https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.070

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO: ANÁLISE DE DIFERENTES SOLUÇÕES ESTRUTURAIS VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Bruno dos Santos de Oliveira[1]* e Professora Doutora Bruna Manica Lazzari[2]
*Autor de contato: brunosoliveira1@gmail.com

[1] Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica, PUCRS, Porto Alegre, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica, PUCRS, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

Tendo em vista a alta emissão de CO2 produzido pela construção civil, o presente trabalho propõe a utilização e o estudo do método de otimização topológica, aplicado em vigas de concreto armado, com o intuito de reduzir estas emissões. Para isto, utilizou-se a viga ET1 de Leonhardt e Walther (1962) como base para a otimização, sendo propostas três vigas otimizadas com o mesmo corpo de concreto, porém, em cada caso modificou-se os diâmetros, disposições e parâmetros dos materiais das armaduras. Obtendo resultados satisfatórios no comportamento da viga frente à carga e o deslocamento, calculou-se a emissão de CO2 proveniente do concreto e das armaduras de aço, possibilitando uma comparação entre as quatro vigas analisadas. Com isto, constatou-se que, com a utilização do método, a redução foi superior a 15%, se comparado com uma viga tradicional, e com um acréscimo da carga aplicada, no momento da ruptura, de 4,92%.
Palavras-chave: ANSYS Workbench; otimização topológica; emissão de CO2; concreto armado.

ABSTRACT

Due to the high CO2 emission produced by civil construction, the present paper proposes the use and study of the topological optimization method, applied to reinforced concrete beams, in order to reduce these emissions. For this, using the ET1 beam of Leonhardt and Walther (1962) as a basis for the optimization, being proposed three optimized beams with the same concrete body, however, in each case the diameters, arrangements and parameters of the reinforcement materials were modified. Obtaining satisfactory results in the behavior of the beam under load and displacement, the CO2 emission from the concrete and steel reinforcements was calculated, allowing a comparison between the four beams analyzed. It was verified that, with the use of the method, the reduction was superior to 15%, if compared with a traditional beam, and with an increase in the applied load, in the moment of failure, of 4.92%.
Keywords: ANSYS Workbench; Topological optimization; CO2 emission; Reinforced concrete.

1. INTRODDUÇÃO

Segundo a *IEA Internacional Energy Agency* (2019), em 2018, foram emitidos 33.513,33 milhões de toneladas (Mt) de CO2 na atmosfera. No Brasil, foram 406,5 Mt e, segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2019), por pessoa, foram mais de 10 toneladas de CO2. Estes dados são alarmantes, pois o CO2 é o principal gás que gera o aquecimento global e a construção civil é um dos grandes contribuintes para a emissão. De acordo com *IEA* (2019), todo o processo energético que envolve a criação da matéria prima para a construção, isto é, a produção de cimento, aço, cal, entre outros, chega a 39% da emissão total de CO2. Já a energia que o consumidor final utiliza para esquentar ou resfriar o ambiente, ou para luminosidade chega a 36%.
Uma solução possível, para os problemas do processo energético causados pela construção civil, é a utilização de otimização topológica em elementos estruturais. A otimização é um método matemático que busca maximizar ou minimizar uma função e, aplicado ao cálculo estrutural, possibilita alcançar uma solução ideal para uma estrutura (BENDSØE, 1988). Por meio de objetivos e condições de restrição, o método elimina regiões da peça com pouca contribuição para absorção das solicitações mecânicas, fazendo com que a estrutura fique totalmente carregada. As nuances matemáticas do método não foram destacadas neste estudo, sendo o escopo do trabalho somente a análise em programa comercial. A otimização topológica se mostrou promissora quando aplicada ao concreto armado. No trabalho experimental de Gaganelis e Mark (2019), é possível observar que as vigas otimizadas tiveram maiores resistências e menores deformações em relação à viga tradicional e que a emissão de CO2 diminuiu substancialmente. Porém, ocorreram rupturas abruptas nos nós, tanto no trabalho do Gaganelis e Mark (2019) quanto no trabalho de Leal (2020). Na tentativa de solucionar os problemas relacionados à otimização topológica utilizou-se, para o desenvolvimento das análises, o programa de elementos finitos *ANSYS Workbench* e *Mechanical* versão 2021 R2 *STUDENT*, devido à facilidade em aplicar o método de otimização, com maior número de objetivos, restrições e sem ter a necessidade de elaborar códigos específicos para a otimização. Utilizou-se, como referência, a viga ET1 de Leonhardt e Walther (1962), e a partir dela, foram desenvolvidas as demais estruturas utilizando otimização topológica. Também foi empregado os parâmetros do concreto e do aço, calibrados por Ceron (2021) no *ANSYS APDL*. Após a obtenção do resultado satisfatório da otimização, estimou-se a quantidade de materiais utilizados e com isto, calculou-se a emissão de CO2 utilizando a metodologia apresentada por Lima, Fernandes e Dantas (2018). Por fim, foi possível identificar uma redução significativa de CO2 utilizando o método de otimização topológica. Com isto, é possível destacar os três objetivos deste trabalho, um estudo sobre a teoria da otimização, analisar o comportamento estrutural de uma viga de concreto armado quando aplicado o método e a utilização da otimização topológica para reduzir a emissão do CO2 proveniente da construção civil.

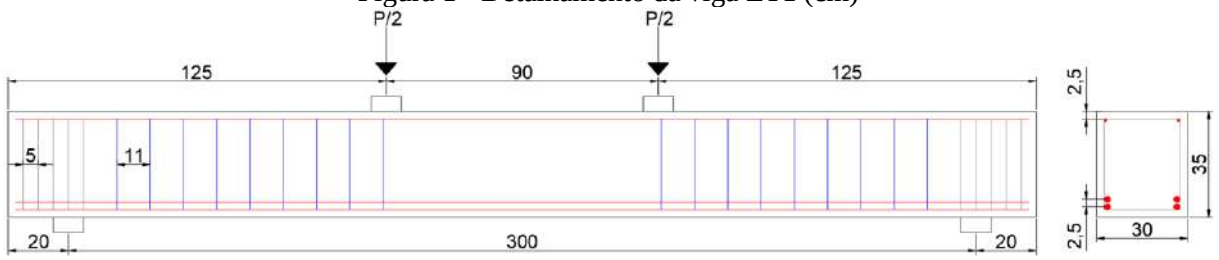
2. DESENVOLVIMENTO

Com o intuito em aplicar a otimização para a redução do dióxido de carbono e estudar o comportamento estrutural de uma viga otimizada, o presente trabalho foi dividido em 3 etapas: a primeira com a simulação da viga original (ET1) no *ANSYS Workbench*, para verificar se os valores do programa condiziam com os valores de Ceron (2021); na segunda etapa consta as três propostas de otimizações e suas validações estruturais e por último, o comparativo da emissão de CO2 da ET1 com as três propostas.

2.1 Modelagem da viga de Leonhardt e Walther

Inicialmente, estabeleceu-se a viga ET1 (figura 1), de Leonhardt e Walther, como base para as propostas de otimização, os diâmetros das armaduras são apresentados na tabela 4. Tendo em vista que Ceron (2021) utilizou o *ANSYS APDL* para a análise estrutural e calibração dos parâmetros dos materiais da ET1, e, a proposta de otimização, presente neste trabalho, foi concebida no *ANSYS Workbench*, se viu a necessidade de simular a viga utilizando os mesmos parâmetros de materiais e geometria, com a finalidade de verificar se o comportamento se mantinha o mesmo.

Figura 1 - Detalhamento da viga ET1 (cm)



Fonte: adaptado de LEONHARDT; WALTHER, (1962).

Primeiramente, para a modelagem parcial da estrutura (face transversal do corpo do concreto e linhas representando as armaduras de aço) utilizou-se o programa *AutoCAD*. Após isto, a modelagem dos apoios metálicos, extrusão do corpo de concreto e definição dos diâmetros das armaduras, foram feitas com modelador 3D presente no *Workbench*, o *SpaceClaim*. Em relação aos materiais do concreto, utilizou-se o modelo de Drucker-Prager com *HSD Linear*. Para a modelagem das armaduras, considerou-se o modelo *BISO* (*Bilinear Isotropic Hardening*). Os parâmetros do concreto foram inseridos no *WB* por comandos provenientes do *APDL*; a tabela 1 mostra os parâmetros do aço que foram inseridos no banco de dados dos materiais; na tabela 2, constam os elementos finitos utilizados para cada material.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço para a ET1, proposta 1, 2 e (3)

ET1, proposta 1, 2 e (3)	Modelo Linear Isotrópico		Modelo BISO	
Armaduras	Módulo de elasticidade (GPa)	Coef. de Poisson	Tensão de escoamento (MPa)	Endurecimento (MPa)
Superior	195 (210)	0,3	395,25 (425)	8748,2 (7654,9)
Inferior	195 (210)	0,3	363,80 (425)	7892,5 (7654,9)
Estribos	210 (210)	0,3	320,00 (425)	0

Fonte: os autores.

Tabela 2 – Elementos finitos utilizados em cada geometria

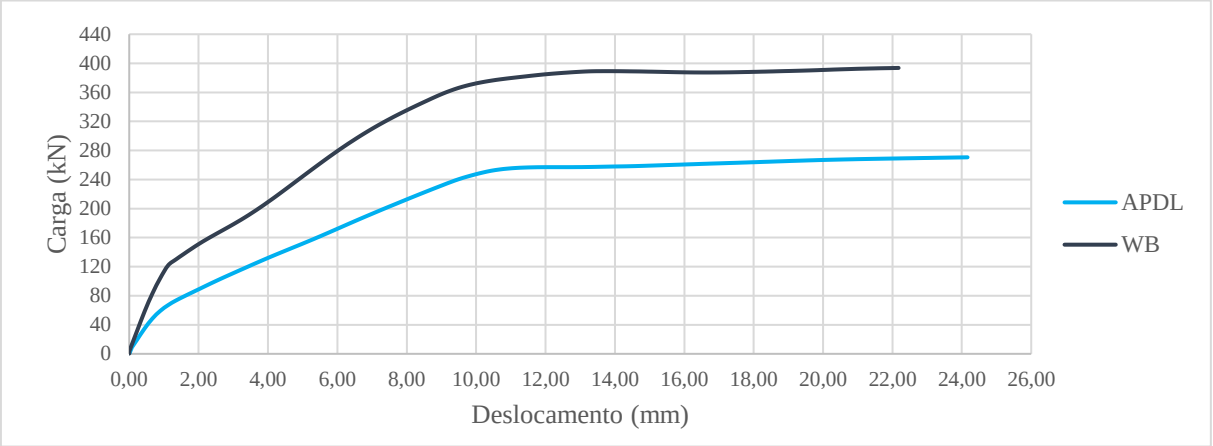
Geometrias	Elementos finitos		
Concreto	SOLID186		
Apoio carga	SOLID185	CONTA174	TARGE170
Apoio corpo de concreto	SOLID185	CONTA174	TARGE170
Armaduras	REINF264		

Fonte: os autores.

Para as configurações das análises, tanto para a viga ET1, quanto para a validação da otimização, utilizou-se malha de elementos finitos com dimensão de no máximo 100 mm; restrição de deslocamento vertical no apoio inferior; e, para representar a simetria da geometria, utilizou-se restrição nos movimentos horizontais nos nós localizados no meio do vão com a finalidade de representar a simetria da viga. Foram considerados dois casos de cargas, o primeiro somente com

o peso próprio (análise linear) e com 10 incrementos de carga (10 *substeps*), e o segundo com um deslocamento de 20 mm (análise não linear) atuando no apoio superior e com 100 incrementos de carga (100 *substeps*). No momento da análise estrutural da ET1, o comportamento da curva carga x deslocamento (PxΔ) indicou que a estrutura estava com comportamento mais rígido que a original, como mostra a figura 2. Para solucionar este problema, investigou-se as possíveis causas, sendo elas: unidades do comando do DP concrete, unidades da geometria 3D e por último as conexões entre o corpo de concreto e os apoios.

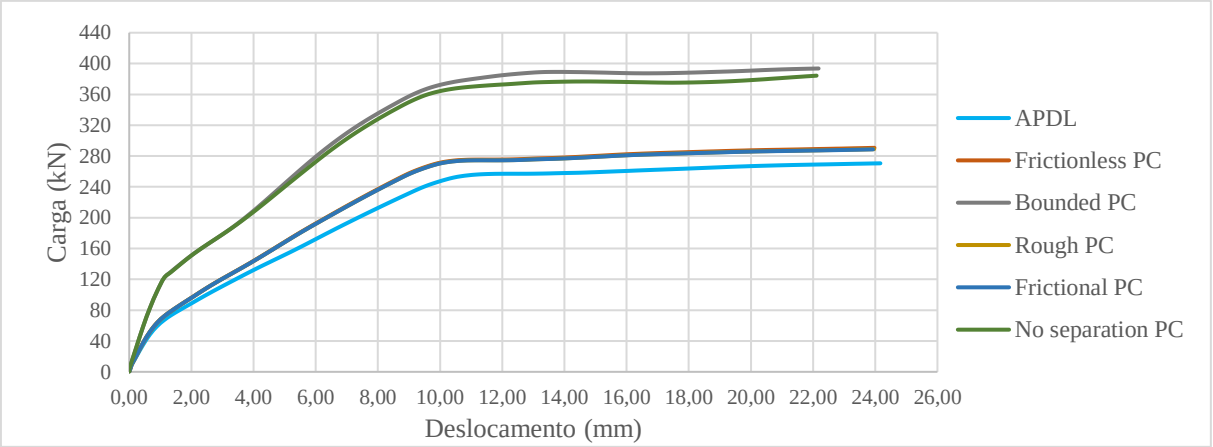
Figura 2 - Curva carga x deslocamento do *APDL* e *WB*



Fonte: os autores.

Após verificações, constatou-se que a incongruência entre os sistemas estava nas conexões entre os apoios metálicos e o corpo de concreto. No ambiente do *WB*, os elementos finitos de contato são criados automaticamente pelo programa, e são atreladas as conexões entre as geometrias, podendo ser classificados em cinco tipos: *Bounded* (definido inicialmente pelo programa), *No separation*, *Frictionless*, *Rough* e *Friction* (em português: vinculado, sem separação, sem atrito, rugoso e com atrito). Cada um destes modelos de conexão possui a sua característica, não sendo escopo do presente trabalho o detalhamento do comportamento de cada tipo. A figura 3 apresenta a curva com os valores controlados pelo programa (*PC – Program Controlled*). Já a tabela 3 mostra os parâmetros que foram alterados para cada conexão, onde a conexão *Frictionless PC* e *Bounded PC* são sobrepostas.

Figura 3 - Comparação entre os tipos de apoios com os parâmetros "*PC*"



Fonte: os autores.

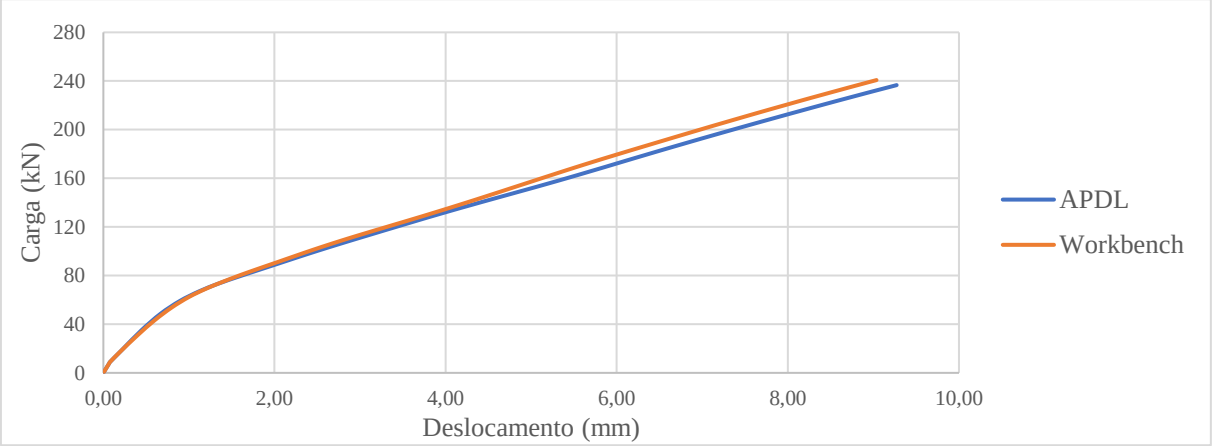
Tabela 3 – Parâmetros das conexões

Parâmetros do *WB*	Conexão da carga	Conexão do apoio
Type	*Rough*	*Rough*
Behavior	*Asymmetric*	*Asymmetric*
Detection Method	*Nodal-Projected Normal From Contact*	*Nodal-Normal To Target*
Penetration Tolerance	*Program Controlled*	*Factor*
Penetration Tolerance Factor	-	0,025
Normal Stiffness	*Factor*	*Factor*
Normal Stiffness Factor	0,015	0,06
Interface Treatment	*Add Offset, Ramped Effects*	*Ajust to Touch*

Fonte: os autores.

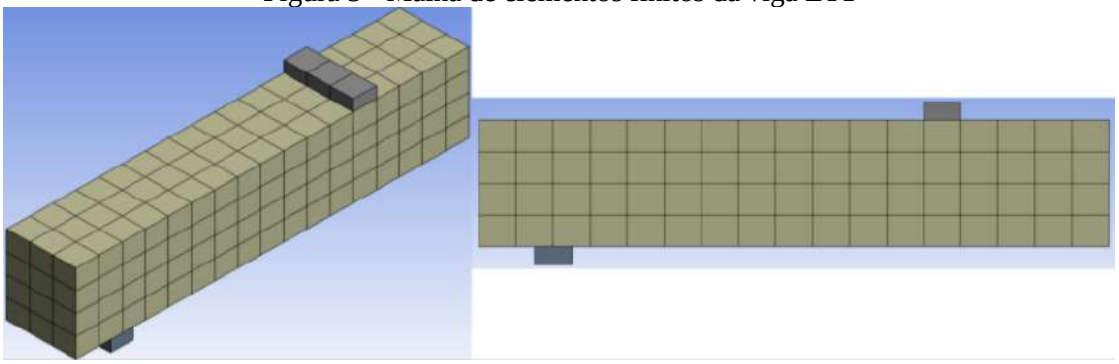
Com estas modificações, o rompimento da ET1, no *WB*, ocorreu no *substep* 53, para uma carga de 240,76 kN e deslocamento de 9,04 mm. A figura 4 apresenta a comparação da curva PxΔ do *APDL* e do *WB*. A malha de elementos finitos, disposição das armaduras e sua área de aço, juntamente com os resultados das análises de deslocamento vertical, tensão no corpo de concreto e nas armaduras no instante de ruptura, são apresentados, respectivamente, na figura 5 e 6, tabela 4 e figuras 7, 8 e 9.

Figura 4 - Comparação da curva PxΔ do APDL e do WB



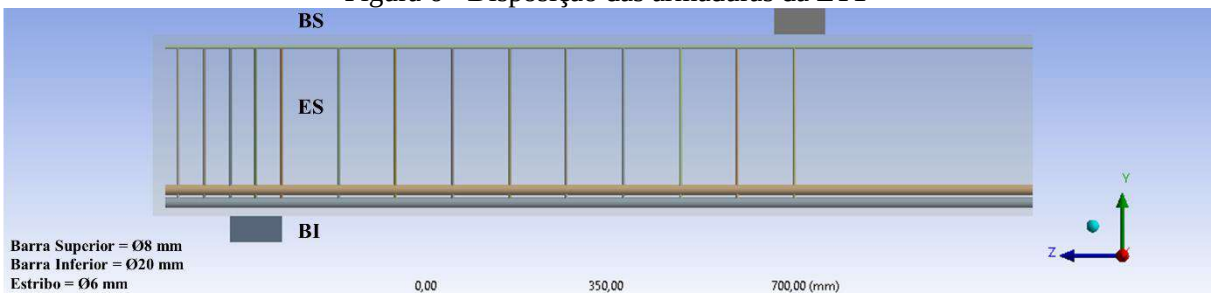
Fonte: os autores.

Figura 5 - Malha de elementos finitos da viga ET1



Fonte: os autores.

Figura 6 - Disposição das armaduras da ET1



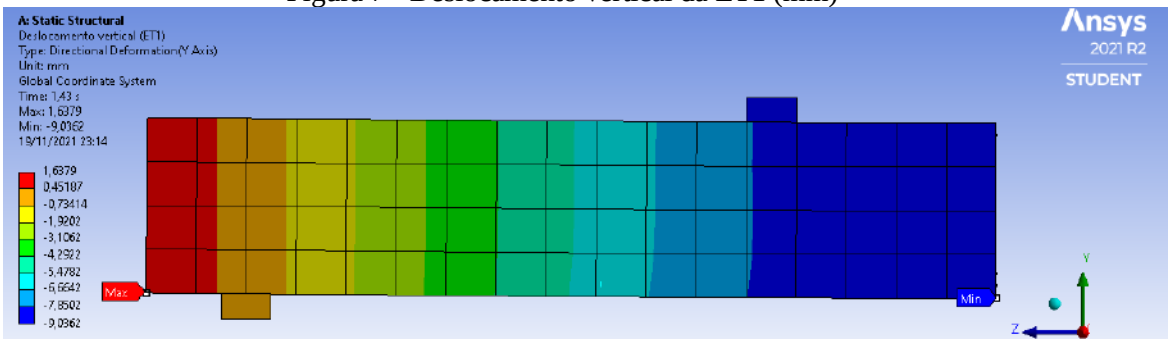
Fonte: os autores.

Tabela 4 – Diâmetros, quantidades e área total das armaduras da ET1

ET1							
Barras	Ø (mm)		Quantidade total		Áreas (mm²)		Área total (mm²)
Inferior	20	-	4	-	1261	-	2153
Superior	8	-	2	-	101	-	
Estribos	6	-	28	-	792	-	

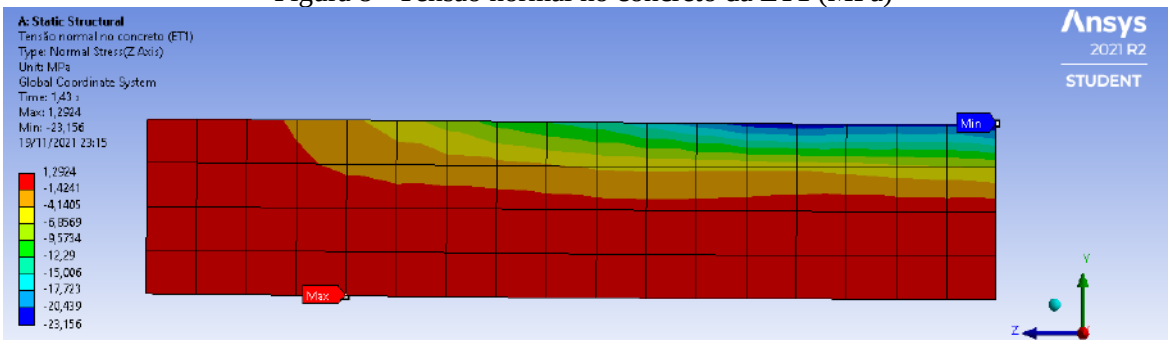
Fonte: adaptado de LEONHARDT; WALTHER, (1962).

Figura 7 - Deslocamento vertical da ET1 (mm)



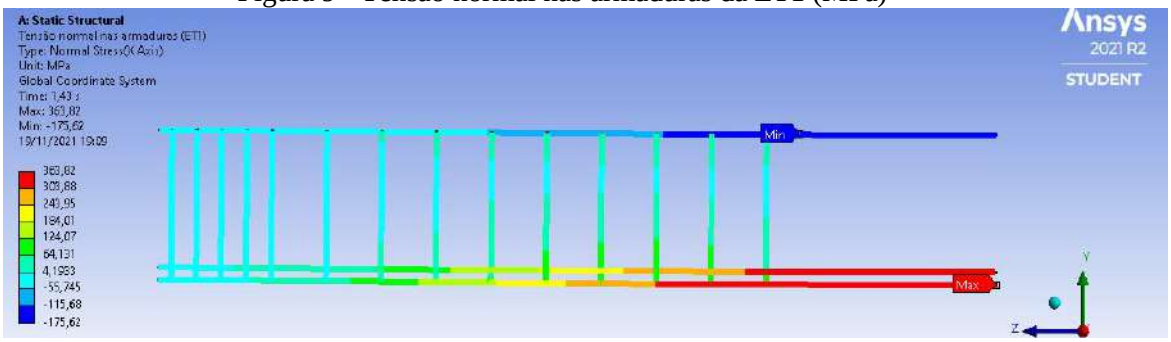
Fonte: os autores.

Figura 8 - Tensão normal no concreto da ET1 (MPa)



Fonte: os autores.

Figura 9 - Tensão normal nas armaduras da ET1 (MPa)

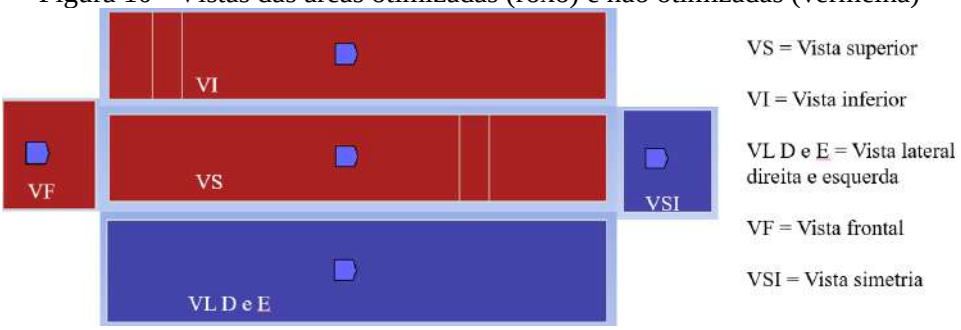


Fonte: os autores.

2.2 Otimização topológica

Por outra limitação do programa, a simulação da otimização foi realizada sem a representação das armaduras e do modelo *DP concrete*. Tendo em vista estas limitações, utilizou-se para o concreto somente os valores da densidade (2,54E-9 N/mm³), módulo de elasticidade (28860 MPa), coeficiente de Poisson (0,2) e malha de elementos finitos de dimensão máxima de 20 mm, pois, obteve-se uma estrutura com aberturas mais definidas, para a simulação da otimização. Inicialmente, definiu-se as zonas de otimização e as que não sofreriam otimização (figura 10). Após alguns testes, optou-se por utilizar o objetivo de minimizar a deformação elástica, do inglês *minimize compliance*, e três tipos de restrições: redução da massa, para que se mantivesse, aproximadamente, 40% da massa original; extrusão, para que a redução da geometria não ocorresse na direção transversal da viga, e tamanho mínimo de membro (*member size*) de 80 mm.

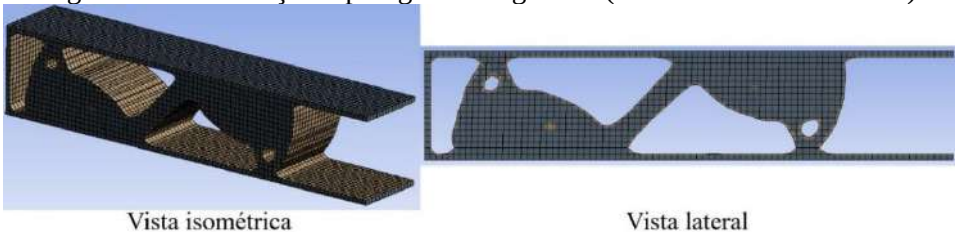
Figura 10 - Vistas das áreas otimizadas (roxo) e não otimizadas (vermelha)



Fonte: os autores.

Após a solução do programa, o formato da viga de ET1, com o processo de otimização, ficou conforme a figura 11. Com isto, houve uma redução de, aproximadamente, 50% da massa original, passando de 906,78 kg para 452,84 kg.

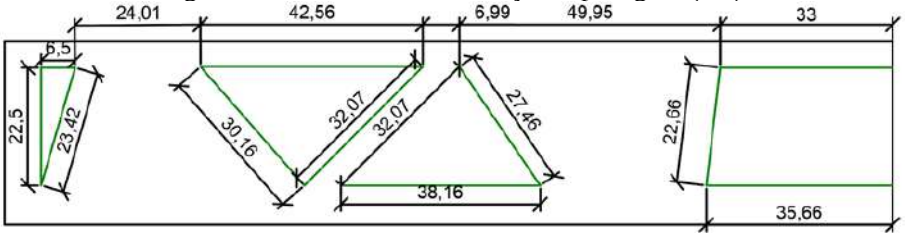
Figura 11 - Otimização topológica da viga ET1 (Vista isométrica e lateral)



Fonte: os autores.

Algumas modificações na geometria foram feitas para tornar a viga executável e para a validação estrutural. Para isto, utilizou-se o *SpaceClaim*, para medir, aproximadamente, os comprimentos e distâncias das aberturas na viga; e o *AutoCAD* para redesenhar a viga. A figura 12 mostra o resultado desta modificação. Com isto, a viga passou a ter uma massa de 638,45 kg.

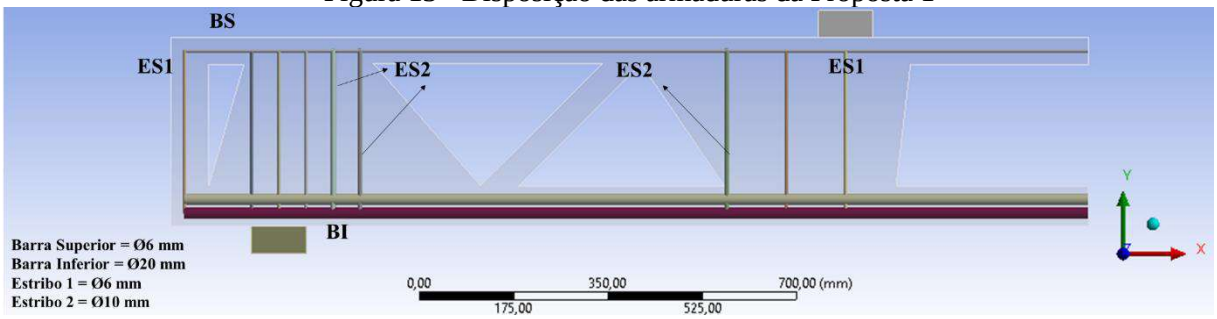
Figura 12 - Cotas da modificação topológica (cm)



Fonte: os autores.

Para a validação estrutural, três propostas foram estabelecidas com o intuito de comparar com a viga ET1 e verificar o comportamento da curva carga x deslocamento, área de aço, tensões nas armaduras e no concreto. Como primeira proposta, manteve-se, aproximadamente, a área de aço da estrutura original e estribos na vertical (figura 13).

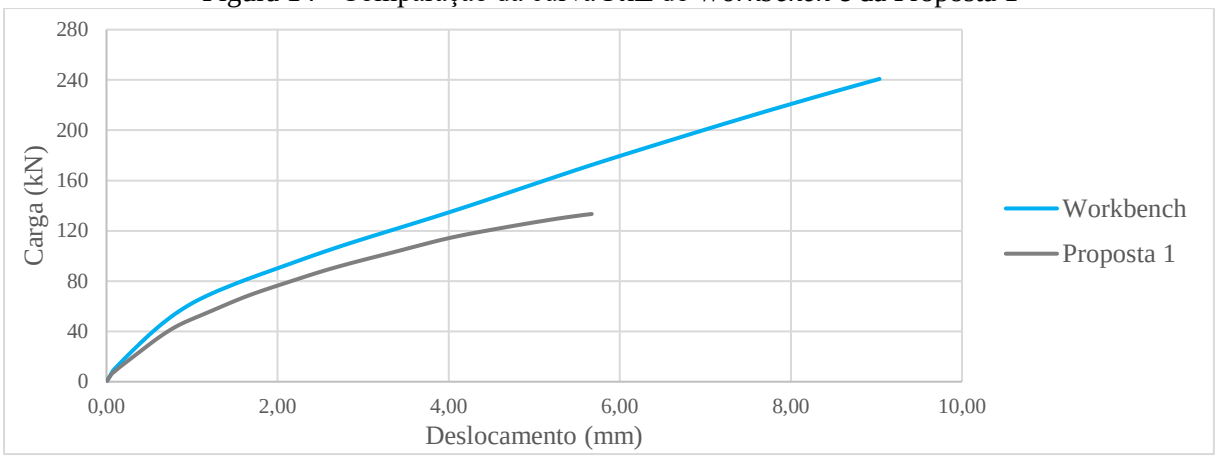
Figura 13 - Disposição das armaduras da Proposta 1



Fonte: os autores.

Esta proposta, apesar das semelhanças com a ET1, se mostrou menos rígida; apresentando rompimento em um dos estribos e pouca solicitação mecânica nas demais barras. O rompimento ocorreu no *substep* 80, para uma carga de 133,36 kN e deslocamento de 5,67 mm. A figura 14 apresenta a comparação da curva PxΔ da ET1 no *WB* e da proposta 1. A área de aço, juntamente com os resultados das análises de deslocamento vertical, tensão no corpo de concreto e nas armaduras, no instante de ruptura dos estribos, são apresentados, respectivamente, na tabela 5 e nas figuras 15, 16 e 17.

Figura 14 - Comparação da curva PxΔ do *Workbench* e da Proposta 1



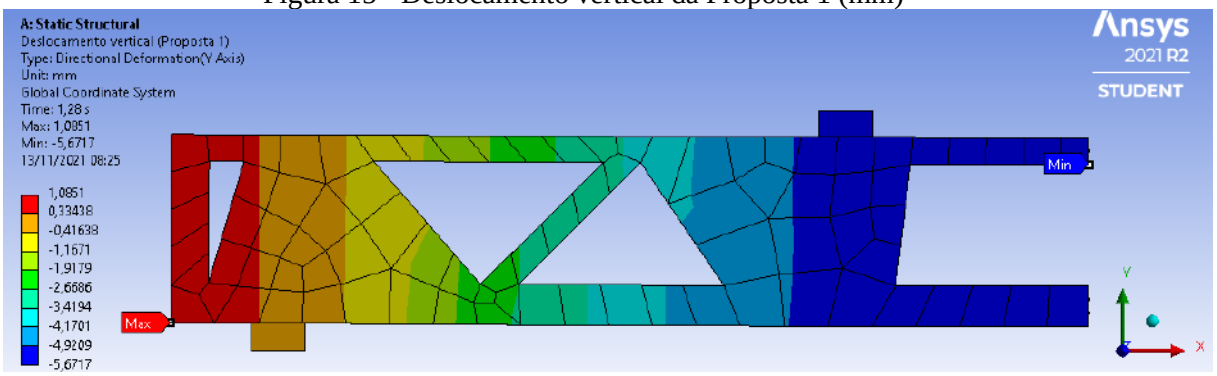
Fonte: os autores.

Tabela 5 – Diâmetros, quantidades e área total das armaduras da Proposta 1

Proposta 1							
Barras	Ø (mm)		Quantidade total		Áreas (mm²)		Área total (mm²)
Inferior	20	-	4	-	1261	-	2128
Superior	6	-	2	-	57	-	
Estribos	6	10	12	6	339	471	

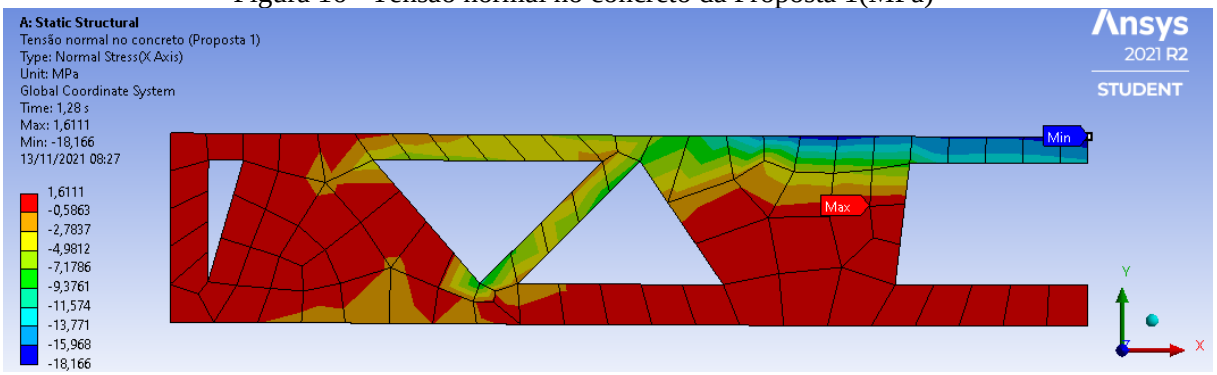
Fonte: os autores.

Figura 15 - Deslocamento vertical da Proposta 1 (mm)



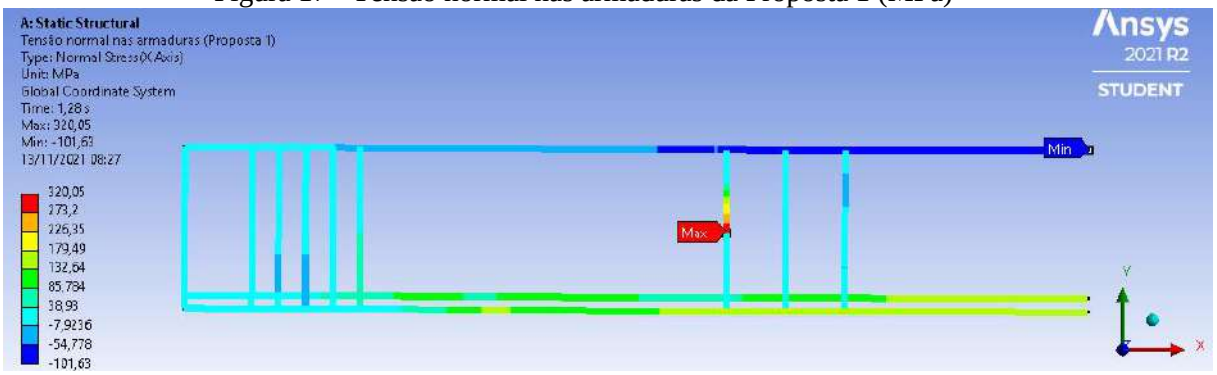
Fonte: os autores.

Figura 16 - Tensão normal no concreto da Proposta 1(MPa)



Fonte: os autores.

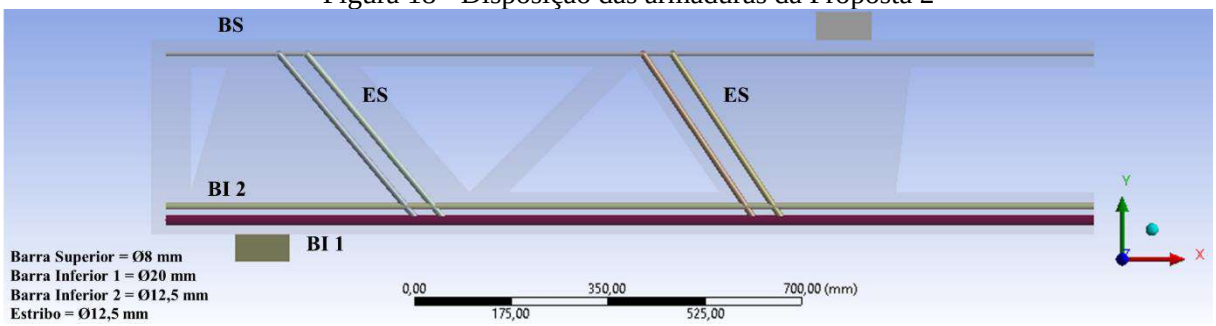
Figura 17 - Tensão normal nas armaduras da Proposta 1 (MPa)



Fonte: os autores.

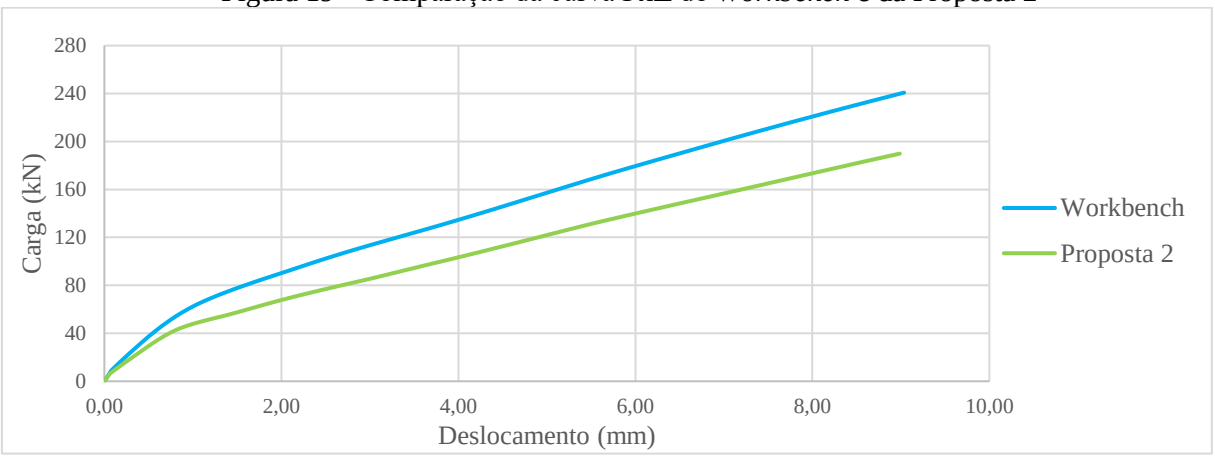
Para a segunda proposta, modificou-se da área de aço e inclinação dos estribos (figura 18), com a finalidade de alcançar a mesma curva PxΔ da estrutura original. Como estas modificações, a otimização se mostrou mais rígida se comparada com a primeira proposta, porém, não o suficiente para se aproximar da curva da ET1, ocorrendo rompimento das armaduras inferiores antes do esperado. O rompimento ocorreu no *substep* 93, para uma carga de 189,84 kN e deslocamento de 8,98 mm. A figura 19 apresenta a comparação da curva PxΔ da ET1 no *WB* e da proposta 2. A área de aço, juntamente com os resultados das análises de deslocamento vertical, tensão no corpo de concreto e nas armaduras, no instante de ruptura das armaduras inferiores, são apresentados, respectivamente, na tabela 6 e nas figuras 20, 21 e 22.

Figura 18 - Disposição das armaduras da Proposta 2



Fonte: os autores.

Figura 19 - Comparação da curva PxΔ do *Workbench* e da Proposta 2



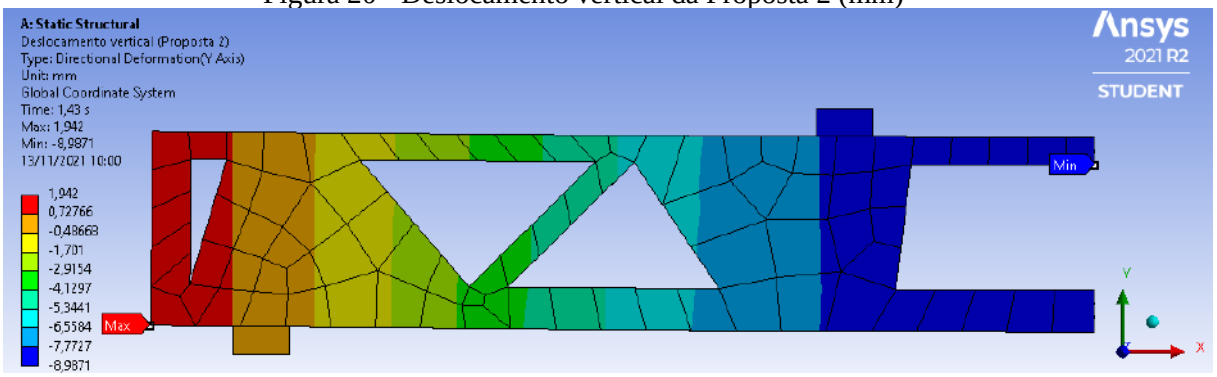
Fonte: os autores.

Tabela 6 – Diâmetros, quantidades e área total das armaduras da Proposta 2

Proposta 2							
Barras	Ø (mm)		Quantidade total		Áreas (mm²)		Área total (mm²)
Inferior	20	12,5	2	2	630	245	1958
Superior	8	-	2	-	101	-	
Estribos	12,5	-	8	-	982	-	

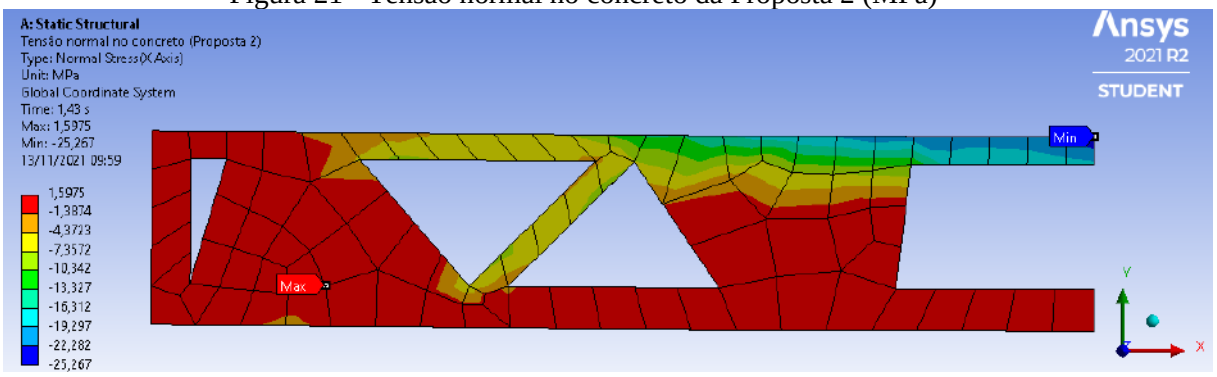
Fonte: os autores.

Figura 20 - Deslocamento vertical da Proposta 2 (mm)



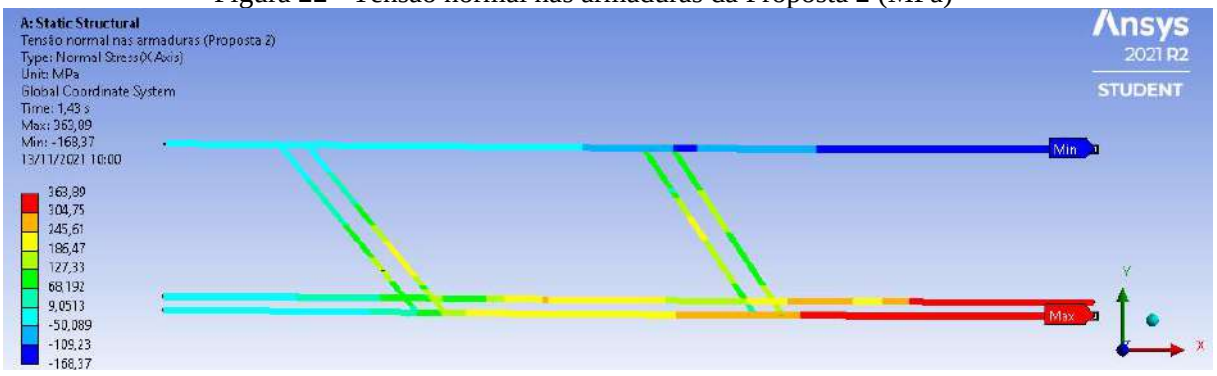
Fonte: os autores.

Figura 21 - Tensão normal no concreto da Proposta 2 (MPa)



Fonte: os autores.

Figura 22 - Tensão normal nas armaduras da Proposta 2 (MPa)

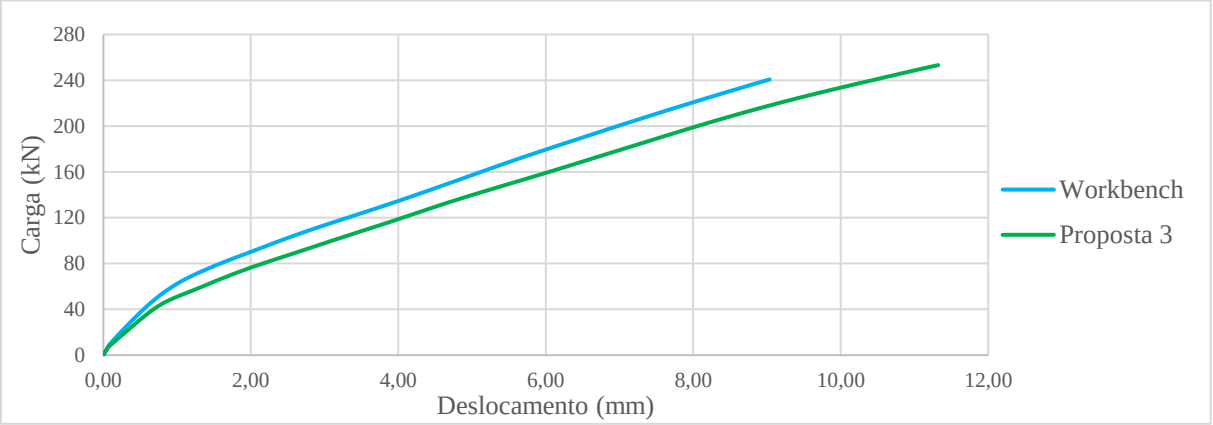


Fonte: os autores.

Analisando a proposta 1 e 2, verificou-se que um dos limitadores, para a viga otimizada não atingir a curva PxΔ da ET1, foram as propriedades mecânicas das armaduras. Para contornar este problema, na terceira proposta optou-se por utilizar o aço CA-50 em todas as barras e modificar os

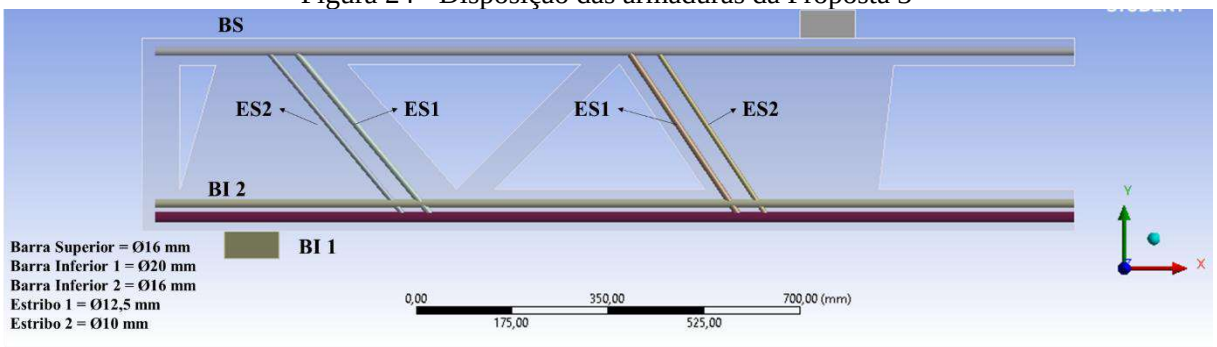
diâmetros. Com estas modificações, a viga otimizada superou a viga original em relação a carga aplicada no momento da ruptura. O rompimento ocorreu nas armaduras inferiores no *substep* 120, para uma carga de 253,22 kN e deslocamento de 11,32 mm. A figura 23 apresenta a comparação da curva PxΔ da ET1 no *WB* e da proposta 3. A disposição das armaduras e sua área de aço, juntamente com os resultados das análises de deslocamento vertical, tensão no corpo de concreto e nas armaduras, no instante de ruptura das armaduras inferiores, são apresentados, respectivamente, na figura 24, tabela 7 e nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 23 - Comparação da curva PxΔ do *Workbench* e da Proposta 3



Fonte: os autores.

Figura 24 - Disposição das armaduras da Proposta 3



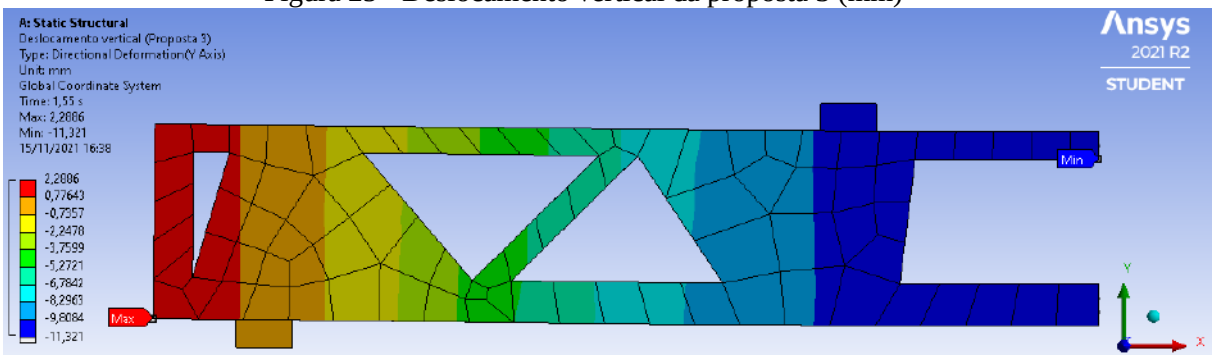
Fonte: os autores.

Tabela 7 – Diâmetros, quantidades e área total das armaduras da Proposta 3

Proposta 3							
Barras	Ø (mm)		Quantidade total		Área (mm²)		Área total (mm²)
Inferior	20	16	2	2	630	402	2239
Superior	16	-	2	-	402	-	
Estribos	12,5	10	4	4	491	314	

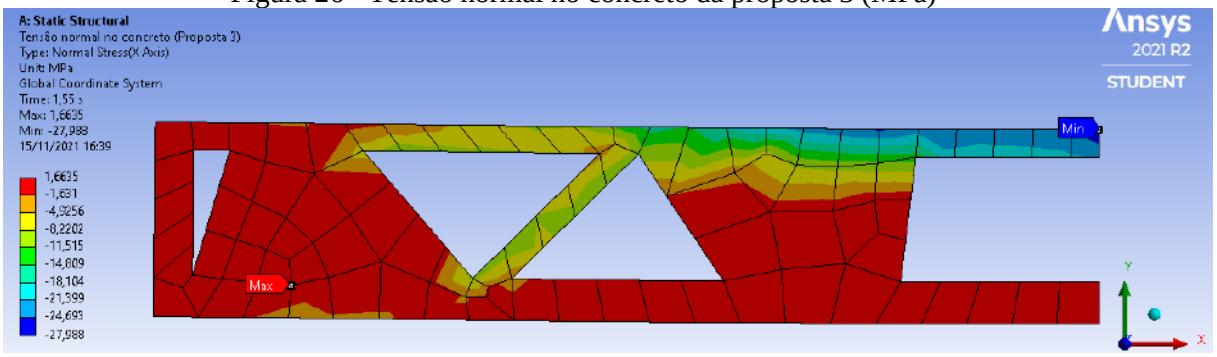
Fonte: os autores.

Figura 25 - Deslocamento vertical da proposta 3 (mm)



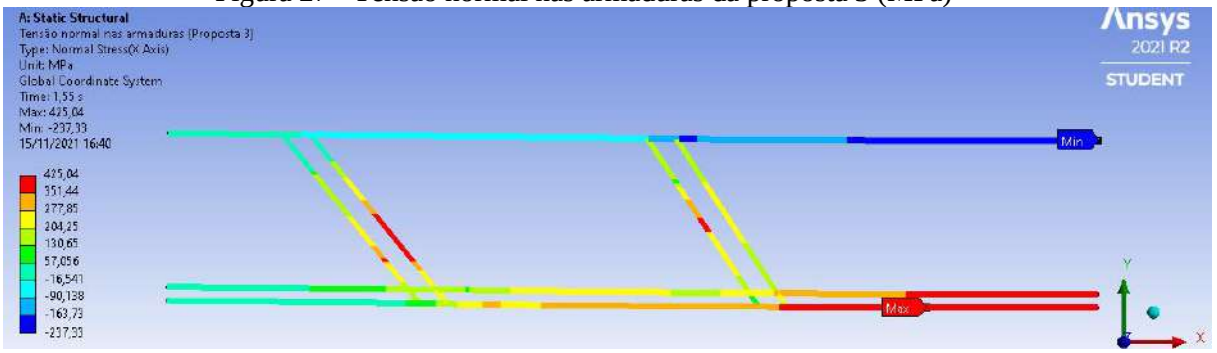
Fonte: os autores.

Figura 26 - Tensão normal no concreto da proposta 3 (MPa)



Fonte: os autores.

Figura 27 - Tensão normal nas armaduras da proposta 3 (MPa)



Fonte: os autores.

2.3 Cálculo da emissão de CO2

Utilizando a tabela de composição dos materiais, disponível no trabalho de Leonhardt e Walther (1962), foi possível calcular a quantidade e o volume de cada material para a viga ET1 e estimar para as propostas 1, 2 e 3. Com isto, a tabela 8 mostra o resultado do cálculo e a quantidade de cada material para cada viga com seção longitudinal completa. Utilizou-se o volume de seção longitudinal completa de 0,357 m³ para a ET1 e 0,251 m³ para as propostas.

Tabela 8 – Quantidade de material para o corpo de concreto

Material	Composição dos materiais	ET1		Proposta 1,2 e 3	
Tipo	kg/m³	kg	m³	kg	m³
Cimento	226	81	-	57	-
Areia fina	120	43	0,0163	30	0,0115
Água	199	71	-	50	-

Fonte: os autores.

Utilizando os valores da tabela 8 e dos volumes, foi possível quantificar a emissão de dióxido de carbônico de cada uma das vigas. Com isto, é apresentado na tabela 9 as emissões do corpo de concreto, das armaduras e, por último, o valor total de emissão de CO2 das vigas.

Tabela 9 – Quantidade de material para o corpo de concreto

Vigas	Corpo de concreto (kg)	Armaduras (kg)	Emissão de CO2 (kg)
ET1	79	62	140
Proposta 1	55	60	116
Proposta 2	55	51	106
Proposta 3	55	66	121

Fonte: os autores.

A tabela 10 mostra o comparativo de peso e volume do concreto, área de aço, carga e deslocamento vertical no momento da ruptura, e emissão total de CO2 entre as 4 vigas analisadas. Já a tabela 11 mostra a porcentagem deste comparativo, sendo as porcentagens negativas as reduções e positivas os acréscimos.

Tabela 10 – Comparativo dos resultados da viga ET1 e propostas 1, 2 e 3

Vigas	Volume (m³)	Área de aço (mm²)	Carga (kN)	Desloc. (mm)	Emissão total de CO2 (kg)
ET1	0,357	2153	240,76	9,04	140
Proposta 1	0,251	2128	133,36	5,67	116
Proposta 2	0,251	1958	189,84	8,98	106
Proposta 3	0,251	2239	253,22	11,32	121

Fonte: os autores.

Tabela 11 – Porcentagem de redução e acréscimo em relação a viga ET1

Vigas	Volume (m³)	Área de aço (mm²)	Carga (kN)	Desloc. (mm)	Emissão total de CO2 (kg)
ET1	0%	0%	0%	0%	0%
Proposta 1	-42,23%	-1,18%	-80,53%	-59,44%	-21,37%
Proposta 2	-42,23%	-9,95%	-26,82%	-0,67%	-31,72%
Proposta 3	-42,23%	3,87%	4,92%	20,14%	-15,49%

Fonte: os autores.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo o estudo do método de otimização topológica, e seu comportamento estrutural, com o intuito de reduzir as emissões de CO2 provenientes das vigas de concreto armado. No estudo do comportamento estrutural, verificou-se que devido a redução da seção longitudinal do concreto, a estrutura otimizada se mostrou menos rígida se comparado com a viga ET1. Mesmo com modificações nos diâmetros das barras e inclinação, constatou-se que a viga otimizada gerava uma maior solicitação mecânica nas armaduras. Esta solicitação fez com que os valores utilizados para as propriedades mecânicas (tensão de escoamento e módulo tangente/endurecimento) das armaduras não fossem suficientes, sendo necessário utilizar outro tipo

de aço com propriedades mecânicas superiores. Com isto, na proposta 3, utilizou-se o aço CA-50 nas barras, pois trata-se de um aço comercial e possui tensão de escoamento e módulo tangente/endurecimento maior se comparado com os valores originais.

Para a definição da melhor proposta de otimização, levou-se em consideração os fatores da área de aço, carga aplicada no momento da ruptura das armaduras, a quantidade de CO2 emitido e o deslocamento vertical com o objetivo de tornar a curva PxΔ da viga otimizada semelhante à da viga ET1. Com isto, é possível observar que, na proposta um, mesmo utilizando uma área de aço com redução de 1,18%, sua carga aplicada reduziu em 80,53%. Tendo em vista estes resultados, a proposta 1 não foi considerada o melhor caso de otimização. Na proposta dois, utilizando uma área de aço com redução de 9,95%, sua carga aplicada foi 26,82% menor que a original. Não se mostrando vantajoso, pois, a curva PxΔ não apresentou o comportamento desejado. Na proposta 3, devido a utilização do aço CA-50, obteve-se um acréscimo na área de aço de 3,87%, porém, sua carga aplicada foi 4,92% maior e sua emissão de CO2 reduziu em 15,49%. Sendo a sua única desvantagem o deslocamento vertical, que ficou 20,14% acima da viga ET1 Com isto, considerou-se a viga otimizada da proposta três como sendo a viga ideal em termos de carga aplicada no momento da ruptura e emissão de CO2.

Para os trabalhos futuros, sugere-se um estudo mais detalhado em relação ao comportamento das conexões e elementos finitos de contatos; outras análises de otimização, utilizando os diferentes tipos de objetivos e restrições; verificação se os resultados obtidos com a viga otimizada atendem a NBR 6118/2014; para a validação estrutural, testar diferentes combinações de disposições de armaduras, com diferentes inclinações, quantidades, e utilizar diferentes materiais para o concreto e para as armaduras; por último, realizar o ensaio experimental da viga otimizada e fazer um comparativo entre os valores computacionais e experimentais.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Adriana Fátima dos Santos e Leandro Selistre de Oliveira, por me apoiarem em toda essa jornada, e em especial a minha professora e orientadora, Bruna Manica Lazzari, por indicar o melhor caminho para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ANSYS, inc. **Element Reference** (2021 R2), 2021

ANSYS, inc. **Mechanical User's Guide** (2021 R2), 2021

BENDSØE, Martin Philip *et al*. **Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method**. CMAME. Michigan. 1988.

BENDSØE, Martin Philip; SIGMUND, Ole. **Topology Optimization: theory, methods, and applications**. 2. ed. Nova York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 381 p.

CERON, Mário Vargas. **Desenvolvimento de um script para análise em elementos finitos de vigas de concreto através do software ANSYS**. 2021. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, PUCRS, Porto Alegre, 2021.

GAGANELIS, Georgios *et al*. **Downsizing weight while upsizing efficiency: An experimental approach to develop optimized ultra-light UHPC hybrid beams**. 2019. 13 f., Institute Of Concrete Structures, Ruhr University Bochum, Universitätsstraße, Alemanha, 2019.

LEAL, Thomás. **Desenvolvimento de tecnologia de produção de vigas pré-fabricadas com otimização topológica**. 2020. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

LEONHARDT, F.; WALTHER, R. **Beiträge zur behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau. Beton und Stahlbetonbau**. v. 57. n. 7. jul. 1962

LIMA, Emerson Medeiros de *et al*. **Quantificação de co2 emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência un. In: congresso técnico científico da engenharia e da agronomia – contecc'2018**, 75., 2018, Maceió. Congresso: Contecc, 2018.

Sistema de estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (seeg) (Brasil) (comp.). **Contexto**. 2020. Disponível em: https://seeg.eco.br/contexto#. Acesso em: 17 nov. 2021.

The 2019 global status report for buildings and construction. Canadá: International Energy Agency (Iea), 2019. Disponível em: https://www.unep.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector. Acesso em: 21 ago. 2021.