (2019), que proporcionou uma redução significativa na quantidade de cimento, mantendo um desempenho estrutural adequado. Essa estratégia reforça a importância de incorporar materiais cimentícios suplementares na formulação do UHPC, uma vez que, além de reduzir a emissão de CO₂, permite alcançar traços com alta resistência e menor consumo de cimento.

Figura 45: emissões de CO₂ das matérias-primas para diferente traços e resistências de UHPC



Fonte: Autor (2025)

O cálculo detalhado de todas as etapas referentes às emissões de CO₂ das matérias-primas no módulo A1, do transporte (A2) e da produção do UHPC (estágio A3) pode ser encontrado no Apêndice A. A **Figura 46** apresenta as emissões de carbono para o estágio do produto, A1-A3 de acordo com o PAS 2080:2016, referentes aos cinco traços de UHPC analisados. Os resultados mostram que a maior contribuição para a emissão de carbono ocorre no **módulo A1**, relacionado ao uso das matérias-primas, com destaque para o cimento, que é o principal responsável pelo impacto ambiental. As emissões referentes ao transporte (A2) e à produção (A3) representam uma parcela 4% e 1%, respectivamente.



Fonte: Autor (2025)

Desta maneira, o traço utilizado no AG para a resistência de 150 MPa foi o do Ganesh; Murthy (2019), uma vez que apresentou a menor emissão de carbono entre os traços avaliados para essa resistência, demonstrando uma maior eficiência ambiental.

Por fim, torna-se possível calcular a emissão total de carbono tanto para a estrutura convencional quanto para a estrutura em UHPC. A **Tabela 11** apresenta os resultados das emissões de carbono totais para a estrutura convencional, considerando as emissões associadas às etapas de matérias-primas, transporte e produção. O AG realizou automaticamente o mesmo cálculo para as estruturas projetadas em UHPC, permitindo uma comparação direta entre os diferentes tipos de estrutura e evidenciando a redução potencial no impacto ambiental ao utilizar traços otimizados de UHPC.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 11: Quantificação de CO₂ para estrutura convencional

Material	Unidade	Quantidade	Fator de CO ₂ (kg CO ₂ / unidade)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂)
Concreto (30 MPa)	m ³	4.75	283.80	1349.35
Barras de aço 8 mm	kg	149.85	0.760	113.95
Barras de aço 6.3 mm	kg	101.68	0.760	77.32
Pinos (19mm)	kg	42.29	2.470	104.47
Perfil I	kg	2492.23	2.520	6281.44
			Total	7926.520

Fonte: Autor (2025)

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ESTRUTURAL

Foi realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar a influência de diferentes variáveis geométricas da seção transversal na resposta estrutural. As variáveis analisadas incluem: altura do perfil, altura da laje, altura das nervuras, largura das nervuras, espaçamento transversal entre as nervuras e espaçamento longitudinal entre as nervuras. Em cada caso, apenas uma variável foi alterada, enquanto as demais dimensões da seção transversal permaneceram constantes. A seção efetiva analisada corresponde a mesma seção efetiva da ponte CBCA com laje nervurada, com comprimento total de 14000 mm e largura de 1700 mm.

O objetivo dessa análise foi avaliar o impacto de cada uma dessas variáveis na capacidade estrutural da viga mista e na redução de emissões de CO₂ associadas à construção da estrutura. Isso permitiu identificar quais parâmetros geométricos oferecem maior potencial de otimização estrutural resultando em menor impacto ambiental.

A **Figura 47a** apresenta a curva carga x deslocamento para diferentes alturas do perfil, variando de 400 mm a 600 mm. Como esperado, conforme a altura do perfil aumenta, há um aumento significativo da capacidade de carga e rigidez da viga mista. Isso ocorre porque o aumento da altura do perfil eleva o momento de inércia da seção, resultando em maior rigidez e resistência da viga.

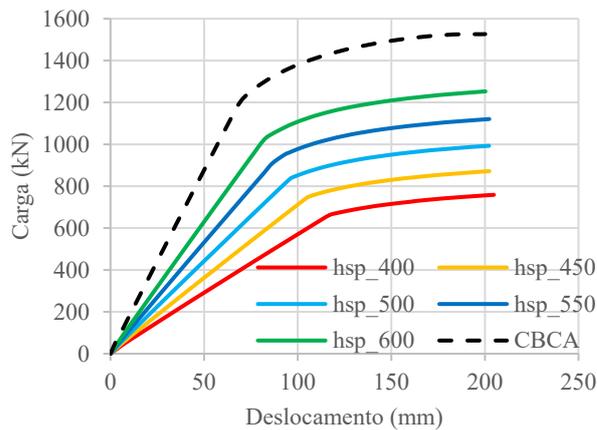
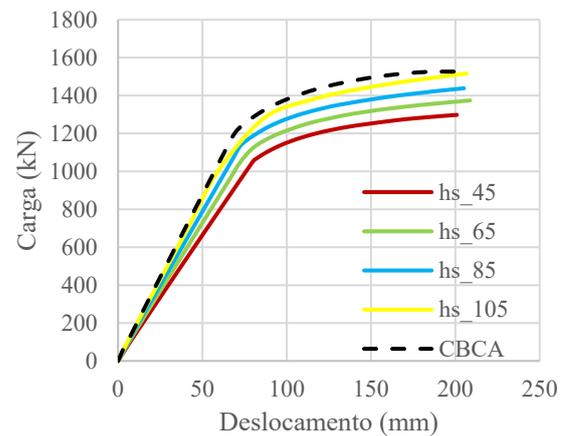
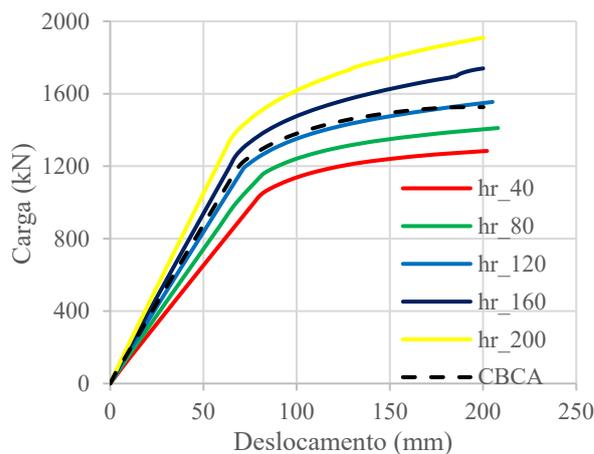
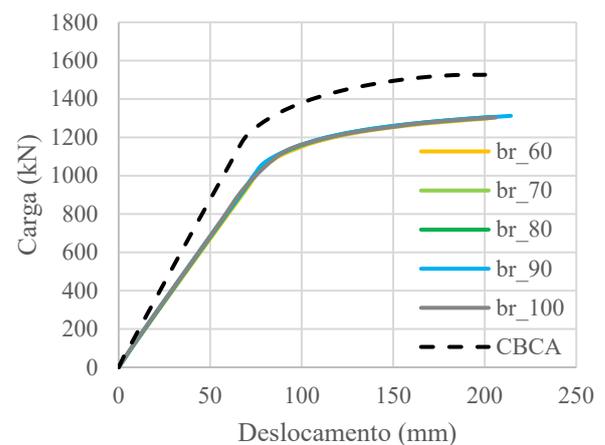
A **Figura 47b** apresenta a curva carga x deslocamento para quatro alturas diferentes de laje, todas com nervura de 45 mm: 45 mm, 65 mm, 85 mm e 105 mm. Observa-se que, à medida que a altura da laje aumenta, há um incremento na capacidade de carga máxima da estrutura, indicando que lajes mais altas proporcionam maior rigidez e resistência, devido ao aumento da inércia da seção. No entanto, também se verifica que o aumento da altura da laje está diretamente relacionado ao aumento da emissão de CO₂.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

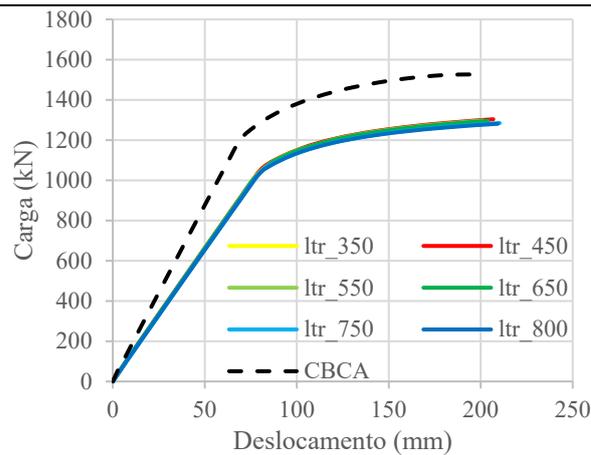
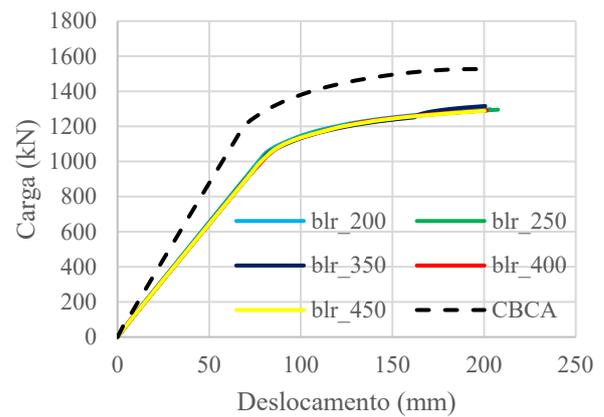
A **Figura 47c** apresenta a curva carga x deslocamento para diferentes alturas de nervuras, variando de 40 mm a 200 mm. Observa-se que, com o aumento da altura das nervuras, ocorre um aumento gradual da capacidade de carga máxima da estrutura, indicando que nervuras mais altas proporcionam maior rigidez e resistência à viga. Como a altura da laje, o CO2 também aumentou, contudo em uma proporção menor se comparado a laje sólida.

Figura 47d apresenta a curva carga x deslocamento para diferentes larguras de nervura, variando de 40 mm a 100 mm. Observa-se que a variação na largura da nervura apresenta pouca influência na capacidade de carga máxima da viga mista. Todas as curvas seguem um comportamento muito próximo, com diferenças praticamente imperceptíveis ao longo do deslocamento.

Figura 47: Estudo de sensibilidade

(a) Variação da altura do perfil (h_{sp})(b) Variação da altura da laje (h_s)(c) Variação da altura da nervura (h_r)(d) Variação largura da nervura (b_r)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

(e) Variação do espaçamento transversal (l_{tr})(f) Variação espaçamento longitudinal (b_{lr})

Fonte: Autor (2025)

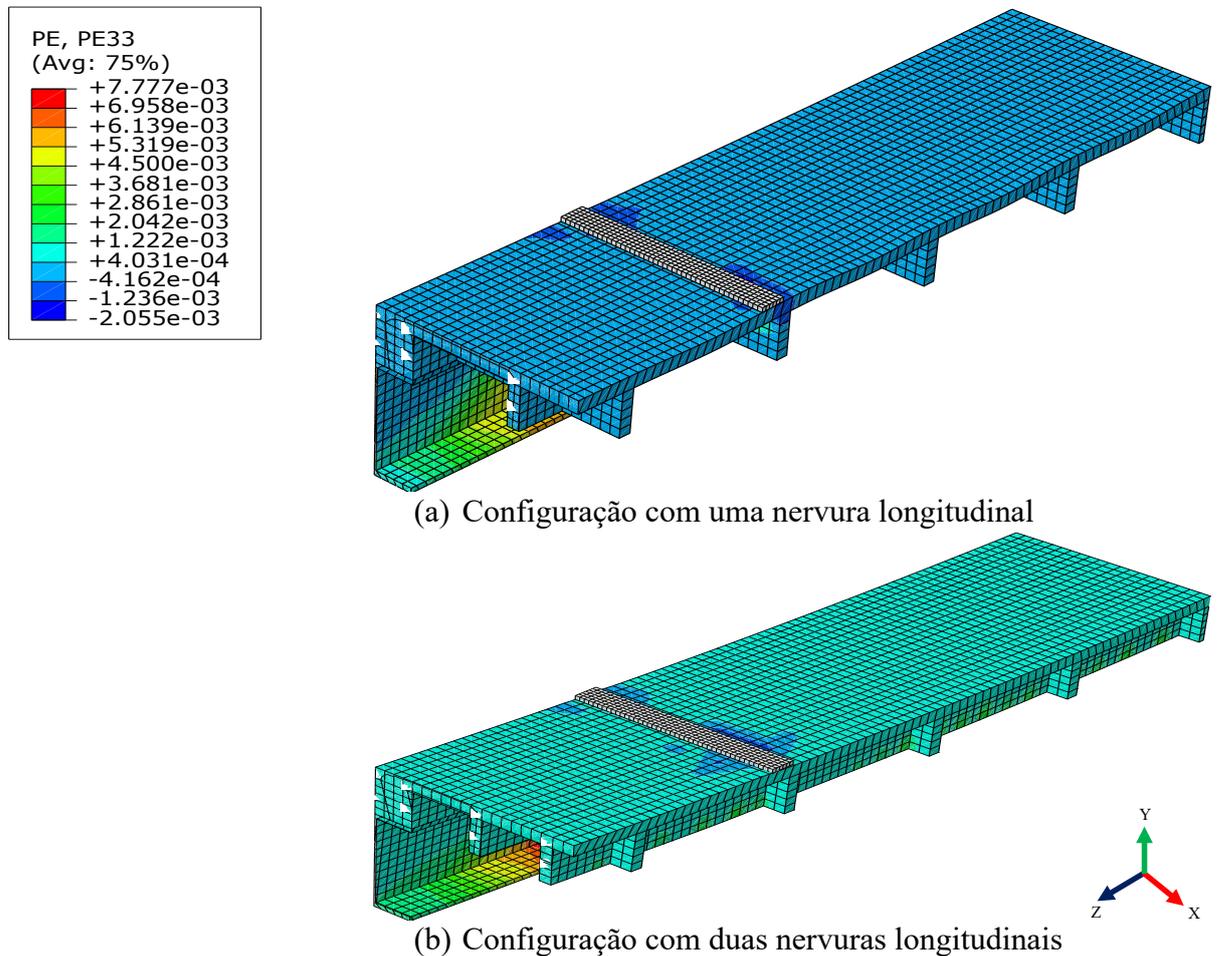
A **Figura 47e** apresenta a curva carga x deslocamento para diferentes espaçamentos transversais das nervuras, variando de 350 mm a 800 mm. Observa-se que, ao longo de toda a faixa de deslocamento, as curvas apresentam um comportamento bastante próximo, indicando que a variação do espaçamento transversal das nervuras tem pouca influência na capacidade de carga máxima da viga mista.

A **Figura 47f** apresenta a curva carga x deslocamento para diferentes espaçamentos longitudinais das nervuras, variando de 200 mm a 450 mm. Observa-se que a variação do espaçamento longitudinal apresenta uma influência limitada na capacidade de carga máxima da viga mista, já que todas as curvas apresentam um comportamento bastante semelhante ao longo do deslocamento.

Embora haja uma leve redução na capacidade de carga para espaçamentos maiores tanto para espaçamento transversal e longitudinal, a diferença é pouco expressiva. Isso indica que o aumento do espaçamento dentro da faixa analisada não compromete significativamente o desempenho estrutural, permitindo a possibilidade de optar por maiores espaçamentos visando a redução de material e, conseqüentemente, menor emissão de CO_2 na construção.

No entanto, quando o espaçamento ultrapassa 400 mm (**Figura 48a**), a estrutura passa a apresentar apenas uma nervura longitudinal, o que pode gerar deslocamentos excessivos fora do plano da laje entre as nervuras transversais, mesmo com espaçamentos pequenos entre as nervuras transversais, comprometendo a rigidez local da seção. Para evitar esse comportamento, é fundamental manter uma nervura próxima da extremidade da laje.

Figura 48 – Avaliação da estabilidade da laje em função da quantidade de nervuras longitudinais



Fonte: Autor (2025)

Assim, o espaçamento longitudinal foi fixado em 300 mm, garantindo a presença de duas nervuras longitudinais (**Figura 48b**), e o espaçamento transversal pode ser limitado entre 700 e 800 mm. Esse intervalo foi definido para assegurar um equilíbrio entre a redução de materiais e o desempenho estrutural. Com espaçamentos transversais maiores, há uma diminuição na quantidade de UHPC utilizado, o que contribui diretamente para a redução das emissões de CO₂ durante a fabricação. A Tabela 12 apresenta os resultados compilados da análise de sensibilidade

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 12: Estudo de sensibilidade

Variável	h_{sp}	h_s	B_r	h_r	b_{tr}	l_{tr}	CO2 Total (kg)
h_s_{45}	616	45	40	45	130	390	8371.16
h_s_{65}	616	65	40	45	130	390	8934.54
h_s_{85}	616	85	40	45	130	390	9497.93
h_s_{105}	616	105	40	45	130	390	10061.32
h_r_{40}	616	45	40	40	130	390	8303.01
h_r_{80}	616	45	40	80	130	390	8848.17
h_r_{120}	616	45	40	120	130	390	9393.33
h_r_{160}	616	45	40	160	130	390	9938.49
h_r_{200}	616	45	40	200	130	390	10483.65
h_{sp}_{400}	400	45	40	45	130	390	7459.63
h_{sp}_{450}	450	45	40	45	130	390	7670.63
h_{sp}_{500}	500	45	40	45	130	390	7881.63
h_{sp}_{550}	550	45	40	45	130	390	8092.63
h_{sp}_{600}	600	45	40	45	130	390	8303.64
b_{lr}_{200}	616	45	40	45	200	390	8221.02
b_{lr}_{250}	616	45	40	45	250	390	8145.96
b_{lr}_{350}	616	45	40	45	350	390	8070.89
b_{lr}_{400}	616	45	40	45	400	390	8070.89
b_{lr}_{450}	616	45	40	45	450	390	8070.89
l_{tr}_{350}	616	45	40	45	130	350	8385.54
l_{tr}_{450}	616	45	40	45	130	450	8356.77
l_{tr}_{550}	616	45	40	45	130	550	8335.19
l_{tr}_{650}	616	45	40	45	130	650	8320.80
l_{tr}_{750}	616	45	40	45	130	750	8312.59
l_{tr}_{800}	616	45	40	45	130	800	8306.41
b_r_{60}	616	45	60	45	130	390	8534.27
b_r_{70}	616	45	70	45	130	390	8610.23
b_r_{80}	616	45	80	45	130	390	8682.47
b_r_{90}	616	45	90	45	130	390	8750.98
b_r_{100}	616	45	100	45	130	390	8815.76

Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, com base nos resultados obtidos na análise de sensibilidade, definiu-se que o espaçamento longitudinal também será uma constante no modelo. As demais variáveis, como a altura do perfil (h_{sp}), a altura da laje (h_s), a altura da nervura (h_r), a largura da nervura (b_r) e o espaçamento transversal entre as nervuras (l_{tr}), permanecerão como variáveis a serem ajustadas e otimizadas pelo Algoritmo Genético (AG).

4.5 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

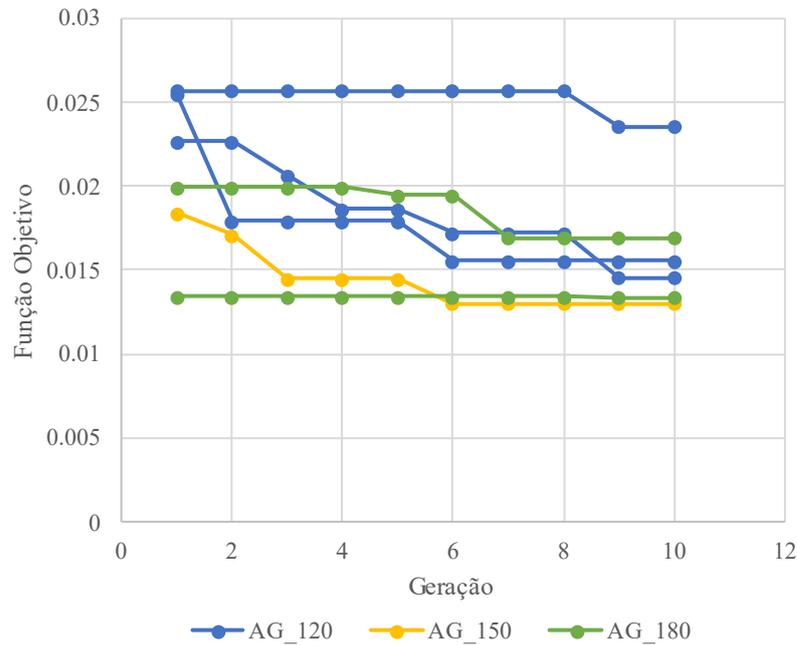
Para o espaço de busca inicial do algoritmo, utilizou-se a altura do perfil variando entre 450 mm e 613 mm, com o valor máximo correspondente à altura do perfil da ponte convencional, para todas as classes de resistência 120 MPa, 150MPa e 180MPa. No entanto, esse espaço de busca resultou em duas configurações, conforme a aplicação da função objetivo:

1. Soluções com perfis muito próximos às dimensões da ponte CBCA, mas com alturas reduzidas tanto da laje quanto das nervuras.
2. Soluções com altura do perfil menor, mas com laje e nervuras maiores.

De maneira geral, observou-se uma tendência de convergência para a primeira configuração em todas as classes de resistência do concreto. No entanto, para as classes de 150 MPa e 180 MPa, as emissões de carbono apresentaram valores similares entre as duas configurações. Já para a classe de 120 MPa, a segunda configuração mostrou um desempenho superior, com uma redução média de aproximadamente 4% nas emissões de carbono em comparação à primeira configuração. Além disto, verificou-se que, quando o algoritmo genético (AG) tendia a soluções com alturas de perfil maiores, a convergência ao longo das gerações apresentava um comportamento praticamente linear.

Ou seja, a primeira solução não aproveitou adequadamente a elevada resistência do UHPC para resistência de 120MPa. Já com o algoritmo induzido à redução da altura do perfil foi possível observar a tendência à redução da emissão de CO₂ utilizando o UHPC, destacando o potencial do material para uma solução mais eficiente. Destaca-se que o Algoritmo Genético (AG) estava convergindo mais rapidamente para configurações com perfis de maior altura, deixando de explorar de maneira eficiente outros espaços de solução. Mesmo com a população inicial sendo criada de forma randômica (aleatória), a presença de perfis altos influenciava significativamente a convergência devido à sua elevada resistência. Uma hipótese é que por se tratar de uma única variável, esses perfis facilitavam a obtenção de soluções viáveis, ao passo que, para alcançar uma resistência equivalente, seria necessário combinar duas variáveis: a altura da laje e a altura da nervura. Esse comportamento favorecia uma convergência acelerada no processo evolutivo que, no entanto, comprometeram o equilíbrio entre desempenho estrutural e redução de emissões de CO₂ (**Figura 49**).

Figura 49: Evolução do AG para perfis com altura máxima de 616mm



Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, para priorizar soluções que mantivessem o mesmo desempenho estrutural da ponte convencional e, ao mesmo tempo, reduzissem as emissões de CO₂, decidiu-se limitar a altura máxima do perfil a 550 mm. Essa restrição direciona o AG a explorar soluções mais eficientes do ponto de vista estrutural e ambiental.

Com base nesses ajustes, foram definidos novos limites mínimos e máximos para as variáveis de projeto, sendo elas: altura do perfil (h_{sp}), altura da laje (h_s), altura da nervura (h_r), largura da nervura (b_r) e espaçamento transversal entre as nervuras (l_{tr}). Essas variáveis correspondem às características geométricas do perfil I e da laje nervurada, sendo fundamentais para a otimização do sistema estrutural, permitindo a exploração de soluções com o mesmo desempenho estrutural e menor emissão de CO₂. Sendo que as variáveis são valores inteiros. Os limites adotados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Limites para as variáveis de decisão

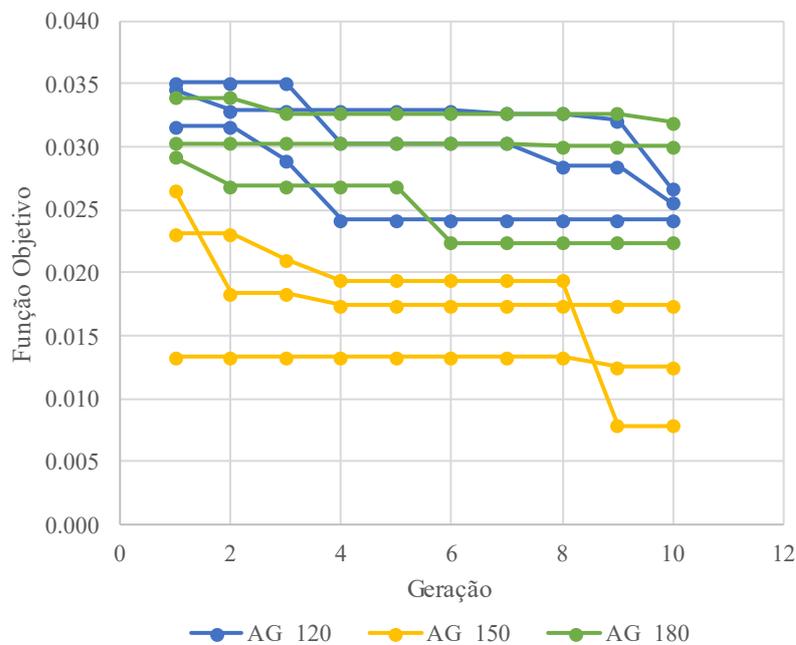
Variável	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Altura do perfil (h_{sp})	450	550
Altura da laje (h_s)	45	100
Altura da nervura (h_r)	50	200
Largura da nervura (b_r)	45	60
Espaçamento transversal entre as nervuras (l_{tr})	700	800

Fonte: Autor (2025)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assim, foi realizada a otimização da seção mista aplicando UHPC na laje nervurada, utilizando a técnica de algoritmos genéticos (AG) e considerando resistências à compressão de 120, 150 e 180 MPa. Cada execução do AG contou com 10 gerações compostas por 30 indivíduos. Para cada valor de resistência do UHPC, foram realizadas três execuções independentes do algoritmo. Dessa forma, o espaço de soluções gerado para cada resistência foi composto por um total de 900 indivíduos ($30 \text{ indivíduos} \times 10 \text{ gerações} \times 3 \text{ execuções}$). A **Figura 50** apresenta a convergência da função objetivo ao longo das gerações para todos os processos evolutivos, levando em conta a substituição da laje de concreto convencional por UHPC.

Figura 50: Evolução do AG para perfis com altura máxima de 550mm



Fonte: Autor (2025)

A função objetivo minimiza a diferença entre a curva carga x deslocamento do modelo numérico proposto e a curva de referência da estrutura da ponte CBCA, utilizando o erro relativo calculado com base na média das cargas correspondentes a 5 pontos específicos da curva carga x deslocamento. Dessa forma, quanto mais próxima de 0 a função objetivo, mais próxima está a solução gerada do comportamento mecânico da estrutura convencional. A análise dos resultados mostra que, desde a primeira geração, todos os algoritmos genéticos (AGs) encontraram soluções próximas do comportamento da ponte CBCA, com erros de aproximadamente 3,5%.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme a evolução das populações, foi possível encontrar soluções cada vez mais precisas, com erros abaixo de 1%, como no caso do AG com resistência de 150 MPa. De maneira geral, os AGs com resistência de 150 MPa conseguiram evoluir para soluções mais próximas do comportamento desejado. Contudo, vale destacar que o erro obtido pode indicar soluções tanto acima da curva, o que sugeriria uma solução mecânica melhor, quanto abaixo, devido à perda de rigidez da estrutura.

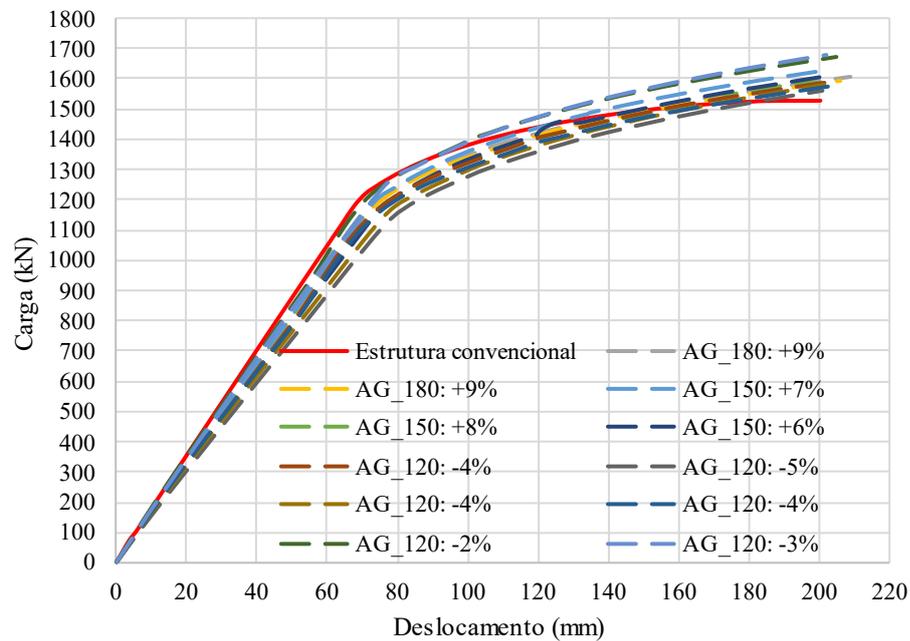
A estrutura com a melhor função objetivo nem sempre apresenta a menor emissão de CO₂. Uma solução com erro de função objetivo inferior a 4.5 % já é considerada eficaz, desde que garanta resistência, rigidez e ductilidade principalmente para carga de serviço. Isto ocorre porque é realizado a média dos erros das cargas dos 5 pontos selecionados na função objetivo e utilizando o UHPC a resistência da carga última foi maior. Isso indica que a otimização conseguiu alinhar adequadamente o comportamento do modelo numérico com o comportamento mecânico da estrutura convencional. Nesse contexto, a escolha da estrutura com menor emissão de CO₂ envolve um conjunto de soluções mais amplo, que não se restringe ao melhor indivíduo de cada AG, mas também inclui alternativas com desempenho similar, permitindo uma seleção mais equilibrada entre eficiência mecânica e emissão de CO₂.

Por meio dos AG executados, foi possível avaliar a aproximação das soluções geradas para a seção mista com UHPC em relação à ponte convencional, com base na rigidez no regime elástico, ductilidade no regime não linear e carga máxima. Para o Estado-Limite de Serviço (ELS), conforme a ABNT NBR 16694:2020, o controle do deslocamento vertical em pontes rodoviárias deve seguir os critérios do Anexo N da ABNT NBR 8800:2024, que estabelece um limite de $L/350$. Considerando o vão de 14.000 mm da estrutura em estudo, o limite de deslocabilidade permitido é de 40 mm. Para a análise da carga no ELS, foi utilizada 40% da carga máxima.

A **Figura 51** apresenta as curvas carga x deslocamento das estruturas selecionadas com as melhores aproximações, utilizando UHPC com resistências de 120, 150 e 180 MPa. Todas as soluções apresentam deslocamentos menores que 40 mm para 40% da carga máxima, atendendo ao critério do Estado-Limite de Serviço (ELS) definido pela norma. Destaca-se que a redução da altura do perfil, permitida pelo uso de UHPC, fez com que o aço escoasse com uma carga tipicamente um pouco menor, devido a menor inércia. No entanto após o escoamento, a taxa de aumento de carga foi maior comparado a viga do CBCA, devido ao UHPC apresentar maior resistência e deformação de pico. Além disso, a **Figura 51** apresenta o percentual de emissão de CO₂ para cada estrutura.

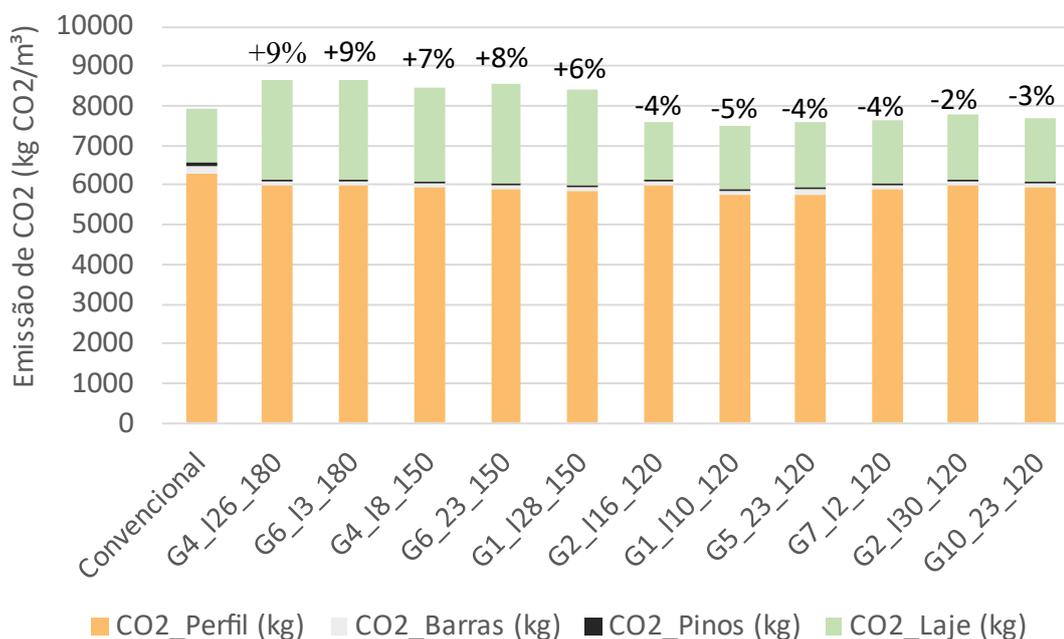
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 51: Compatibilização mecânica por meio da curva carga x deslocamento e emissão de CO₂ por estrutura



Fonte: Autor (2025)

Após o processo de otimização, foi possível identificar as soluções que apresentaram menor emissão de CO₂, permitindo uma escolha que atenda critérios mecânicos, sendo mais sustentável. A **Figura 52** apresenta a emissão de CO₂ por metro cúbico (kg CO₂/m³) na fase de produto (A1-A3) para diferentes soluções estruturais com UHPC de 120, 150 e 180 MPa, comparadas à seção do CBCA. A emissão total é dividida em quatro componentes principais: perfil metálico, barras, pinos e laje.

Figura 52: Emissão de CO₂ para fase de produto para diferentes traços e resistências de UHPC

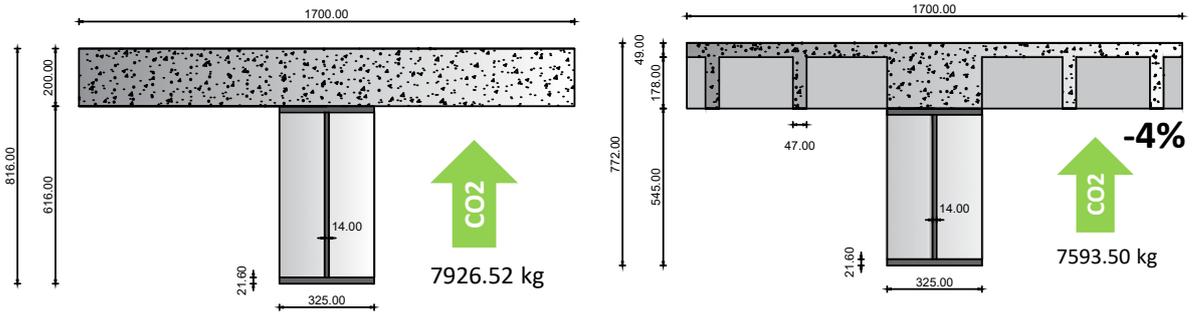
Fonte: Autor (2025)

As soluções com UHPC de 180 MPa (G4_I26_180, G6_I3_180) exibiram emissões superiores à estrutura convencional, com aumentos de +9%. De forma similar, as soluções com UHPC de 150 MPa (G4_I8_150, G6_I23_150, G1_I28_150) também apresentaram emissões mais elevadas, variando de +6% a +8%. Em contrapartida, as soluções com UHPC de 120 MPa (G1_I10_120, G2_I16_120, G5_I23_120, G7_I2_120, G2_I30_120, G10_I23_120) mostraram emissões inferiores à estrutura convencional, alcançando reduções de até -5%.

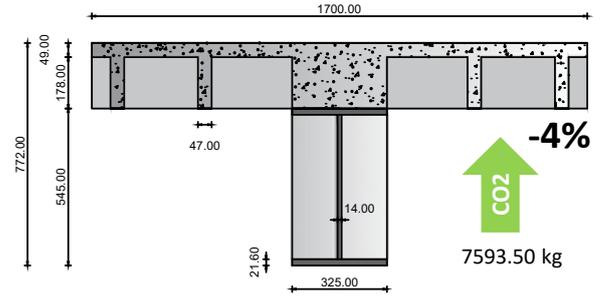
A maior contribuição para a emissão de CO₂ nas soluções apresentadas vem do perfil metálico e da laje, enquanto as barras e pinos representam uma parcela significativamente menor. Esse comportamento indica que a escolha de um UHPC com menor resistência pode resultar em soluções mais sustentáveis, desde que a compatibilidade estrutural e o desempenho mecânico sejam mantidos.

Uma análise mais detalhada para os indivíduos com resistência de 120 MPa demonstra que a emissão de CO₂ referente à laje nervurada variou entre 21% e 8% a mais em comparação à estrutura convencional. Em contrapartida, houve uma redução de 8% a 5% na emissão do perfil metálico, demonstrando a eficácia do uso de materiais avançados, como o UHPC, que colabora na rigidez e resistência da estrutura e possibilita a diminuição da emissão de CO₂ pelo perfil metálico. Esse efeito resulta em uma redução global na emissão de CO₂ da estrutura mista. A **Figura 53** apresenta as seções de 120 MPa resultantes da otimização.

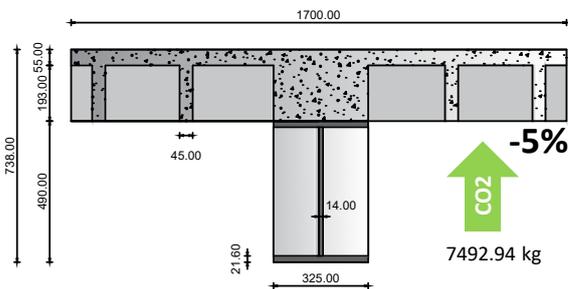
Figura 53: Seções otimizadas pelo AG para seções com resistência de 120 MPa



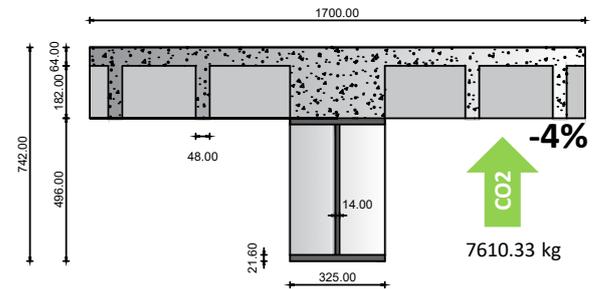
(a) Estrutura convencional



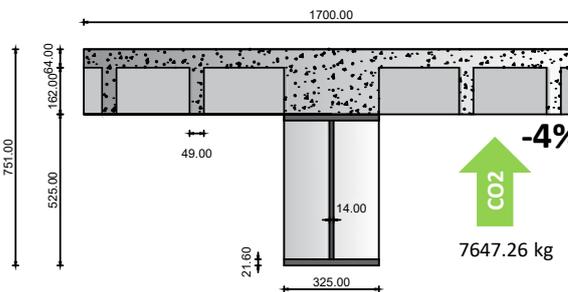
(b) G2_I16_120 – esp. transversal: 717mm



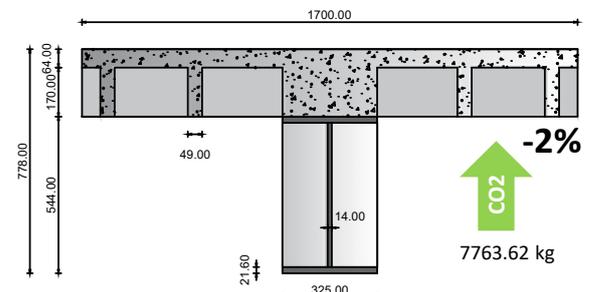
(c) G1_I10_120 – esp. transversal: 712mm



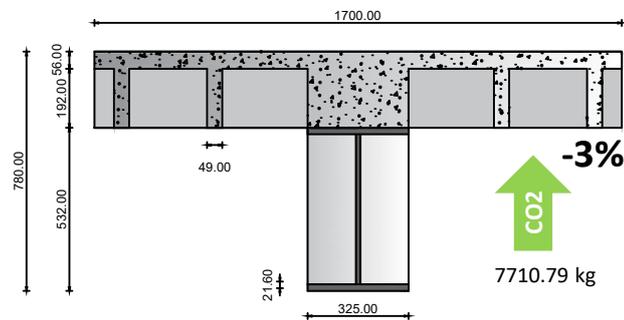
(d) G5_23_120 – esp. transversal: 706mm



(e) G7_I2_120 – esp. transversal: 704mm



(f) G2_I30_120 – esp. transversal: 773mm



(a) G10_23_120 – esp. transversal: 720mm

Fonte: Autor (2025)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 14 apresenta o peso da superestrutura para as soluções otimizadas com resistência de 120 MPa. Todas as estruturas analisadas apresentaram uma redução de pelo menos 4 toneladas, representando uma diferença mínima de 30%. No caso da ponte CBCA, que possui dois tabuleiros, a redução total da superestrutura para a solução otimizada G1_I10_120 seria de 10 toneladas.

Tabela 14: Peso das estruturas otimizadas

Estrutura	Peso (kg)	Diferença de peso (kg)	Percentual (%)
Convencional	14210.055	-	-
G2_I16_120	8880.3382	5329.717068	38%
G1_I10_120	9462.2899	4747.765388	33%
G5_23_120	9766.9402	4443.115068	31%
G7_I2_120	9766.9402	4443.115068	31%
G2_I30_120	9636.9496	4573.105668	32%
G10_23_120	9554.2998	4655.755523	33%

Fonte: Autor (2025)

Essa diminuição no peso total da superestrutura pode contribuir para a redução do consumo de materiais em pilares e fundações, resultando em uma queda ainda maior nas emissões de CO₂ da ponte como um todo. A estrutura G2_I16_120 apresentou uma redução de 38% no peso e de 4% nas emissões de CO₂ da superestrutura, enquanto a solução G1_I10_120 mostrou uma redução de 33% no peso e de 5% nas emissões.

Adicionalmente, a utilização de peças mais leves durante a etapa A4 (construção) pode apresentar uma redução adicional na emissão de CO₂, já que a energia necessária para transporte e movimentação das peças será menor. Além disso, os materiais avançados, como o UHPC, oferecem maior durabilidade e resistência a intempéries de acordo com Wang *et al.*(2024), um aspecto essencial no projeto de pontes, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, no qual se prevê maior severidade de eventos climáticos extremos (NET ZERO BRIDGES GROUP, 2023). Com isso, espera-se também uma redução de emissões de CO₂ nas fases de uso e manutenção, devido à menor necessidade de intervenções ao longo da vida útil da ponte.

. Dessa forma, é essencial avaliar qual dessas estruturas terá um impacto mais significativo tanto no dimensionamento da infraestrutura quanto nos demais estágios do ciclo de vida da ponte.

Portanto, as soluções com UHPC de 120 MPa demonstraram ser mais eficazes e com grande potencial de aplicação na redução de emissões de CO₂, considerando a fase de produto,

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

responsável por cerca de 50% do total emitido na construção de pontes, além de atenderem aos critérios de rigidez, ductilidade e carga máxima, conforme discutido anteriormente. A escolha da solução ideal deve, assim, equilibrar o desempenho estrutural, a durabilidade e o impacto ambiental.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo otimizar uma seção mista de aço e UHPC, composta por um perfil I e uma laje nervurada, para aplicação em estruturas típicas de pontes. Para isso, realizou-se a calibração de um modelo numérico de uma viga mista de UHPC com laje nervurada (Zhu et al., 2021), a criação de um modelo representativo de uma ponte convencional (CBCA). Todos os modelos foram desenvolvidos no ABAQUS.

Os MEFs calibrados, tanto o completo quanto o simplificado para um quarto do modelo, representaram adequadamente os resultados experimentais de Zhu et al. (2021) para a curva carga x deslocamento. O MEF simplificado da seção efetiva (CBCA) apresentou uma diferença inferior a 10% no momento de plastificação quando comparado ao valor reportado pelo manual do CBCA, evidenciando a confiabilidade e a precisão das simulações realizadas.

Foi conduzida uma análise de sensibilidade para selecionar as variáveis de decisão a serem utilizadas no processo de otimização. A partir disso, desenvolveu-se uma rotina em Python utilizando algoritmos genéticos (AG) para otimizar a seção transversal da viga mista com laje nervurada em UHPC, com base nas variáveis selecionadas. O processo de otimização consistiu em gerar uma população inicial de 30 indivíduos, que evoluiu ao longo de 10 gerações, totalizando 300 indivíduos avaliados. Três AGs foram executados para cada resistência do UHPC de 120 MPa (Ganesh; Murthy, 2019), 150 MPa (Ganesh; Murthy, 2019) e 180 MPa (Fan et al., 2024).

Adicionalmente, para o UHPC com resistência de 150 MPa, foi realizada uma análise complementar para verificar as emissões de CO₂ associadas a diferentes traços de UHPC de (Hassan et al., 2012; Ganesh; Murthy, 2019; Zhu et al., 2021), com o objetivo de identificar soluções mais sustentáveis, garantindo ao mesmo tempo um desempenho estrutural adequado.

Durante a execução do AG, foi calculada a emissão de CO₂ correspondente a cada solução estrutural gerada. Assim, ao final do processo, foi possível identificar as soluções que apresentaram o melhor equilíbrio entre a precisão na aproximação da curva carga x deslocamento e a redução das emissões de CO₂. Essa abordagem permitiu selecionar alternativas otimizadas que conciliam alto desempenho estrutural com menor impacto ambiental.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se que haja ao menos uma nervura posicionada próxima à extremidade da laje para garantir a rigidez local da seção e evitar deslocamentos excessivos fora do plano da laje entre as nervuras transversais e 400 mm entre as nervuras longitudinais. Essa medida é importante para assegurar o desempenho estrutural adequado. Desta maneira, é possível aumentar o espaçamento entre as nervuras transversais, reduzindo a quantidade necessária de UHPC, conseqüentemente, as emissões de CO₂ associadas à sua produção.

A utilização de CGBS (Granulado de Alto-Forno) nos traços propostos por resultou em uma redução significativa na quantidade de cimento empregado, sem comprometer o desempenho estrutural (Ganesh; Murthy, 2019). Essa abordagem ressalta a importância de incorporar materiais cimentícios suplementares na formulação do UHPC, contribuindo para a redução das emissões de CO₂, além de possibilitar traços com alta resistência e menor consumo de cimento. Essa estratégia demonstra o potencial dos materiais suplementares na produção de concretos de alto desempenho mais sustentáveis e eficientes.

Conforme a resistência do UHPC diminuiu, as emissões de CO₂ também reduziram, com o elemento apresentando o mesmo desempenho estrutural. As soluções com UHPC de 180 MPa apresentaram emissões até 9% superiores à estrutura convencional, enquanto as de 150 MPa variaram entre 6% e 8% acima. Já as soluções com UHPC de 120 MPa exibiram emissões inferiores, com reduções de até 5% em relação à estrutura convencional.

A maior contribuição para as emissões de CO₂ nas soluções analisadas foi proveniente do perfil metálico e da laje de UHPC, enquanto as barras e pinos tiveram impacto significativamente menor. Entre esses elementos, o perfil metálico apresentou maior emissão de CO₂. No entanto, a utilização do UHPC, devido ao seu elevado módulo de elasticidade e alta resistência, permitiu uma otimização estrutural que reduzisse a quantidade de aço necessária. Esse equilíbrio estrutural garantiu a compatibilidade e o desempenho mecânico da solução, evidenciando que um UHPC com menor resistência poderia levar a alternativas mais sustentáveis sem comprometer a integridade da estrutura.

As soluções com resistência de 120 MPa demonstraram que, de forma global, houve uma redução nas emissões de CO₂ da estrutura mista em comparação à solução convencional. Esses resultados destacam o potencial do UHPC como um material avançado, capaz de equilibrar rigidez e resistência estrutural com a redução de emissões. Além disso, a redução do peso total da superestrutura, com uma diferença mínima de 30%, pode diminuir o consumo de materiais em pilares e fundações, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ na fase de produção da ponte como um todo.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além disso, a utilização de peças mais leves durante a etapa A4 (construção) pode contribuir para a redução das emissões de CO₂, uma vez que a energia necessária para o transporte e movimentação das peças será menor. Os materiais avançados, como o UHPC, oferecem maior durabilidade e resistência a intempéries, características importantes no projeto de pontes em um cenário de mudanças climáticas, com maior frequência e intensidade de eventos extremos. Como resultado, espera-se uma redução nas emissões de CO₂ nas fases de uso e manutenção, devido à menor necessidade de intervenções ao longo da vida útil da ponte.

Por fim, as soluções com UHPC de 120 MPa se mostraram mais eficazes e com elevado potencial para redução das emissões de CO₂, especialmente na fase de produto, responsável por cerca de 50% do total emitido na construção de pontes. Essas soluções também atenderam aos critérios de rigidez, ductilidade e carga máxima, comprovando sua viabilidade estrutural e ambiental. A escolha da solução otimizada deve, assim, equilibrar desempenho estrutural, durabilidade e impacto ambiental, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais eficientes e sustentáveis.

Como sugestões para estudos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de uma abordagem multiobjetivo para determinar a solução estrutural que melhor equilibre desempenho mecânico e redução das emissões de CO₂. Além disso, seria interessante explorar o uso de materiais avançados no perfil metálico, como aço de alta resistência, e a aplicação de perfis alveolares para redução do consumo de aço. Outras possibilidades incluem a análise das emissões considerando todo o ciclo de vida da estrutura e a avaliação da viabilidade de peças desmontáveis, permitindo sua reutilização em futuros projetos, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular no setor de construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALETI, S.; PETERSEN, B.; SRITHARAN, S. **Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://trid.trb.org/view.aspx?id=1256734>>.
- AALETI, S. R. et al. Structural behavior of waffle bridge deck panels and connections of precast ultra-high-performance concrete. **Transportation Research Record**, n. 2251, p. 82–92, 2011.
- ABAQUS, V. 6.14 Documentation. Dassault Systèmes Simulia Corporation, v. 6.51, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2024 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16694:2020 – Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BAGHI, H. et al. Development of a High-Performance Concrete Deck for Louisiana’s Movable Bridges: Numerical Study. **Journal of Bridge Engineering**, v. 22, n. 7, p. 1–18, 2017.
- BAGHI, H. et al. Four high performance nonproprietary concrete deck configurations for movable bridges. **Engineering Structures**, v. 168, n. April 2017, p. 559–575, 2018.
- BARKER, R. M.; PUCKETT, J. A. **Design of Highway Bridges**. [s.l.: s.n.].
- BELIZARIO-SILVA, F. et al. Material intensity and embodied CO2 benchmark for reinforced concrete structures in Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 82, p. 108234, 2024.
- BENEDETTY, C. A. et al. Flexural and shear behavior of steel-UHPC composite beams: a review. **Engineering Structures**, v. 293, n. October, 2023.
- BENEDITO, A. V. et al. Numerical Study of Fiber-Reinforced Concrete Beams Without Transverse Reinforcement Using Random Material Properties. **64º Congresso Brasileiro do Concreto**, n. October, 2023.
- CAO, Z. et al. The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2020.
- CASTILHO, V. C. DE. **Otimização De Componentes De Concreto Pré-Moldado Protendidos Mediante Algoritmos Genéticos**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.
- COLLINGS, D. The Carbon Footprint of Bridges. **Structural Engineering International**, v. 32, n. 4, p. 501–506, 2022.
- CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M.; BAMBACH, M. D. Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 24, p. 13048–13055, 2012.
- D’ALESSANDRO, K. C. **Biaxial Behavior of Ultra-High Performance Concrete and Untreated UHPC Waffle Slab Bridge Deck Design and Testing**. [s.l.] faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.
- DE PAULA FILHO, J. H.; ZANON, R.; GLORIEUX, A. Life-Cycle-Assessment of a wildlife bridge: influence of the structural design on the carbon emissions. **Ce/Papers**, v. 6, n. 3–4, p. 458–463, 2023.
- DE SOUSA, A. M. D. et al. Behavior and punching capacity of flat slabs with the rational use of UHPFRC: NLFEA and analytical predictions. **Engineering Structures**, v. 244, n. July, p. 112774, 2021.
- DEBS, E.; KHALIL, M. Concreto Pré-moldado: fundamentos e aplicações. **Oficina de Textos**,

p. 438, 2017.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, 2018.

DONG, Y. H. et al. Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods - A case study of high-rise private building. **Construction and Building Materials**, v. 99, n. 2015, p. 39–53, 2015.

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, n. March, p. 118585, 2024.

FEHLING, E. et al. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples**. [s.l.: s.n.].

GANESH, P.; MURTHY, A. R. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 667–680, 2019.

GCCA. Concrete Future - The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. **Global Cement and Concrete Association**, p. 1–48, 2021.

GE, W. et al. Numerical and theoretical research on flexural behaviour of steel-precast UHPC composite beams. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, n. October 2022, p. e01789, 2023.

GHASEMI, S. et al. Novel UHPC-CFRP Waffle Deck Panel System for Accelerated Bridge Construction. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 1, p. 1–10, 2016a.

GHASEMI, S. et al. A super lightweight UHPC-HSS deck panel for movable bridges. **Engineering Structures**, v. 113, p. 186–193, 2016b.

GRAYBEAL, B. A. et al. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. Publication N.º FHWA-HRT-13-060. **Tech Brief**, v. 1, n. June, p. 176, 2013.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Reading, U.S.A.: Addison-Wesley Publishing, 1989.

HABERT, G. et al. Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: Quantification of the improvement to concrete bridges. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 250–262, 2012.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, n. 11, p. 559–573, 2020.

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 874–882, 2012.

HASSANAT, A. et al. Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms-a review with a new dynamic approach. **Information (Switzerland)**, v. 10, n. 12, 2019.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology**. [s.l.] Control and artificial intelligence, 1975.

HONARVAR, E. et al. Bridge Decks with Precast UHPC Waffle Panels: A Field Evaluation and Design Optimization. **Journal of Bridge Engineering**, v. 21, n. 1, p. 1–13, 2016.

HONARVAR, E. et al. Transverse bending behavior of the steel-UHPC lightweight composite deck: Orthogonal test and analysis. **Engineering Structures**, v. 118, n. November 2018, p. 109716, 2019.

INTERNATIONAL RESOURCE PANEL. Global Resources Outlook 2019: Summary for Policymakers. **United Nations Environment Programme**, n. March, p. 1–23, 2019.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). **Carbon Footprint of Railway**

- Infrastructure.** [s.l: s.n.].
- JOHNSON, R. P. **Composite Structures of Steel and Concrete.** [s.l: s.n.]. v. 1
- KAYA, Y.; MURAT, U.; TEKIN, R. A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover. p. 1–4, 2011.
- KIEN, T. T. Comparison of energy consumption, CO₂ emissions between normal concrete and UHPC in rural bridge application. **Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE**, v. 17, n. 2, p. 168–179, 2023.
- KIM, T.; CHAE, C. U. Evaluation analysis of the CO₂ emission and absorption life cycle for precast concrete in Korea. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 7, p. 1–13, 2016.
- KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. DE M. S.; CARRAZEDO, R. Cyclic behavior of UHPFRC under compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, n. July, p. 103363, 2019.
- KUHLMANN, U. et al. Steel and composite bridges – Enabling sustainable solutions. **Steel Construction**, v. 17, p. 1–10, 2024.
- LANDE, I.; TERJE THORSTENSEN, R. Comprehensive sustainability strategy for the emerging ultra-high-performance concrete (UHPC) industry. **Cleaner Materials**, v. 8, n. October 2022, 2023.
- LEE, J.; FENVES, G. L. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures.** *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n. 8, p. 892–900, ago. 1998.
- LIMA, M. L. R. **Concreto Armado Utilizando Algoritmos Genéticos.** [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- LIU, J. P.; XU, S.; CHEN, B. C. Experimental study on flexural behaviors of steel-UHPC composite girder and steel-conventional concrete composite girder. **Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics**, v. 35, n. 11, 2018.
- LIU, Y. et al. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs. **Engineering Structures**, v. 180, n. November 2018, p. 388–399, 2019.
- LUBLINER, J. et al. **A plastic-damage model for concrete.** *International Journal of Solids and Structures*, v. 25, n. 3, p. 299–, 1989.
- MARSH, A.; DILLON, T.; BERNAL, S. Cement and concrete decarbonisation roadmaps – a meta-analysis within the context of the United Kingdom. **RILEM Technical Letters**, v. 8, p. 94–105, 2023.
- NAKAMURA, S. I. et al. New technologies of steel/concrete composite bridges. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, n. 1, p. 99–130, 2002.
- NET ZERO BRIDGES GROUP. Carbon Calculation Guide for Bridges DRAFT. n. July, 2023.
- PAVLOVIĆ, M. et al. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 88, p. 134–149, 2013.
- RIBEIRO, P. D. O. **Calibração automática de modelos em elementos finitos por meio de métodos de otimização e análise modal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2019 .
- ROSSI, A. et al. Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 106192, 2020.
- RUCK, N. et al. Assessment of Embodied Carbon in a Tied-Arch Bridge. **Ce/Papers**, v. 6, n. 3–4, p. 489–494, 2023.
- ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. **Engineered cementitious composites: Can composites be accepted as crack-free concrete?** [s.l: s.n.].
- SALLEM, M. et al. Ultra-High-Performance Concrete Bridge Deck Reinforced with High-Strength Steel. **ACI STRUCTURAL JOURNAL**, n. 108, p. 601–609, 2011.
- SIDAC – Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. *SIDAC*. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- SILVA, N. R. S. DA. **DETECÇÃO DE DANO ESTRUTURAL POR ALGORITMOS**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GENÉTICOS E SENSIBILIDADE MODAL.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL PROGRAMA, 2006.
- THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Important notice embodied carbon.** [s.l: s.n.].
- TOUTLEMONDE, F. et al. Innovative design of ultra high-performance fiber reinforced concrete ribbed slab: Experimental validation and preliminary detailed analyses. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. SP-228, n. January, p. 1187–1205, 2005.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). 2021 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, effective and resilient buildings and construction sector. **United Nations Environment Programme**, p. 1–7, 2021.
- WANG, B. et al. Service Life Prediction of High-Performance and Ultra-High-Performance Concrete Structures with Corrosion-Resistant Steels. **ACI Materials Journal**, v. 121, n. 6, p. 85–96, 2024.
- WANG, J. et al. Static behavior of large stud shear connectors in steel-UHPC composite structures. **Engineering Structures**, v. 178, n. July 2018, p. 534–542, 2019a.
- WANG, Z. et al. Experimental and numerical investigation of the interfacial properties of non-steam-cured UHPC-steel composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 323–339, 2019b.
- WATT, H. Benchmarking embodied carbon of highway bridges. n. December, 2019.
- WERNICK, I. K. et al. Materialization and dematerialization: Measures and trends. **Daedalus**, v. 125, n. 3, p. 171–198, 1996.
- WONG, A. K. L. Embodied energy and carbon emissions: A case study of an infrastructure project in Hong Kong. **HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers**, v. 17, n. 4, p. 79–87, 2010.
- WORLDSTEEL. Climate change and the production of iron and steel: Transforming steel production. **Climate Change and the production of iron and steel**, 2021.
- YOO, S. W.; CHOO, J. F. Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted-T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab. **Engineering Structures**, v. 118, p. 1–15, 2016.
- ZHU, J. et al. Experimental Investigation of Flexural Behavior of Steel–UHPC Composite Beam with Waffle-Slab System. **Journal of Bridge Engineering**, v. 26, n. 4, 2021.
- ZHU, J.; DING, J.; WANG, Y. Numerical and theoretical studies on shear behavior of steel-UHPC composite beams with waffle slab. **Journal of Building Engineering**, v. 47, n. December 2021, p. 103913, 2022.
- ZHU, J. S. et al. Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck. **Composite Structures**, v. 234, n. November 2019, p. 111678, 2020.

