



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

CARLOS VÍCTOR DE OLIVEIRA BARBOSA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO COM O SOFTWARE ANSYS**

CAMPINA GRANDE

2021

CARLOS VICTOR DE OLIVEIRA BARBOSA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO COM O SOFTWARE ANSYS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular da graduação e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplicio.

CAMPINA GRANDE

2021

É concedida à Universidade Federal de Campina Grande permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

CARLOS VICTOR DE OLIVEIRA BARBOSA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO COM O SOFTWARE ANSYS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular da graduação e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício - UFCG

Presidente - Orientador

Nota: _____

Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho

1ª Examinador

Nota: _____

Profª. Dra. Cássia Mendonça dos Anjos

2ª Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre me deram incentivo a buscar meus sonhos. À minha família e amigos que sempre me apoiaram e aos professores que foram essenciais para minha chegada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, a quem merece toda honra e glória. Agradeço a Ele pela família, saúde, sabedoria, pelas oportunidades que me concedeu, inclusive por ter chegado até aqui. Com quem sempre devemos caminhar de mãos dadas.

À minha mãe, Flávia, que me ajudou muito durante toda a graduação. A quem admiro muito e sempre esteve ao meu lado me apoiando e me dando forças em todas as áreas da vida.

Ao meu pai, Carlos, sempre me incentivou a buscar meus sonhos e me deu conselhos que me incentivaram a buscar sempre melhorar em todos os aspectos.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Departamento de Engenharia Civil, pelo conhecimento transmitido e pela contribuição na minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Simplício, e a Banca examinadora, composta pelo Professor Doutor Milton Bezerra das Chagas Filho e pela Professora Doutora Cássia Mendonça dos Anjos, por toda paciência, dedicação e orientação que contribuíram para realização desse trabalho.

A todos os professores, desde o ensino fundamental até ao nível superior, por todo o conhecimento transmitido, pois conduz à formação de indivíduos capacitados.

Aos meus amigos de Universidade, tais como Hamilton Martins, Israel Gomes, Jullyo Rithiery, Marco Antônio, Roberto Gonçalves e Vinícius Moraes, por todo o apoio e irmandade, seja nos momentos fáceis ou difíceis, sendo muito importantes para minha chegada até aqui.

RESUMO

Com o desafio de executar estruturas mais complexas e econômicas, o setor da construção civil incentivou o desenvolvimento de novos sistemas estruturais mais eficientes que o concreto armado para grandes obras. Um dos sistemas construtivos desenvolvidos para potencializar as estruturas é o sistema misto de aço e concreto, que busca aliar as qualidades da estrutura metálica com a resistência adicional à compressão do concreto presente nas lajes. Para analisar tais sistemas com alta precisão, uma forma bastante econômica e ágil de executar essa análise estrutural é através da simulação numérica computacional. Para tal, o presente estudo buscou analisar uma viga mista de concreto com o apoio do software *Ansys Student*, para avaliar a influência da mesa colaborante de concreto de alto desempenho em uma viga mista parcialmente embutida, comparando-a com os resultados do perfil metálico isolado. Dessa forma, a estrutura foi modelada com o perfil metálico W 410 X 75 e uma laje de concreto com 15 cm de espessura, para determinar as tensões internas despertadas. Com a simulação da estrutura, foi possível observar, como esperado, que a capa de concreto é capaz de reduzir as tensões principais na viga de 15% à 35% e reduzir o deslocamento vertical (flecha no meio do vão) em até 55%. Também foi possível verificar que o aumento da resistência do concreto em cerca de 10MPa gerou variações de até 1% nas tensões e deformações, tornando-se mais expressivas à medida em que o incremento na resistência do concreto foi maior. Deste modo, é possível constatar que o modelo estrutural de vigas mistas de aço e concreto proporciona melhor distribuição das cargas aplicadas, quando comparado à estrutura metálica, reduzindo a tensão sobre o perfil metálico utilizado, evitando o uso de perfis maiores ou enrijecedores, e com menores deformações na estrutura.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho; Viga mista de aço e concreto; Simulação computacional.

ABSTRACT

With the objective of build more complex and economical structures, the construction sector has encouraged the development of new structural systems that are more efficient than reinforced concrete for large constructions. One of the construction systems developed to optimize structures is the mixed steel-concrete system, which seeks to combine the qualities of the steel structure with the additional compressive strength of the concrete present in the slabs. To analyze such systems with high accuracy, a very economical and quick way to perform this structural analysis is through the numerical computer simulation among others. For such, the present study focused on analyzing a steel-concrete composite beam with the support of Ansys Student software, in order to evaluate the influence of the high performance concrete collaborating slab in a partially embedded composite beam, comparing it with the results of the isolated steel profile. Thus, the structure was modeled with the profile-Beam W 410 X 75 and a 15 cm thick concrete slab, to obtain the principal stresses on the structure. With the simulation of the structure, it was possible to observe that the concrete cover is able to reduce the internal stresses in the beam from 15% to 35% and reduce the vertical displacement (deflection) up to 55%. Also, it was possible to verify that the change in concrete strength in 10 MPa generated variations of up to 1% in stresses and deformations, becoming more expressive as the change in concrete class is bigger. Thus, it is possible to verify that the structural model of steel-concrete composite beams provides a better distribution of the principal stresses, when compared to the steel structure, reducing the stress on the profile-Beam used, avoiding the use of more expensive W-Beams, and with minors deformations on the structure.

Keywords: High performance concrete; Steel-concrete composite beam; Computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fissuração do concreto com resistência até 40MPa.....	6
Figura 2 – Tipos de viga mista de aço e concreto.	7
Figura 3 – Seção transversal genérica, perfil I Gerdau Açominas.	8
Figura 4 – Tipos de conectores de cisalhamento.	10
Figura 5 – Posicionamento de conectores de cisalhamento.	10
Figura 6 – Detalhes geométricos do conector <i>stud bolt</i>	11
Figura 7 – Detalhes do conector de perfil U.....	12
Figura 8 – Interface do <i>Ansys Student</i>	13
Figura 9 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho.	15
Figura 10 – Esquema da viga estudada.	16
Figura 11 – Aplicações disponíveis da análise estática.	16
Figura 12 – Materiais cadastrados no software para a análise.	17
Figura 13 – Modelagem 3D do perfil metálico W 410 X 75.....	18
Figura 14 – Seção transversal da viga mista modelada para a verificação.....	19
Figura 15 – Dimensões do conector de cisalhamento STUD BOLT - 3/4X3.1/8" (19 X 80 mm).	19
Figura 16 – Modelagem 3D da viga mista parcialmente embutida.....	20
Figura 17 – Hierarquia de recursos da seção <i>Model</i>	20
Figura 18 – Malha gerada para o perfil metálico W 410 X 75.....	21
Figura 19 – Malha gerada para a viga mista de aço e concreto.....	22
Figura 20 – Configuração dos apoios de primeiro gênero (à esquerda) e segundo gênero (à direita).....	23
Figura 21 – Gráfico da tensão máxima ocorrida ao longo da viga metálica.	26
Figura 22 – Região do apoio do perfil com maior tensão de cisalhamento.	26
Figura 23 – Gráfico da tensão de cisalhamento máxima no apoio da viga em função da variação da resistência do concreto.....	28
Figura 24 – Tensão de cisalhamento nos conectores da viga mista C25, considerando o deslizamento entre os materiais.	28
Figura 25 – Gráfico da tensão de tração máxima no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.....	29
Figura 26 – Gráfico da tensão de tração mínima no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.....	30

Figura 27 – Gráfico da tensão de compressão máxima nos apoios em função da variação da resistência do concreto.....	30
Figura 28 – Gráfico da tensão de compressão mínima nos apoios em função da variação da resistência do concreto.....	31
Figura 29 – Gráfico do deslocamento vertical máximo no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.....	32
Figura 30 – Seção homogeneizada da viga mista de aço e concreto.....	42
Figura 31 – Deformação da viga metálica com perfil W 410 X 75.....	45
Figura 32 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.	45
Figura 33 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.	46
Figura 34 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.	46
Figura 35 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.	47
Figura 36 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.	47
Figura 37 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.	48
Figura 38 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.	48
Figura 39 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.	49
Figura 40 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.	49
Figura 41 – Tensão de cisalhamento incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75.	50
Figura 42 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.	51
Figura 43 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.	51
Figura 44 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.	52

Figura 45 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.	52
Figura 46 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.	53
Figura 47 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.	53
Figura 48 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.	54
Figura 49 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.	54
Figura 50 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.	55
Figura 51 – Tensão de flexão máxima incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75. ...	56
Figura 52 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.	56
Figura 53 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.	57
Figura 54 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.	57
Figura 55 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.	58
Figura 56 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.	58
Figura 57 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.	59
Figura 58 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.	59
Figura 59 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.	60
Figura 60 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.	60
Figura 61 – Tensão de flexão mínima incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75.	61
Figura 62 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.	62

Figura 63 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.	62
Figura 64 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.	63
Figura 65 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.	63
Figura 66 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.	64
Figura 67 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.	64
Figura 68 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.	65
Figura 69 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.	65
Figura 70 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de elasticidade aproximado do concreto em função da resistência característica, considerando o granito como agregado graúdo.....	5
Tabela 2 – Dimensões de alguns dos perfis metálicos de seção W.....	9
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço estrutural padrão do software.	17
Tabela 4 – Propriedade mecânicas do concreto de acordo com a classe de resistência.	18
Tabela 5 – Flechas máximas nas vigas mistas obtidas por software, considerando a ligação perfeita, superfície submetida ao atrito e a flecha calculada.	32
Tabela 6 – Momentos resistentes e flechas máximas para cada caso de viga mista estudada.	44
Tabela 7 – Flechas máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.	50
Tabela 8 – Tensões de cisalhamento máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.....	55
Tabela 9 – Tensões de flexão máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.....	61
Tabela 10 – Tensões de flexão mínimas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
b	Largura da mesa colaborante de concreto
b_f	Largura da mesa do perfil metálico
C	Classe de resistência do concreto
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
CAD	Concreto de alto desempenho
d	Altura máxima do perfil metálico
E	Módulo de elasticidade do aço
E_c	Módulo de elasticidade reduzido do concreto
f_{ck}	Resistência à compressão característica do concreto
f_{tk}	Resistência à compressão do aço
f_{yk}	Resistência à tração
FIB	Fédération Internationale du Béton
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa
FLT	Flambagem lateral com torção
GPa	Giga Pascal
h	Altura da alma do perfil
I	Momento de inércia
J	Constante de torção da seção transversal
kg	Quilograma
L_b	Comprimento de
m	Metro
M^+	Tensão principal de flexão positiva (tensão de tração)
M^-	Tensão principal de flexão negativa (tensão de compressão)
M_{rd}	Momento resistente da viga
M_{sd}	Momento de cálculo incidente na viga
mm	Milímetro

MPa	Mega Pascal
KN	Quilo Newton
NBR	Norma Brasileira
r	Raio
r_x, r_x	Raio de giração da seção em relação ao eixo
t_f	Espessura da mesa do perfil metálico
t_h	Espessura da alma do perfil metálico
V	Tensão de cisalhamento
V_{rd}	Força cisalhante resistente da viga
V_{sd}	Força cisalhante de dimensionamento da viga
W	Módulo de resistência elástico da seção transversal
Z	Módulo de resistência plástica da seção transversal
y	distância vertical
β_{vm}	Coefficiente relacionado ao tipo de continuidade da viga
γ_{al}	Coefficiente de minoração do aço
γ_c	Coefficiente de minoração do concreto
γ_f	coeficiente de majoração das cargas
δ	Deformação
η_i	grau de interação da interface aço-concreto
λ	Parâmetro de esbeltez do perfil metálico
λ_p	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação do perfil
λ_r	Parâmetro de esbeltez correspondente ao limite de escoamento do perfil
v	Coefficiente de Poisson
ρ	Peso específico
σ_{MAX}^+	Tensão máxima de tração
σ_{MAX}^-	Tensão máxima de compressão
σ_{MIN}^+	Tensão mínima de tração
σ_{MIN}^-	Tensão mínima de compressão
σ_v	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Escopo do trabalho.....	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1	Estruturas de concreto.....	4
2.1.1	Caraterísticas estruturais.....	4
2.1.2	Propriedades do concreto.....	4
2.2	Estruturas alternativas.....	6
2.2.1	Estruturas mistas de aço e concreto.....	6
2.2.2	Viga mista de aço e concreto.....	7
2.2.3	Perfis metálicos.....	8
2.2.4	Conectores de cisalhamento	10
2.3	Análise numérica computacional.....	12
2.3.1	Método dos elementos finitos.....	12
2.3.2	Ansys Student	13
3	METODOLOGIA.....	15
3.1	Material.....	15
3.1.1	Definição do caso	15
3.1.2	Cadastro dos materiais.....	16
3.2	Método.....	18
3.2.1	Modelo de cálculo.....	18
3.2.2	Análise numérica	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
4.1	Validação do modelo com a viga metálica	25
4.1.1	Verificação manual.....	25
4.1.2	Análise numérica	25
4.2	Vigas mistas.....	27
4.2.1	Tensões	27
4.2.2	Deformações	31

5	CONCLUSÕES	34
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
7	ANEXOS	38
	ANEXO A – VERIFICAÇÃO DO PERFIL METÁLICO W 410 X 75.....	38
	ANEXO B – VERIFICAÇÃO DA VIGA MISTA COM PERFIL W 410 X 75.	41
	ANEXO C – RESULTADOS DA ANÁLISE COMPUTACIONAL NO ANSYS <i>STUDENT.</i>	45

1 INTRODUÇÃO

Baseado na disponibilidade de materiais e mão de obra, o sistema estrutural mais difundido no Brasil é o concreto armado, que une as propriedades do concreto e do aço de forma eficiente, garantindo dessa forma uma estrutura segura e econômica.

Nas últimas décadas, com a busca constante pelo aprimoramento dos materiais, necessidades diferentes e desenvolvimento de novos conceitos, vários outros sistemas construtivos foram desenvolvidos e popularizados, como é o exemplo das estruturas metálicas, alvenaria estrutural e estrutura mista de aço e concreto.

O concreto é um material que possui alta resistência à compressão que, por sua vez, é facilmente obtido através da dosagem dos seus componentes principais e uso de aditivos. Por outro lado, o aço é um material capaz de resistir bem aos esforços de tração e possui um controle de qualidade mais otimizado que o concreto.

Ao unir esses dois materiais, as desvantagens de cada um são compensadas pela qualidade do outro, o que torna as estruturas de concreto armado e mistas muito eficientes, mantendo um custo controlado.

Um sistema estrutural pode ser escolhido baseado em várias circunstâncias, como por exemplo a rapidez de execução, custo, disponibilidade da tecnologia na região, conceito arquitetônico e sustentabilidade.

O uso de estruturas mistas de concreto e aço se torna economicamente viável para edificações com cargas maiores, grandes vãos ou alturas elevadas, tais quais pontes ou edifícios de multipavimentos. Nessas situações, o uso de concreto armado pode se tornar menos indicado, por necessitar de elementos estruturais com seções transversais robustas, aumentando o consumo de material, produtividade da obra, e geração de ruídos e resíduos.

As estruturas mistas apresentam-se, com menores seções transversais, com maiores vãos, redução na quantidade de pilares e fundações menos solicitadas. Os elementos estruturais são fabricados fora do canteiro de obras, reduzindo desperdícios e garantindo desempenho e segurança. Por consequência, a obra se torna mais organizada e produtiva com uma necessidade menor de fabricar elementos estruturais *in loco*.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para desenvolver estruturas cada vez mais otimizadas às necessidades atuais, é essencial investigar o comportamento estrutural dos sistemas construtivos e otimizar o uso dos materiais empregados, de modo que a estrutura final seja mais econômica, segura e eficiente.

Uma técnica de estudo do comportamento das estruturas é a análise numérica computacional, que, com o auxílio de programas de simulação computacional, permite aplicar o método dos elementos finitos e realizar uma análise mais detalhada em tempo hábil, sem a necessidade de custear experimentos em laboratório.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

O foco do presente estudo consiste em analisar numericamente, com o auxílio do software *Ansys Student*, uma viga mista de aço e concreto em diferentes classes de resistência (25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 MPa).

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Verificar a resistência das vigas de acordo com a norma vigente;
- Comparar as tensões principais despertadas nas vigas com a resistência limite dos materiais;
- Verificar a influência do aumento na resistência do concreto presente na viga mista;
- Avaliar as deformações ocorridas na viga;
- Avaliar as tensões de cisalhamento nos conectores tipo *stud bolt*; e
- Avaliar o desempenho da análise computacional proposta.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e três anexos. No presente capítulo, encontram-se a motivação e os objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo trata brevemente sobre estruturas de concreto e suas propriedades, características das estruturas mistas de aço e concreto, e análise numérica computacional.

O terceiro capítulo apresenta as considerações sobre o modelo numérico, indicando as características dos materiais empregados, propriedades geométricas, condições de apoio e carregamento, e as configurações de malha e cálculo.

O quarto capítulo aborda as discussões acerca dos resultados obtidos no software *Ansys student* e comparações com os resultados obtidos através dos cálculos normatizados.

O quinto capítulo trata sobre as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

O Anexo A apresenta o dimensionamento do perfil metálico de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

O Anexo B apresenta o dimensionamento da viga mista de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

O Anexo C apresenta os resultados de tensões principais e deformações obtidos no software *Ansys student*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO

O tipo mais comum de sistema empregado nas estruturas atuais é o concreto armado, composto de uma armadura de aço envolvido por uma massa de concreto. É um sistema construtivo bastante artesanal no qual, à medida que os projetos maiores e mais complexos, requisitam peças mais robustas, o que acarreta maior consumo de materiais e mão de obra, tornando a estrutura economicamente inviável.

2.1.1 *Caraterísticas estruturais*

Existem aplicações em que estruturas de aço são imbatíveis do ponto de vista econômico, porém as estruturas de concreto são aplicadas em diversas situações, como, por exemplo, as pontes, barragens, galpões e mesmo que a estrutura principal do edifício não seja de concreto, algum elemento dela será. (Pinheiro, 2005).

Carvalho (2009) aponta que as principais desvantagens apresentadas pelas estruturas de concreto são a necessidade de um sistema de formas e escoramento para a sua fabricação. A estrutura pronta apresenta boa condutividade térmica e sonora, peso específico elevado, quando se compara a estrutura metálica, por exemplo, e sua constituição reduz as possibilidades de reformas e adaptações do *layout* arquitetônico.

2.1.2 *Propriedades do concreto*

A evolução tecnológica requisitou um melhor desempenho das estruturas de concreto, referente ao cálculo estrutural e a qualidade dos materiais componentes do concreto, elevando a resistência à compressão. O uso de aditivos e técnicas diferenciadas são recursos desenvolvidos que permitem a aplicação de estruturas em concreto armado para qualquer tipo de projeto. (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

O concreto é uma constituição de agregado graúdo imerso em uma matriz rígida de argamassa. Segundo Fusco (2008), os concretos de baixa e média resistência (até 40MPa) possuem um mecanismo diferente para a ruptura do concreto quando comparado aos de alto desempenho (CAD), com resistência maior ou igual a 50 MPa.

O CAD tem a capacidade de atingir maiores resistências por trabalhar com o melhor preenchimento dos vazios, aumentando a densidade da peça e conseqüentemente, a durabilidade, resistência e a redução da permeabilidade. (Barata, 1998).

O módulo de elasticidade é uma das propriedades diretamente ligadas a capacidade de resistência do concreto, visto que tal propriedade é diretamente proporcional à rigidez da peça

(Tutikian; Isaia; Helene, 2011). A Tabela 1 apresenta o módulo de elasticidade aproximado do concreto para cada classe de resistência dos concretos de baixa até alta resistência, de acordo com o estabelecido na norma ABNT NBR 6118:2014.

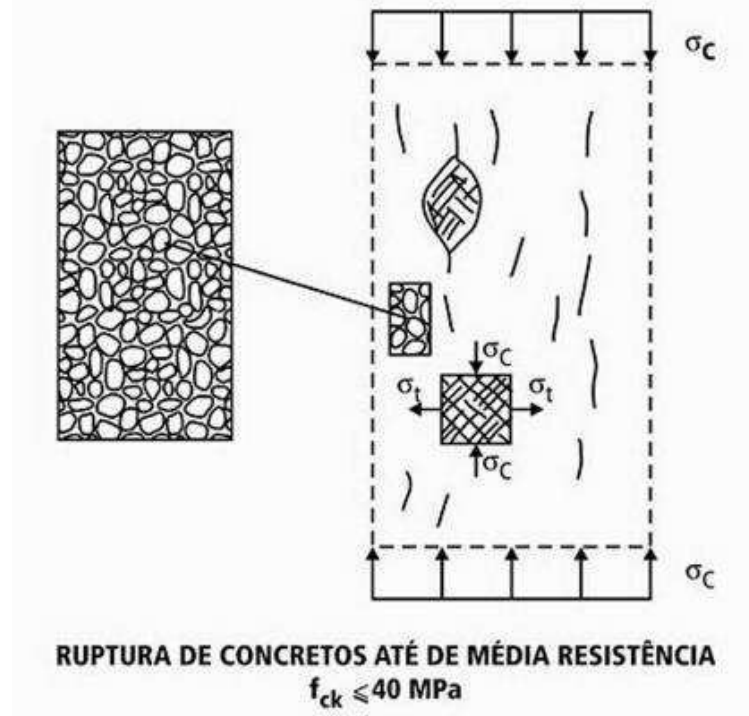
Tabela 1 – Módulo de elasticidade aproximado do concreto em função da resistência característica, considerando o granito como agregado graúdo.

CLASSE	E_c (GPa)
C25	28
C30	31
C35	33
C40	35
C45	38
C50	40
C60	42
C70	43
C80	45
C90	47

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Ainda segundo Fusco (2008), para os concretos de baixa e média resistência, a ruptura do concreto ocorre por tração da argamassa na microestrutura, gerando microfissuras na direção da aplicação das cargas de compressão (Figura 1), enquanto no CAD, a argamassa é o componente mais resistente, tornando o concreto um elemento mais frágil, passando a fraturar de forma explosiva quando submetido a situação de ruptura.

Figura 1 – Fissuração do concreto com resistência até 40MPa.



Fonte: Fusco, 2008.

Dado esse comportamento de ruptura do CAD, é necessário ter uma preocupação maior com a armadura utilizada, para que se garanta uma ruptura dúctil do elemento estrutural. Desse modo, o CAD é aplicado para situações mais específicas, nas quais é necessário reduzir o volume dos elementos estruturais, peso próprio ou atender uma demanda arquitetônica específica. (Lima, 1997).

2.2 ESTRUTURAS ALTERNATIVAS

Em busca de alternativas para tornar as estruturas mais econômicas, compactas e eficientes, foram popularizados outros sistemas estruturais, a exemplo das estruturas metálicas, alvenaria estrutural, madeira, estrutura mista e etc.

2.2.1 Estruturas mistas de aço e concreto

Dentre esses sistemas alternativos, a estrutura mista de aço e concreto alia as características benéficas da estrutura de concreto e da estrutura de aço. Souza (2014) aponta que uma estrutura mista de aço e concreto é aquela na qual um perfil metálico trabalha em conjunto com o concreto, através do atrito ou aderência, compondo um elemento único.

De acordo com Takata (2017), a estrutura mista é atrativa para situações que requerem vão médios e altos, que necessitam de execução rápida e uma estrutura de peso total reduzido.

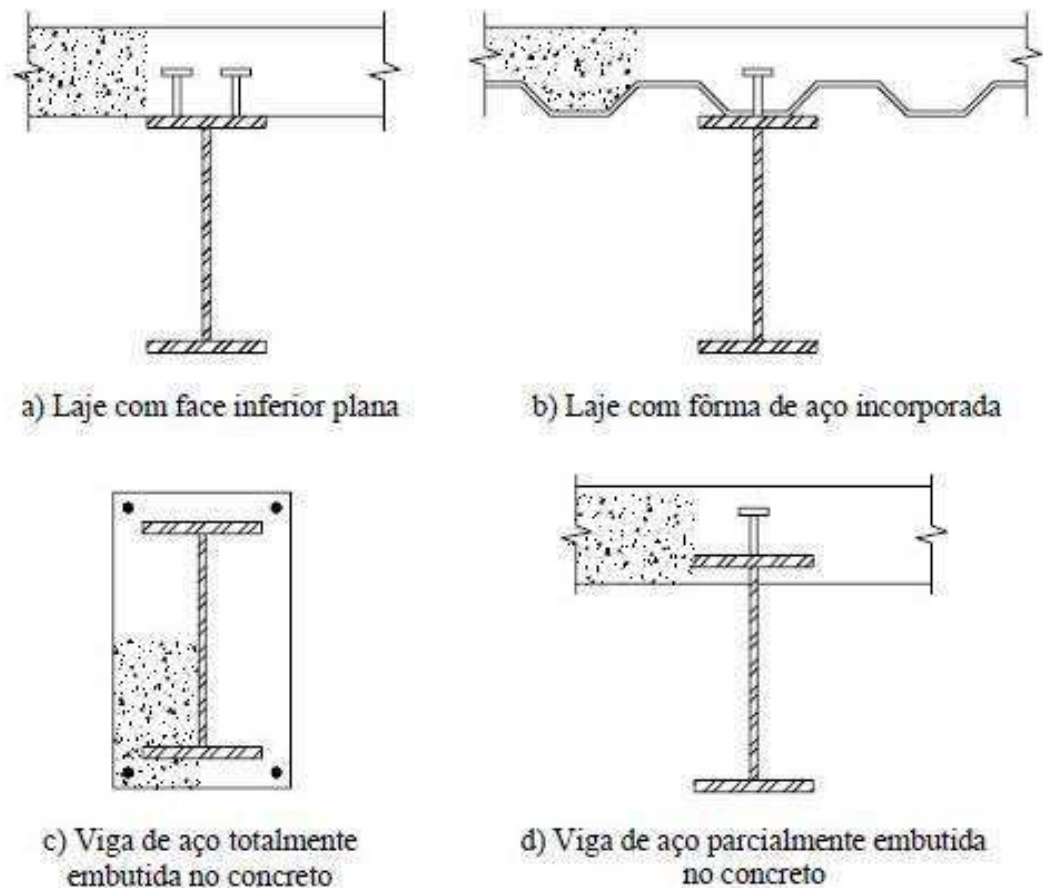
As vantagens de se utilizar a estrutura mista, em comparação com as estruturas de concreto e, também, as de aço, estão em dispensar a necessidade de formas e escoramento (dependendo do tipo de viga), e, por haver a contribuição do concreto no desempenho estrutural da viga, há uma redução do consumo de aço. (Dias, 2014).

2.2.2 Viga mista de aço e concreto

De acordo com Lopes (2012), uma viga mista é composta de um perfil de aço e uma laje de concreto acima ligados por um conector de cisalhamento. Sem a presença do conector, o aço e o concreto deformam-se independentes entre si, gerando uma superfície de deslizamento.

No sistema de viga mista, a laje de concreto pode ser moldada in loco, pré-moldada ou com forma de aço, com várias configurações de seção transversal, como mostra a Figura 2. (Oliveira, 2018).

Figura 2 – Tipos de viga mista de aço e concreto.



Fonte: Malite (1990 *apud* Oliveira, 2018).

De acordo com Nelsen (2013), o uso da protensão em vigas mistas de aço e concreto também foi estudado nas últimas décadas, visando amplificar a capacidade resistente da viga,

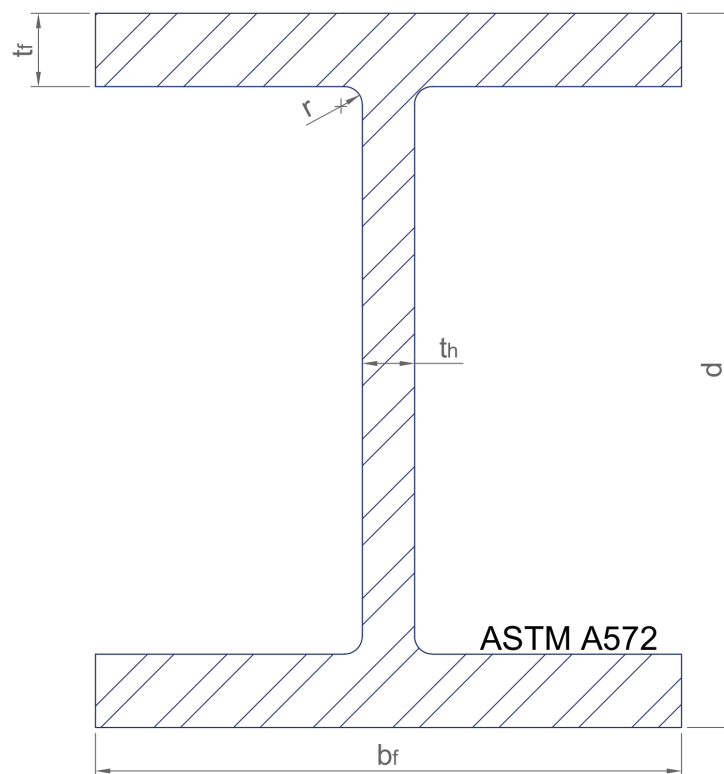
redução das deformações e fissurações. Os estudos indicam que o melhor local para o posicionamento dos cabos é abaixo da mesa inferior que está sendo tracionada.

Utilizar a laje com forma de aço incorporada (*steel deck*) se torna vantajoso para prédios altos por acelerar a execução da obra, visto que as chapas possuem controle de qualidade rigoroso e peso reduzido, facilitando o transporte. Além disso, as chapas possuem resistência suficiente para servir como plataforma de trabalho e receber o concreto ainda no estado fresco, eliminando a necessidade de escoramento no processo construtivo. (Saúde *et al.*, 2015).

2.2.3 Perfis metálicos

Para a utilização de estruturas metálicas, são comumente empregados três tipos de perfil: U, U enrijecido e I. O perfil I, cuja seção transversal é representada pela Figura 3, é o mais utilizado para peças como vigas, pilares e estacas cravadas.

Figura 3 – Seção transversal genérica, perfil I Gerdau Açominas.



Fonte: Autor, 2021.

As dimensões de alguns dos perfis I, padronizados pela fabricante Gerdau Açominas, podem ser observadas na Tabela 2 para os respectivos perfis metálicos utilizados neste trabalho. A formulação dos nomes do perfil já fornece algumas informações, o primeiro valor remete à

altura aproximada do perfil e o segundo número representa o peso linear da peça, que é frequentemente comercializada em unidades de 12 metros.

Tabela 2 – Dimensões de alguns dos perfis metálicos de seção W.

PERFIL	Peso Linear (Kg/m)	d (mm)	b_f (mm)	t_h (mm)	t_f (mm)	r (mm)
W 310 X 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	5,5
W 310 X 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	6,5
W 310 X 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	9,0
W 310 X 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	11,0
W 310 X 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	9,5
W 310 X 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	11,0
W 310 X 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	13,0
W 360 X 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	8,5
W 360 X 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	10,5
W 360 X 44,0	44,0	352	171	6,9	9,8	10,0
W 360 X 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	11,5
W 360 X 57,8	57,8	358	172	7,9	13,1	13,0
W 360 X 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	13,5
W 360 X 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	15,0
W 360 X 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	17,0
W 410 X 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	9,0
W 410 X 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	11,0
W 410 X 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	11,0
W 410 X 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	13,0
W 410 X 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	14,5
W 410 X 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	16,0
W 410 X 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	18,0
W 460 X 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	11,0
W 460 X 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	13,5
W 460 X 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	15,5
W 460 X 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	14,5
W 460 X 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	16,0
W 460 X 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	17,5
W 460 X 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	19,0
W 460 X 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	20,5
W 530 X 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	11,5
W 530 X 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	11,0
W 530 X 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	13,5
W 530 X 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	13,5
W 530 X 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	16,5
W 530 X 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	15,5
W 530 X 101,0	101,0	537	210	10,9	17,4	17,5
W 530 X 109,0	109,0	539	211	11,6	18,8	19,0
W 610 X 101,0	101,0	603	228	10,5	14,9	15,0

W 610 X 113,0	113,0	608	228	11,2	17,3	17,5
W 610 X 125,0	125,0	612	229	11,9	19,6	19,5
W 610 X 140,0	140,0	617	230	13,1	22,2	22,0
W 610 X 155,0	155,0	611	324	12,7	19,0	19,0
W 610 X 174,0	174,0	616	325	14,0	21,6	21,5

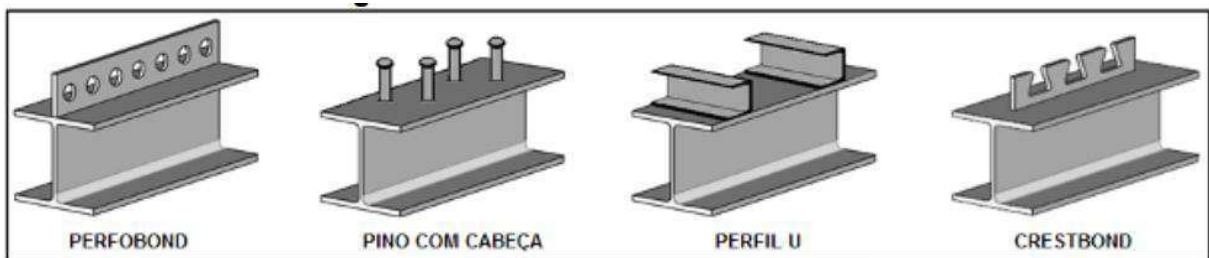
Fonte: Gerdau Açominas, 2021.

2.2.4 Conectores de cisalhamento

Silva (2018) afirma que aço e concreto não possuem aderência suficiente na região de contato para que seja possível haver um trabalho em conjunto dos dois elementos. Dessa forma, para garantir que a viga mista funcione como um elemento único, é necessário que haja algum artifício promovendo aderência suficiente nessa zona de contato.

Existem vários tipos de conectores, assim como exposto na Figura 4, alguns deles são o *stud bolt* (pino com cabeça), perfil U laminado, perfobond, barras de aço, e adesivos. A ABNT NBR 8800:2008 define as características para os do tipo *stud bolt* e perfil U laminado.

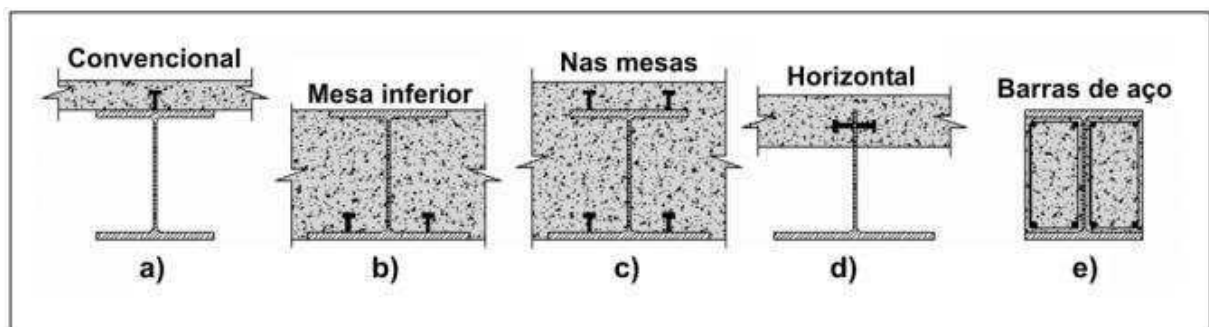
Figura 4 – Tipos de conectores de cisalhamento.



Fonte: Souza, 2012.

Outra variável para os conectores de cisalhamento é o seu posicionamento, a Figura 5 demonstra que, dependendo da configuração da viga mista, existem locais diferentes para o posicionamento dos conectores de cisalhamento.

Figura 5 – Posicionamento de conectores de cisalhamento.



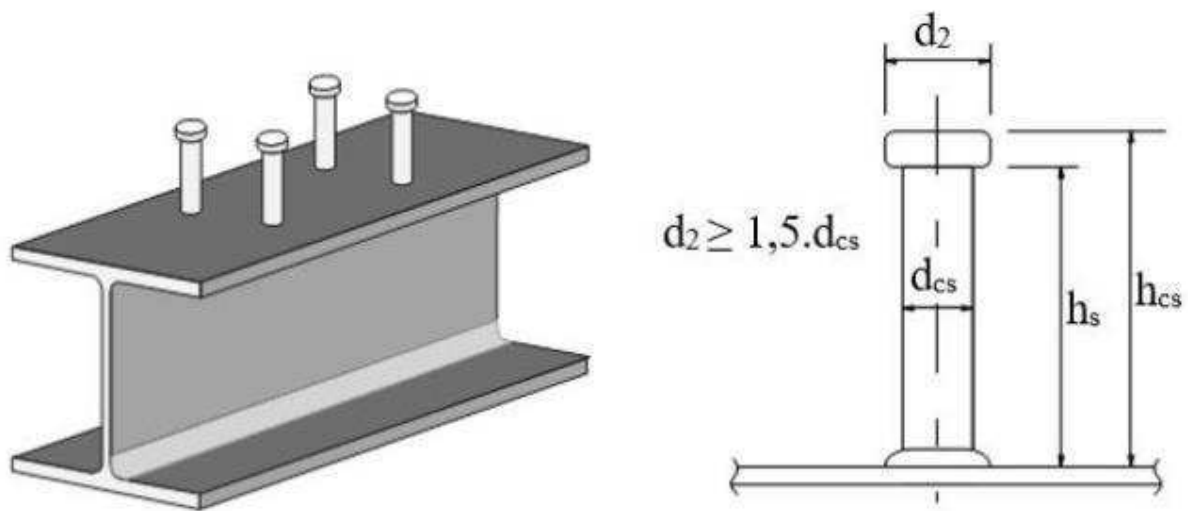
Fonte: De Nardin e El Debs, 2008.

De Nardin e El Debs (2008) estudaram a influência do posicionamento dos conectores do tipo *stud bolt* e constataram que os conectores incrementam a resistência à flexão e reduzem

o escorregamento da interface aço-concreto. Também foi observado que posicionar os conectores verticalmente na mesa inferior do perfil de aço conferiu os melhores resultados, porém, esse posicionamento não apresenta valores muito distantes de outras configurações.

Barbosa (2016) aponta o conector *stud bolt* como sendo o mais utilizado nas estruturas mistas do Brasil, um conector flexível com alta velocidade de soldagem com a pistola de solda apropriada e boa ancoragem no concreto. A Figura 6 mostra os detalhes de dimensão padronizados para o conector.

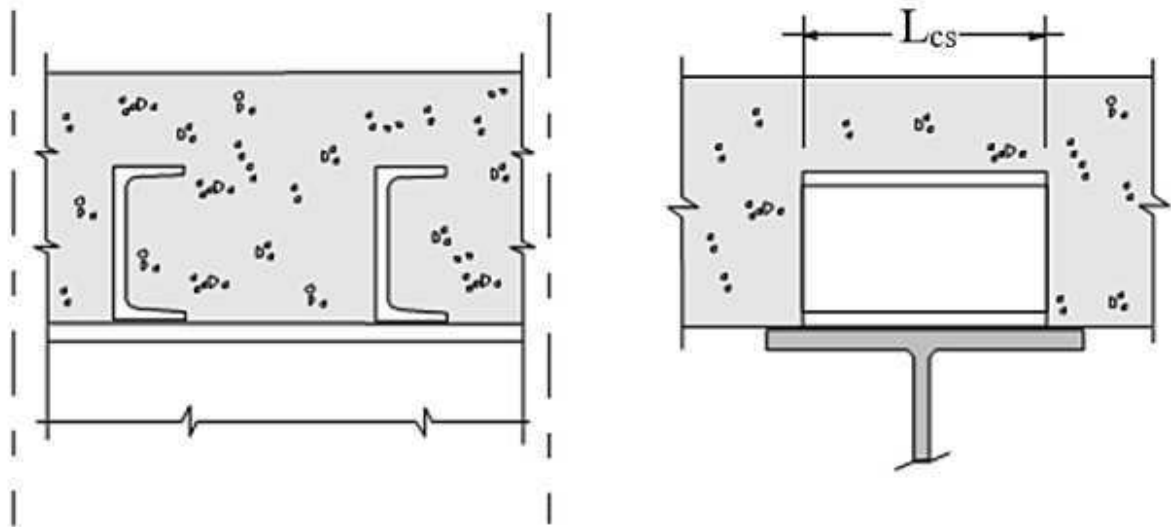
Figura 6 – Detalhes geométricos do conector *stud bolt*.



Fonte: Verissimo (2007 *apud* Barbosa, 2016).

O conector de perfil U também é do tipo flexível, o plano da alma é posicionado perpendicular à direção longitudinal da viga, como exemplificado na Figura 7. Por ter uma maior área de contato, é capaz de distribuir melhor as tensões presentes no concreto, porém muitas vezes a mesa da viga não possui largura suficiente para comportar o conector requisitado e sua fabricação demanda um trabalho mais demorado que o conector de pino. (Cavalcante, 2010).

Figura 7 – Detalhes do conector de perfil U.



Fonte: Verissimo (2007 *apud* Barbosa, 2016).

2.3 ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Historicamente, para aumentar a precisão das análises estruturais, foi-se requisitando uma maior complexidade de cálculo que se torna impraticável de ser realizado manualmente. Dessa forma, o ambiente computacional ofereceu uma alternativa eficiente e econômica para analisar estruturas, reduzindo a quantidade de experimentos físicos executados.

2.3.1 Método dos elementos finitos

Uma das formas mais difundidas de análise computacional é o método dos elementos finitos. Nesse método, a peça de geometria qualquer é dividida em uma malha de elementos, quanto menor o elemento, mais preciso será o resultado da análise e exigirá maior capacidade de processamento. (Petrauski, 2016).

O método dos elementos finitos é utilizado desde a década de 50 para analisar problemas sem solução definida, visto que a divisão dos elementos será feita de modo que o comportamento individual deles seja conhecido. (Lazzari, 2016).

Segundo Souza (2012), o método dos elementos finitos é a técnica mais completa para a análise estrutural, desenvolvendo soluções aproximadas que são obtidas através da interpolação de várias equações diferenciais descritas no modelo numérico. Também é possível obter equações algébricas ajustadas a estrutura e que são aproximadas das equações diferenciais.

Marinho, Vaz e Pimentel (2002) apontam, resumidamente, que o método dos elementos finitos se desenvolve a partir do princípio dos deslocamentos virtuais, igualando o trabalho virtual interno ao trabalho virtual externo, resultando na seguinte expressão:

$$\delta^1 W = \int_V \delta u^t b \, dv + \int_{S_f} \delta u^t f \, ds_f + \int_V u^t m \ddot{u} \, dv \quad 2.1$$

Sendo:

$\delta^1 W$ = primeira variação do trabalho virtual externo;

δu = vetor de deslocamentos virtuais;

b = vetor de força de volume real;

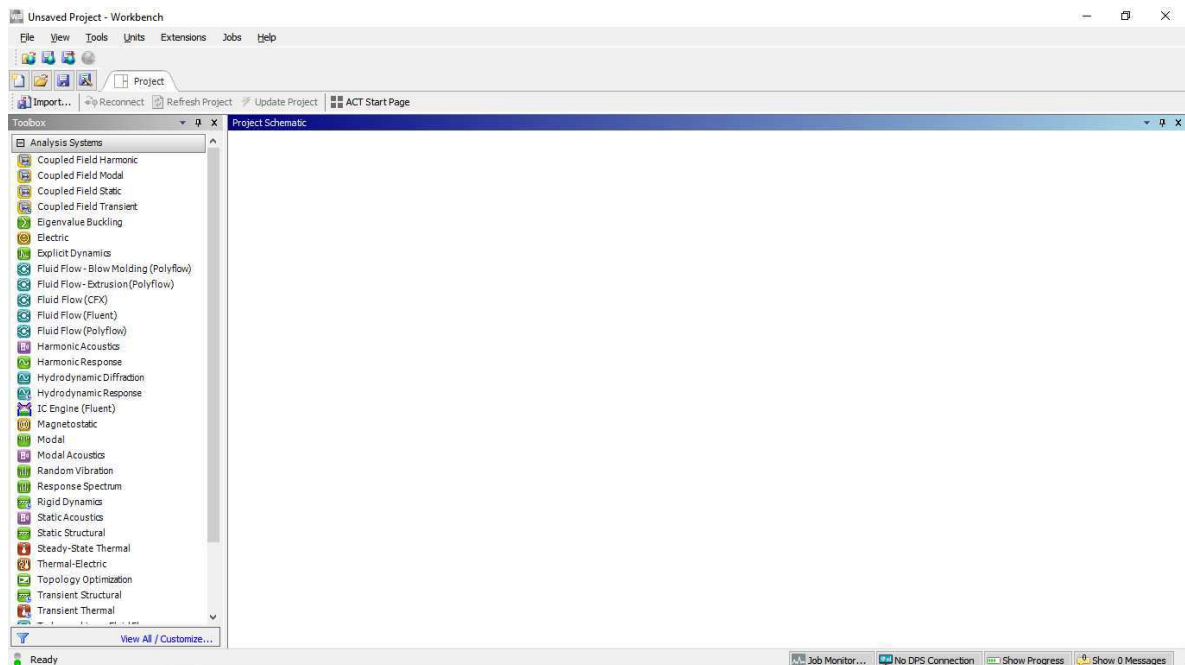
f = vetor de superfície real;

$m \ddot{u}$ = vetor de força de inércia, onde m representa a matriz de densidade de massa e \ddot{u} é o vetor das acelerações.

2.3.2 Ansys Student

Dentre os mais diversos softwares desenvolvidos para realizar a modelagem computacional através do método dos elementos finitos, o *Ansys* (Figura 8) é um dos softwares mais conhecidos no meio acadêmico. Com o software *Ansys*, é possível aferir informações de várias naturezas, como por exemplo, tensões e deformações, modos de vibração, análise estática linear e não linear. (Vieira, 2016).

Figura 8 – Interface do *Ansys Student*.



Fonte: Ansys, 2021.

O programa Ansys possui dois tipos de interface, a primeira delas, *Ansys Parametric Design Language*, é uma interface clássica com mais controle por parte do usuário, possibilitando realizar o controle via linguagem de programação e inserir dados com arquivos

de texto. (Lazzari, 2016). Já a interface *Workbench* possui uma abordagem mais interativa entre software e usuário, possibilitando uma melhor adaptação ao uso e aprendizado intuitivo.

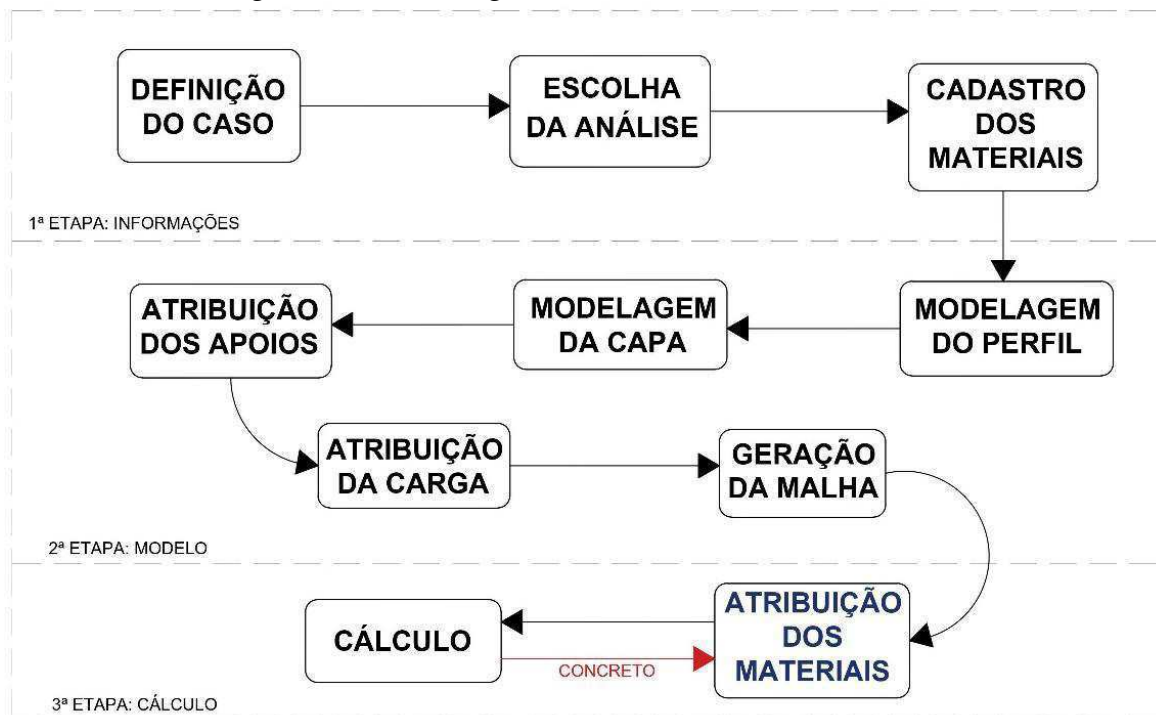
Por ser uma versão educacional para aplicações acadêmicas, o software estabelece um limite de processamento para o projeto, reduzindo a quantidade permitida de elementos calculados na malha gerada. Essa limitação pode ser um fator influente na precisão da análise de estruturas de grandes dimensões.

3 METODOLOGIA

Para atender aos objetivos do presente trabalho, foi definida uma metodologia composta por 3 etapas, as quais são: definição das informações de projeto, confecção do modelo para cálculo e análise numérica computacional. Para auxiliar o desenvolvimento do modelo de teste e sua posterior análise, optou-se por utilizar o software de acesso livre *Ansys Student*. Também foi realizada a verificação manual da viga metálica e das vigas mistas, de acordo com o estabelecido na ABNT NBR 8800:2008.

A Figura 9 detalha os componentes de cada etapa definida para a metodologia de execução do estudo.

Figura 9 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor, 2021.

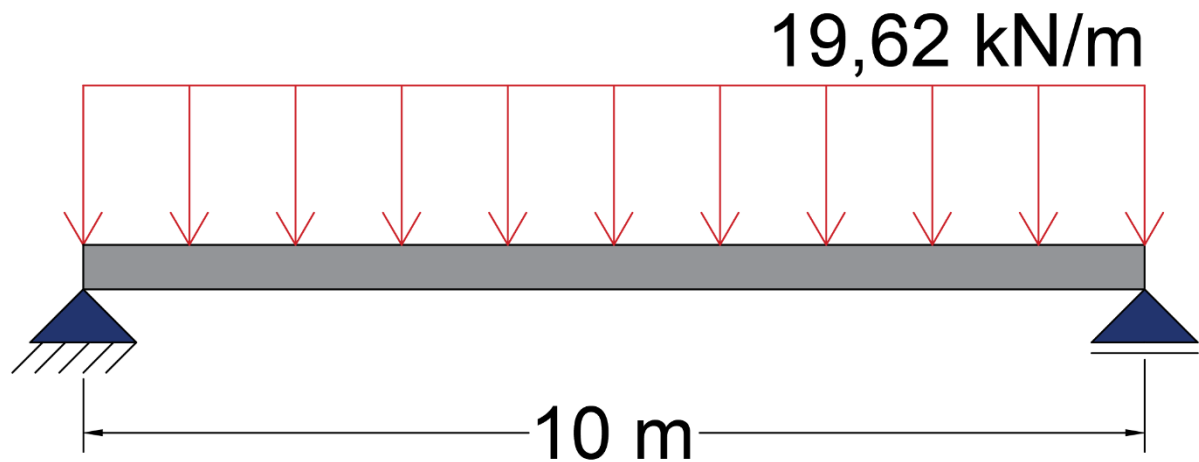
3.1 MATERIAL

3.1.1 Definição do caso

A primeira etapa do estudo consistiu em definir o caso a ser estudado. Para tornar o comportamento da estrutura mais previsível, buscou-se analisar uma viga de forma isolada com carregamento linear permanente e vão elevado.

A Figura 10 ilustra as variáveis constantes determinadas para o estudo da viga. A viga é do tipo biapoiada com vão livre de dez metros de comprimento e submetida ao peso próprio e carregamento adicional de 19,62 kN/m.

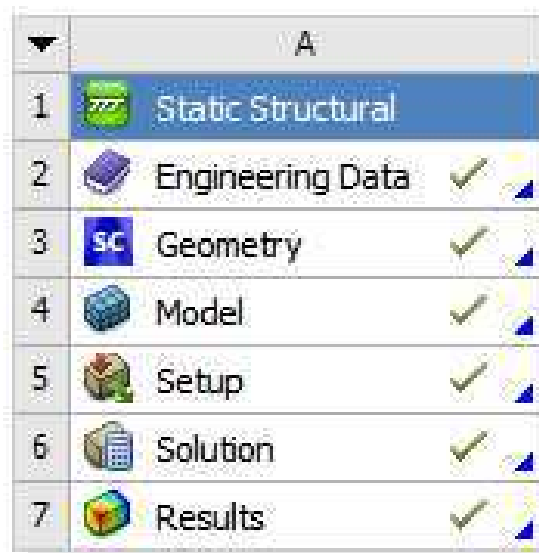
Figura 10 – Esquema da viga estudada.



Fonte: Autor, 2021.

As condições acima foram estabelecidas visando a liberdade de deformação da viga e uma situação de carregamento simples, porém elevada, que requer uma estrutura robusta para o suporte das cargas. Visto que a viga é submetida à flexão simples e com o objetivo de obter as tensões e deformações despertadas na viga proposta, foi escolhido o tipo de análise estática estrutural (*Static Structural*), cujo painel de recursos pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Aplicações disponíveis da análise estática.



Fonte: Autor, 2021.

3.1.2 Cadastro dos materiais

Na seção *Engineering Data* foram selecionados os materiais a serem utilizados como referência na análise (Figura 12). O aço utilizado foi o *Structural Steel*, já presente na própria

biblioteca do software (Tabela 3), por possuir as propriedades semelhantes ao aço estrutural ASTM A36, diferente do ASTM A572, utilizado pela Gerdau Açominas, que possui tensão de escoamento de 350 MPa.

Figura 12 – Materiais cadastrados no software para a análise.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Concrete 25MPA				Concrete de fck 25 MPA
4	Concrete 30MPA				Concrete de fck 30 MPA
5	Concrete 35MPA				Concrete de fck 35 MPA
6	Concrete 40MPA				Concrete de fck 40 MPA
7	Concrete 50MPA				Concrete de fck 50 MPA
8	Concrete 60MPA				Concrete de fck 60 MPA
9	Concrete 70MPA				Concrete de fck 70 MPA
10	Concrete 80MPA				Concrete de fck 80 MPA
11	Concrete 90MPA				Concrete de fck 90 MPA
12	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço estrutural padrão do software.

ρ	7850 kg/m ³
E	200 GPa
v	0,3
f_{yk}	250 MPa
f_{tk}	250 MPa

Fonte: Ansys, 2021.

O concreto foi cadastrado com os dados de resistência específicos de cada classe e módulos de elasticidade fornecidos pela ABNT NBR 6118:2014, compondo a Tabela 4. Embora a mesa colaborante da viga mista esteja completamente submetido à compressão, a tensão de tração para o concreto (f_{yk}) foi estimada em 10% da tensão de compressão (f_{ck}).

Tabela 4 – Propriedade mecânicas do concreto de acordo com a classe de resistência.

	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80	C90
ρ	2500 kg/m ³								
E_C	28 GPa	31 GPa	33 GPa	35 GPa	40 GPa	42 GPa	43 GPa	45 GPa	47 GPa
ν	0,18								
f_{yk}	2,5 MPa	3 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa	7 MPa	8 MPa	9 MPa
f_{ck}	25 MPa	30 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa

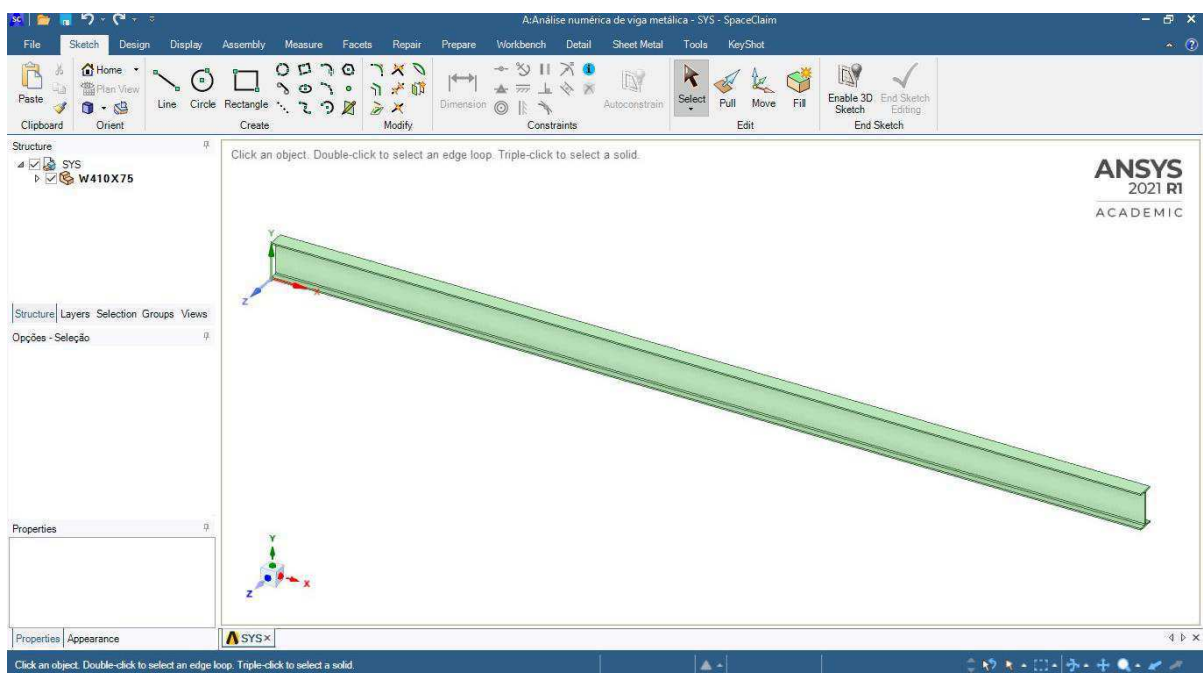
Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Modelo de cálculo

Para a segunda etapa, foram modelados os dois tipos de viga na seção *Geometry*. O processo consistiu em desenhar a seção transversal do perfil W 410 X 75, conforme as dimensões estabelecidas na Tabela 2. Com o comando *pull*, foi determinada a extensão da peça metálica, podendo ser conferido o resultado final da modelagem 3D na Figura 13.

Figura 13 – Modelagem 3D do perfil metálico W 410 X 75.

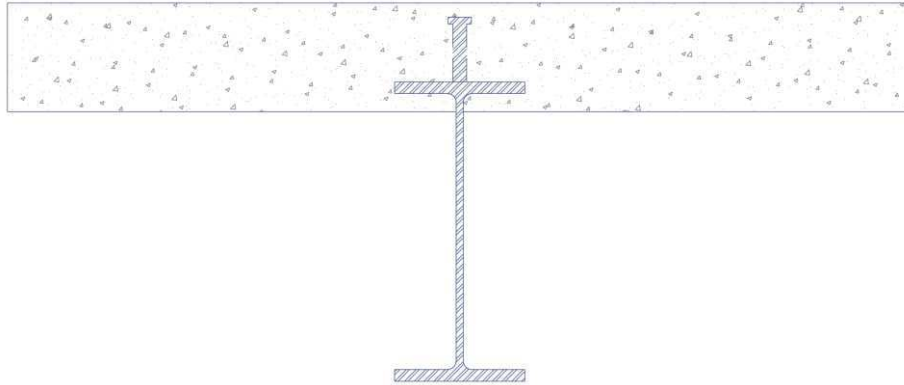


Fonte: Autor, 2021.

Já para a modelagem da viga mista, optou-se por utilizar a viga de aço parcialmente embutida na laje maciça, conforme o item (d) da Figura 2. De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, a largura efetiva da mesa colaborante é equivalente à 1/8 do vão da viga, dessa

forma foi modelada uma laje maciça com largura de 125 cm, espessura de 15cm e 4,1 cm de penetração no perfil metálico (Figura 14).

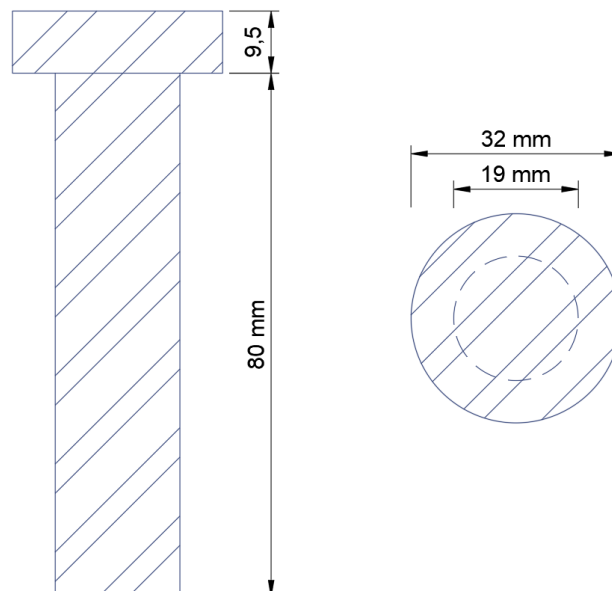
Figura 14 – Seção transversal da viga mista modelada para a verificação.



Fonte: Autor, 2021.

Também, foi determinado o uso do conector tipo *stud bolt* com diâmetro de 19 mm, aço ASTM A36 e posicionado acima da mesa superior do perfil em fila única, contendo 15 conectores com espaçamento de 70 cm, entre eixos. As propriedades geométricas do conector *stud bolt* atribuído podem ser observadas na Figura 15.

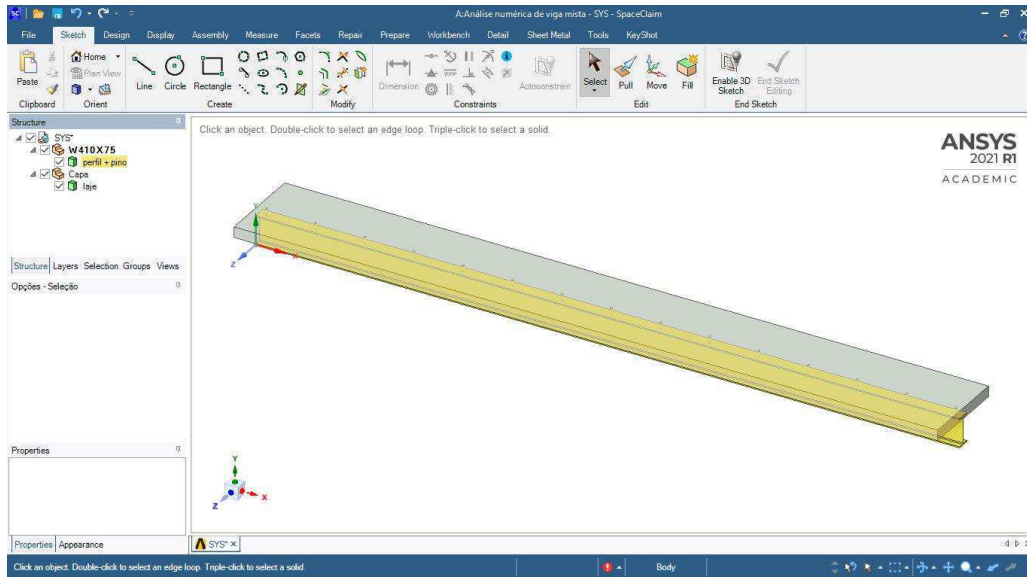
Figura 15 – Dimensões do conector de cisalhamento STUD BOLT - 3/4X3.1/8" (19 X 80 mm).



Fonte: Walsywa, 2020.

A modelagem final da viga mista parcialmente embutida com conectores de cisalhamento *stud bolt* fixado na mesa superior do perfil pode ser observada a partir da Figura 16.

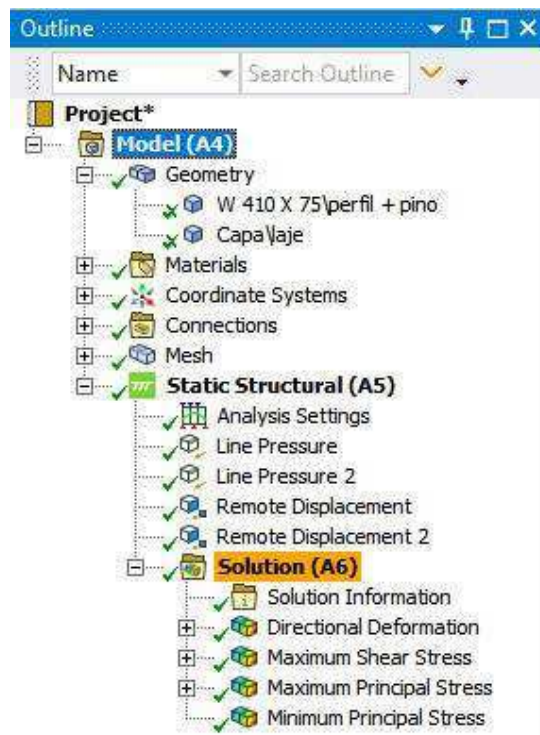
Figura 16 – Modelagem 3D da viga mista parcialmente embutida.



Fonte: Autor, 2021.

Passando para a seção *Model*, na Figura 17 estão listados os recursos manipuláveis da viga.

Figura 17 – Hierarquia de recursos da seção *Model*.



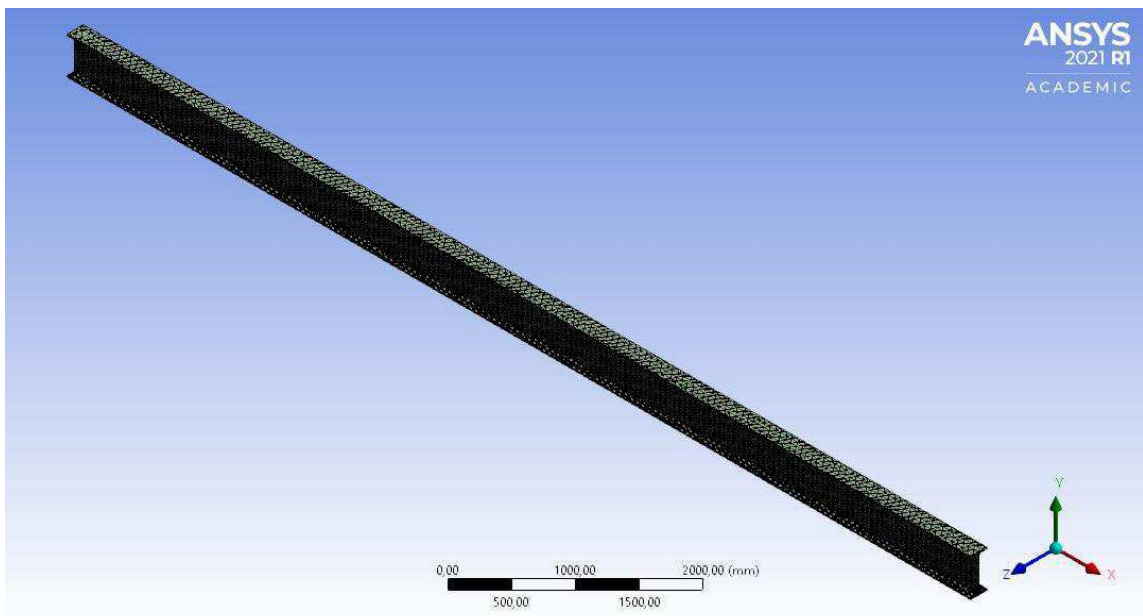
Fonte: Autor, 2021.

Os dados dos materiais e geometrias elaborados anteriormente são inseridos automaticamente nessa nova etapa que consiste em definir o comportamento das geometrias geradas, condições de apoio e cargas aplicadas.

Na geometria referente ao perfil metálico foi atribuído o material *Structural Steel*, já mencionado anteriormente, enquanto na mesa colaborante foi atribuído o concreto, variando entre todas as classes de resistência cadastradas. Tanto para o aço quanto para o concreto, foi habilitado o recurso de comportamento não linear da peça.

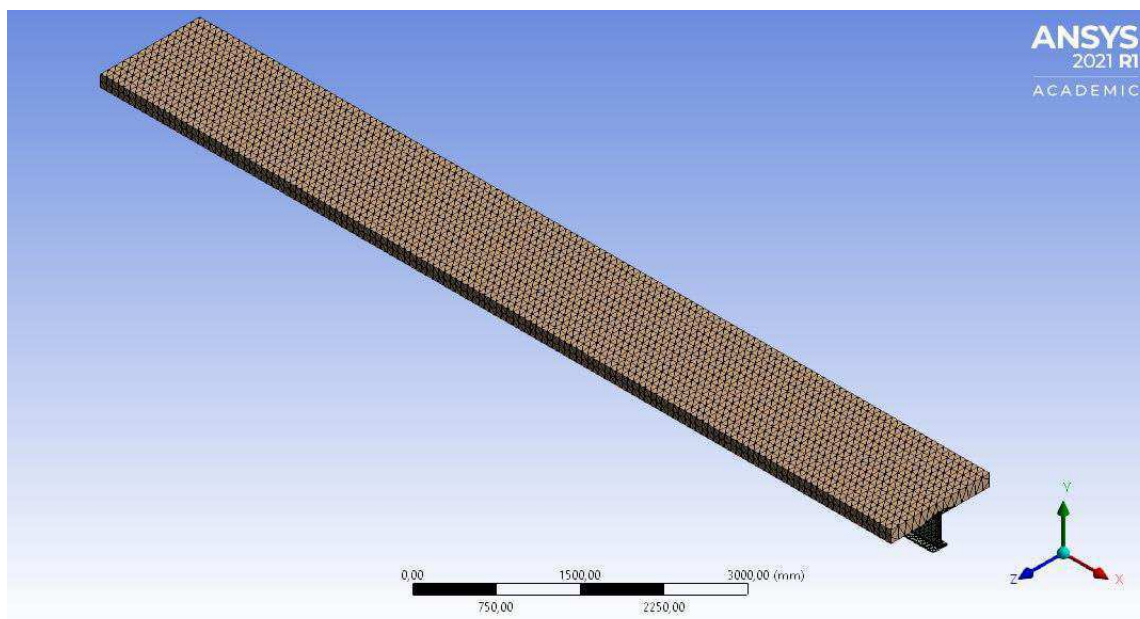
No item *mesh*, a malha foi gerada a partir do estilo *Use Geometry Setting*, com a menor dimensão do elemento permitida pela licença de estudante do software, que limita o número de elementos finitos, obtendo 67.162 elementos para a viga metálica e 62.031 elementos para a viga mista. Nas Figuras 18 e 19, estão representadas as malhas geradas para a viga metálica e para a viga mista de aço e concreto, respectivamente.

Figura 18 – Malha gerada para o perfil metálico W 410 X 75.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 19 – Malha gerada para a viga mista de aço e concreto.



Fonte: Autor, 2021.

Para configurar o refinamento da malha, por limitações na capacidade de processamento e uso de grande quantidade de elementos, foram atribuídos dois laços de repetição, a partir dos itens *Max refinement loops* e *Refinement depth*.

A superfície de contato entre aço e concreto foi gerada de forma automática e adequadamente pelo programa e foi definido o comportamento do tipo *bonded*, ou seja, considerando uma ligação perfeita entre aço e concreto. Posteriormente, a superfície de contato teve seu comportamento modificado para *frictional*, com o intuito de permitir o deslizamento dos materiais e analisar, de forma mais adequada, as tensões nos conectores de cisalhamento e deformações máximas.

Para definir os apoios da viga, foram aplicados dois *Remote Displacements* na aresta inferior da mesa inferior do perfil metálico. Os apoios foram aplicados na base do perfil metálico, controlando a liberdade de deslocamento e rotação nas três direções, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Configuração dos apoios de primeiro gênero (à esquerda) e segundo gênero (à direita).

Definition	
Type	Remote Displacement
X Component	Free
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation X	0, ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Y	0, ° (ramped)
Rotation Z	Free

Definition	
Type	Remote Displacement
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation X	0, ° (ramped)
<input type="checkbox"/> Rotation Y	0, ° (ramped)
Rotation Z	Free

Fonte: Autor, 2021.

A carga linear de 19,62 kN/m, foi aplicada a partir do recurso de *line pressure*, que aplica a carga definida em uma aresta da geometria. A carga foi aplicada no plano vertical do centroide da viga, para evitar excentricidades na peça.

3.2.2 Análise numérica

Para o cálculo do software, foram escolhidos quatro tipos de resultados: *directional deformation*, *maximum shear stress*, *maximum principal stress* e *minimum principal stress*. Todos os resultados apresentam um gráfico de cores para a análise visual, bem como os valores máximos e mínimos obtidos na análise.

O *directional deformation* foi configurado para fornecer a deformação da viga na direção y (altura), obtendo a flecha resultante. A unidade de medida utilizada na representação do resultado é o milímetro.

O *maximum shear stress* fornece o resultado de tensão de cisalhamento despertado na peça. O *maximum principal stress* fornece os resultados de tensão máxima à flexão da viga e o *minimum principal stress* fornece os resultados de tensão mínima, tendo os valores positivos associados à tração na peça e os valores negativos referentes à compressão. A unidade de medida utilizada para esses resultados é o Mega Pascal.

Para a obtenção dos resultados da análise numérica, foi executado o processo de mudança da resistência da mesa colaborante na viga mista, a fim de verificar o comportamento da viga com os concretos de desempenho comum (C25, 30, C35 e 40) e concretos de alto desempenho (C50, C60, C70, C80 e C90), totalizando nove casos observados para a viga mista e um caso da viga metálica.

Para comparar e validar os resultados obtidos na análise computacional do Ansys student, foi realizado o cálculo manual de verificação da resistência da viga metálica, de acordo com o Anexo G, e da viga mista, de acordo com o Anexo O da ABNT NBR 8800:2008.

Todos os dados obtidos na análise numérica computacional e o detalhamento dos cálculos manuais foram armazenados em anexo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO COM A VIGA METÁLICA

4.1.1 Verificação manual

Ao realizar o dimensionamento manual do perfil W 410 X 75, cujo procedimento utilizado está no Anexo A, é possível determinar rapidamente a resistência à flexão simples.

Do cálculo realizado, foi verificado que o perfil escolhido não seria suficiente para resistir à flambagem local e lateral, obtendo um momento resistente de 126 kN.m, para o caso de viga destravada, e 345 kN.m, para um perfil travado totalmente ao longo de seu comprimento. Como ambos os valores são inferiores à 381 KN.m, o perfil metálico não é suficientemente resistente aos esforços aplicados.

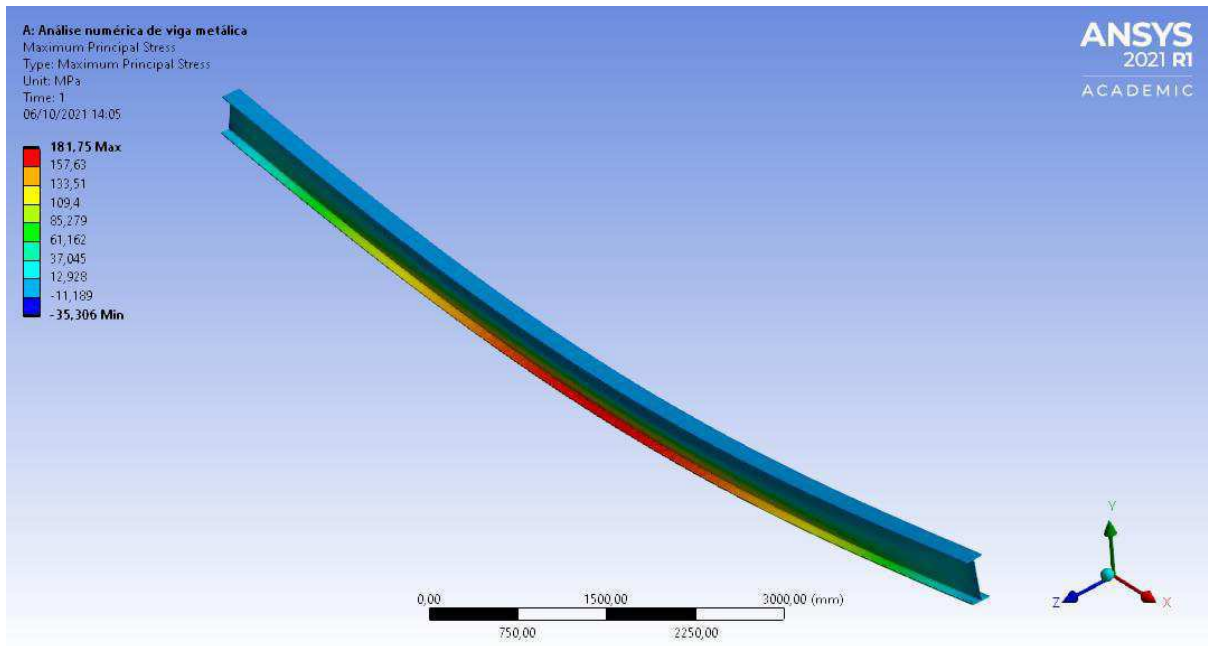
O anexo C da norma ABNT NBR 8800:2008 estabelece valores limite para os deslocamentos verticais máximos incidentes nas vigas metálicas e mistas, valores esses que dependem da configuração da viga. Para o caso estudado, foi considerada uma viga de piso com deflexão máxima de $L/350$, aproximadamente 28,5 mm. A flecha máxima calculada apresentou o valor de 47,9 mm, ultrapassando o limite de deformação imposto pela norma.

4.1.2 Análise numérica

A partir dos resultados fornecidos por *maximum shear stress*, *maximum principal stress* e *minimum principal stress*, é possível verificar as regiões tensionadas de forma tridimensional, podendo identificar o nível de tensão em diferentes pontos, sem a necessidade de simplificar a viga e linearizar os seus efeitos.

A partir dos gráficos de tensões, pode-se destacar as áreas mais solicitadas, na qual a mesa inferior do perfil apresenta o maior valor de tração no meio do vão, como pode ser observado pela cor vermelha na Figura 21.

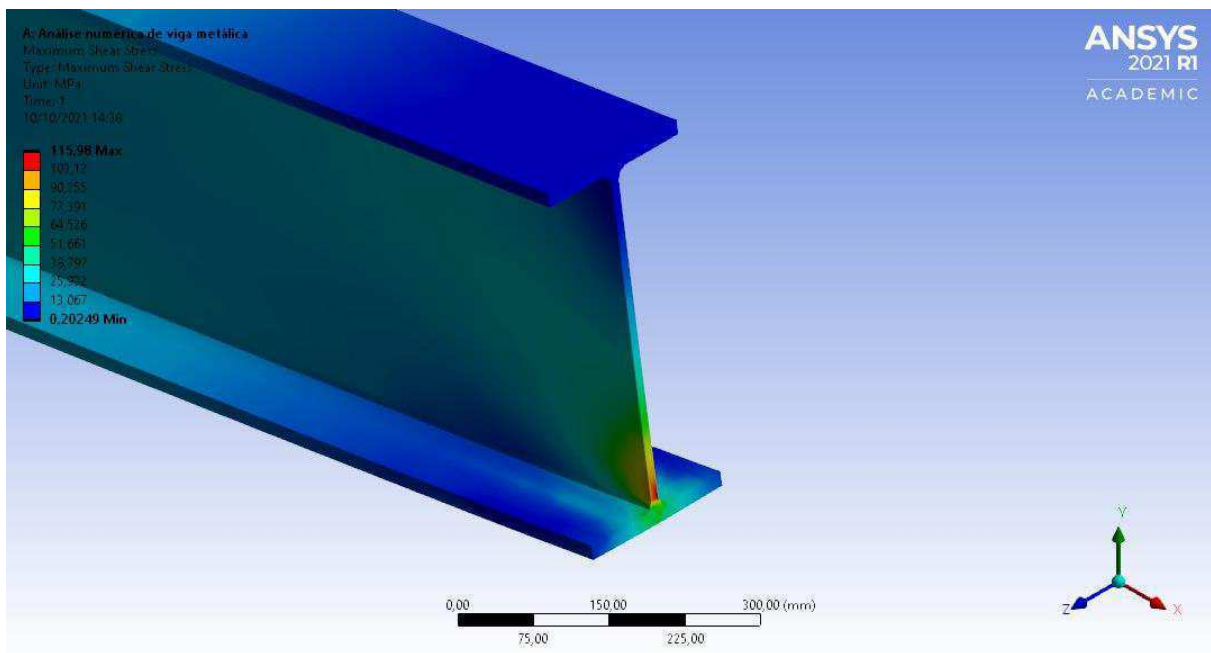
Figura 21 – Gráfico da tensão máxima ocorrida ao longo da viga metálica.



Fonte: Autor, 2021.

Da análise de tensões, ainda pode-se verificar que as maiores tensões de cisalhamento ocorrem nos apoios da viga, mais precisamente na transição entre a alma e a mesa inferior do perfil, destacado pela cor vermelha na Figura 22. A partir do gráfico de tensões, foi verificado que a região com maior solicitação à compressão coincide com a região de cisalhamento.

Figura 22 – Região do apoio do perfil com maior tensão de cisalhamento.



Fonte: Autor, 2021.

Visto que a tensão limite de escoamento de dimensionamento para as peças metálicas (f_{yd}) é de aproximadamente 227 MPa, pode-se utilizar esse valor como parâmetro para analisar a segurança estrutural da peça. Em se tratando de cisalhamento, assim como na verificação manual, a viga apresenta uma resistência mais que suficiente, com uma folga de quase 50% nas tensões.

Ao analisar as tensões de tração e compressão na peça, é possível ver resultados abaixo do limite estabelecido, com exceção dos apoios, submetidos à tensão de compressão no valor de 250MPa. Dessa forma, se constata pelo estado de tensões que o perfil metálico não suporta com segurança às cargas propostas.

Ao verificar a deformação, é possível observar o comportamento da viga, como esperado de uma viga biapoiada, com flecha máxima de 46,5 mm, valor bem acima do limite normativo, porém muito próximo do valor calculado (variação de 3%). Essa variação, juntamente com a tensão excedente nos apoios, indica que o modelo desenvolvido no software possui um bom nível de precisão, quando comparado aos cálculos efetuados.

4.2 VIGAS MISTAS

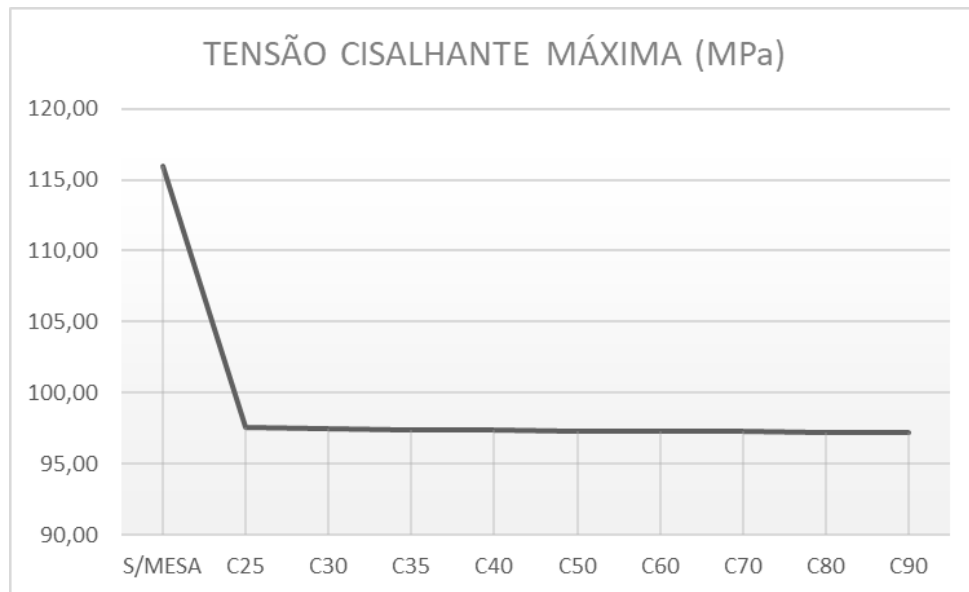
4.2.1 Tensões

Dos procedimentos para a obtenção do momento resistente das vigas mistas, foi determinado que o momento resistente para a viga com concreto de f_{ck} 25 MPa foi de 856 kN.m, bem superior ao momento ao momento de dimensionamento.

Ao realizar a análise numérica das vigas mistas, a viga mista apresentou o mesmo comportamento da viga metálica, tendo as mesmas regiões com maior solicitação, porém, em dimensões significativamente inferiores.

A tensão de cisalhamento apresentou uma redução de 16% da viga metálica para a viga mista, mantendo-se praticamente constante, mesmo variando a classe de resistência do concreto, como pode ser observado na Figura 23. Tal comportamento independente da resistência do concreto é justificável, visto que o pico de tensões ocorre no perfil metálico.

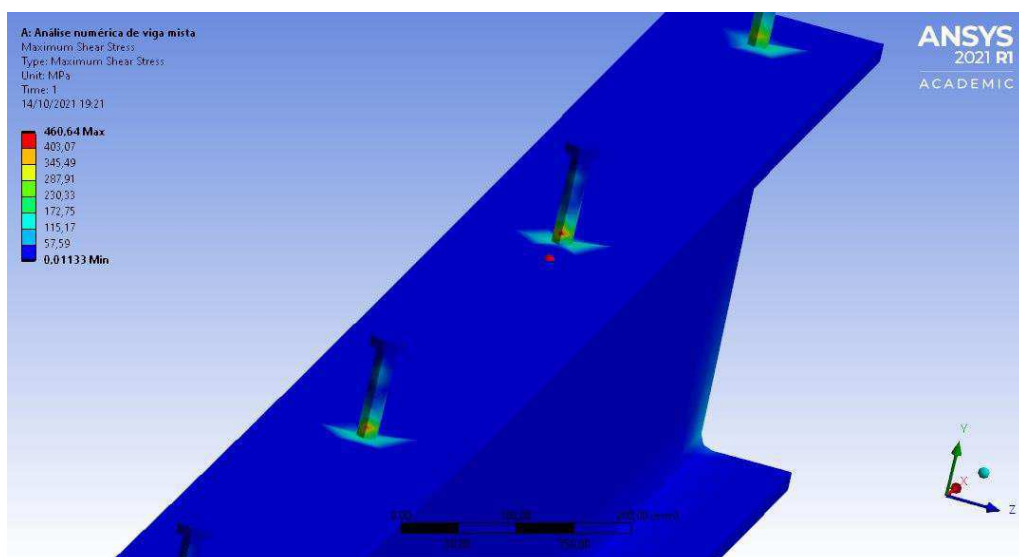
Figura 23 – Gráfico da tensão de cisalhamento máxima no apoio da viga em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

Baseado no fato dos resultados serem obtidos a partir da união perfeita entre os materiais, foi determinado que os conectores de cisalhamento presentes na viga foram inutilizados. Dessa forma, ao modificar a superfície de contato entre aço e concreto para *frictional*, as tensões de tração e compressão no perfil metálico sofrem poucas variações, enquanto os conectores de cisalhamento passam a ser bastante exigidos, como é possível observar na Figura 24.

Figura 24 – Tensão de cisalhamento nos conectores da viga mista C25, considerando o deslizamento entre os materiais.

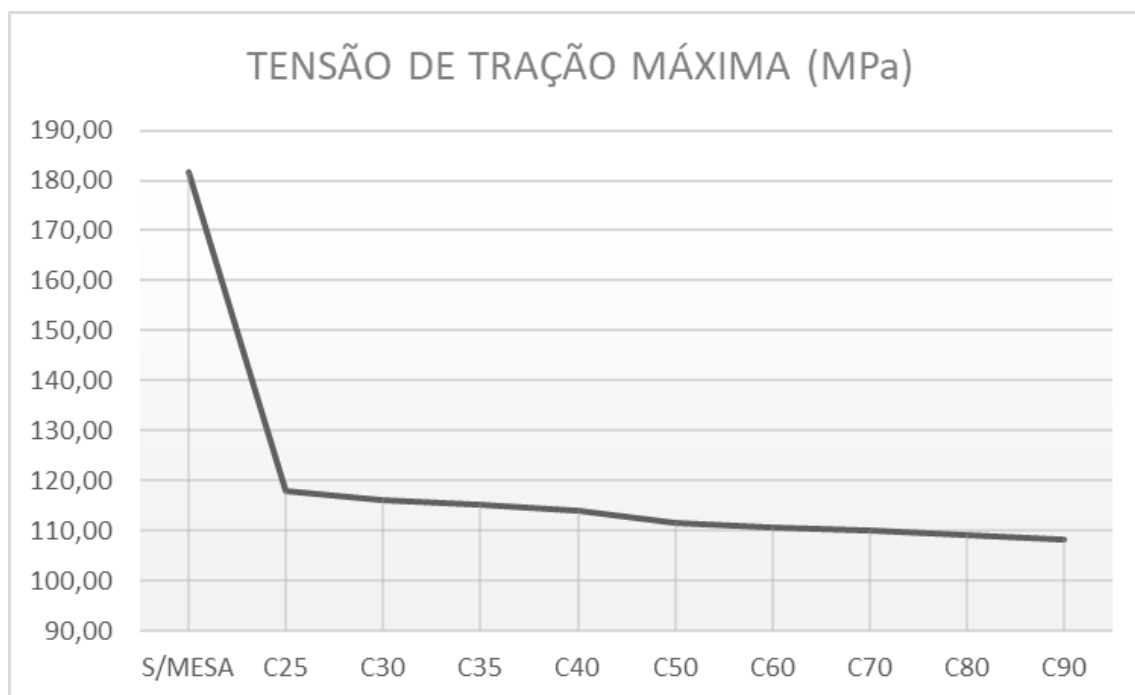


Fonte: Autor, 2021.

Da Figura 24, percebe-se que os conectores de cisalhamento, na viga mista com concreto de resistência 25 MPa, estão submetidos a uma tensão máxima de 460 MPa, valor superior à tensão de ruptura do conector (400 MPa), apontando a necessidade de alterar a configuração dos conectores de cisalhamento na viga mista. Essa tensão também é influenciada pela resistência do concreto, na qual foi obtida uma tensão de 410 MPa para a viga mista com uso do concreto de resistência 90 MPa.

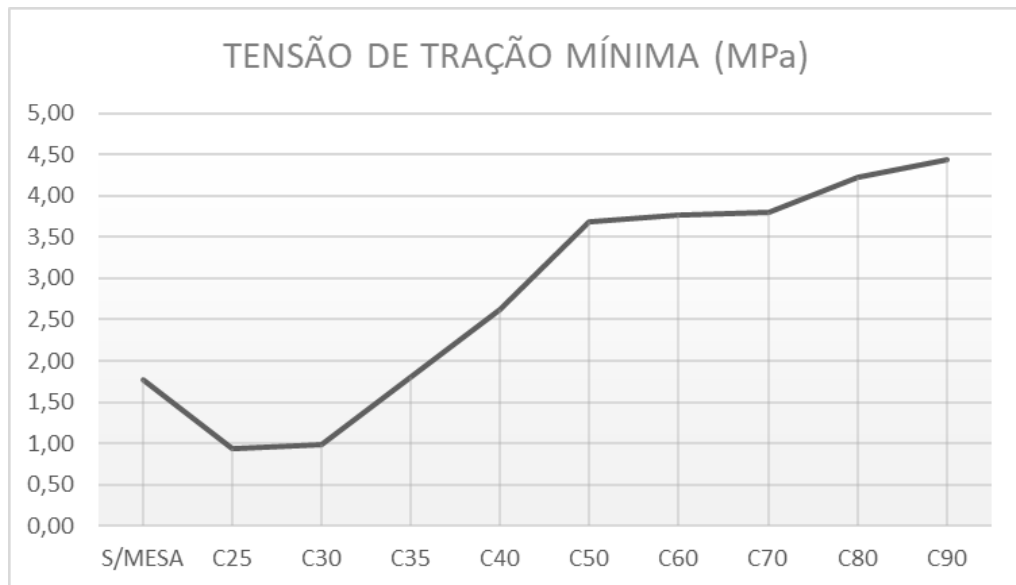
Em se tratando das tensões de tração, pode-se observar na Figura 25 que, entre a viga metálica e a viga mista C25, há uma queda de 35% na sollicitação da peça, enquanto a tensão mínima de tração da viga mista (Figura 26) é o único resultado que foge do padrão, sendo diretamente proporcional ao f_{ck} utilizado na viga mista. Vale ressaltar que, de acordo com o gráfico de tensão, a mesa colaborante de concreto não está submetida a tração, o que garante sua integridade.

Figura 25 – Gráfico da tensão de tração máxima no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

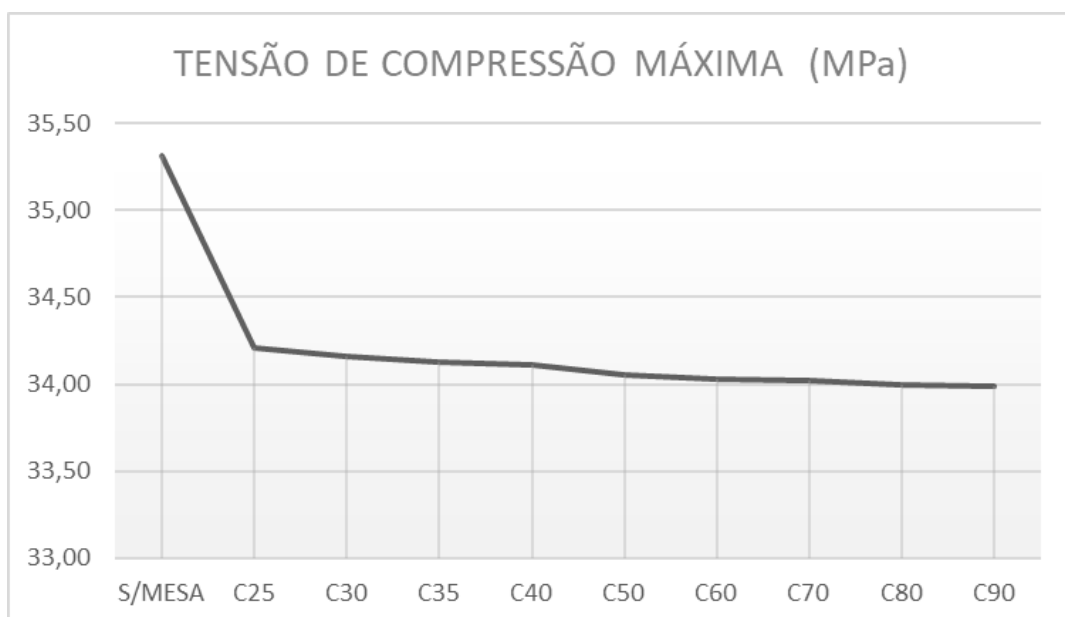
Figura 26 – Gráfico da tensão de tração mínima no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

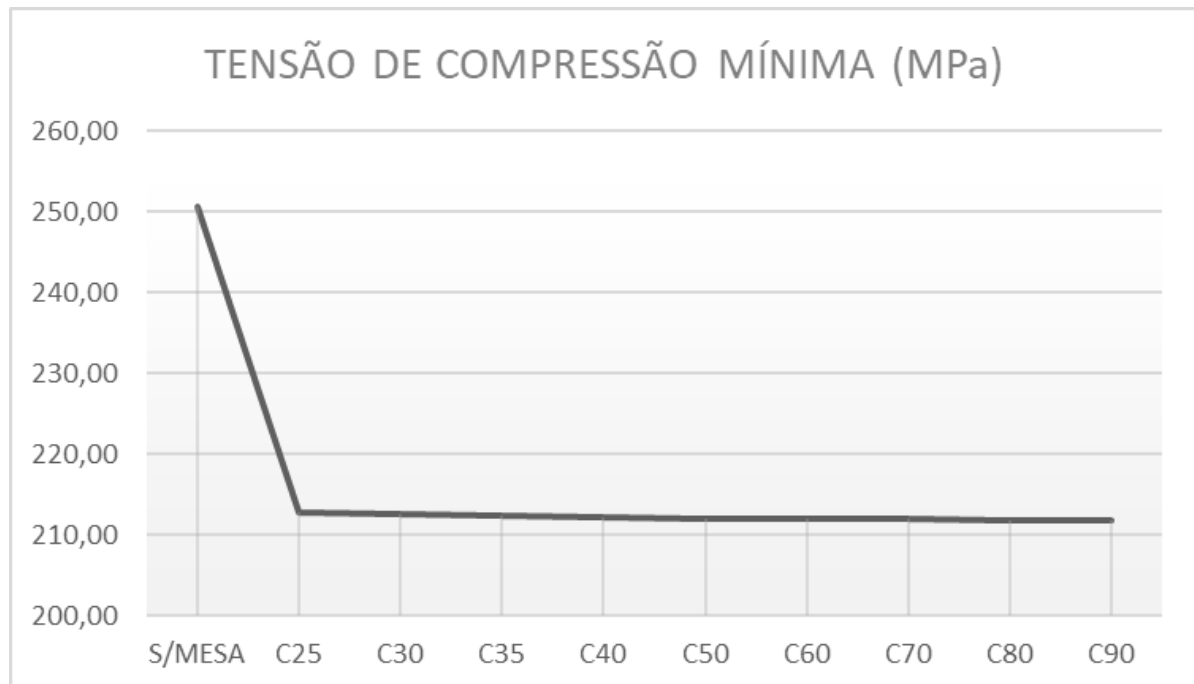
Já na tensão de compressão da peça, situação em que o a aplicação da viga mista se torna mais importante, foi observada uma queda de 15% na tensão mínima, suficiente para que a viga mista com seus 212,7 MPa ficasse abaixo da tenção limite de 227 MPa estabelecida anteriormente. Vale ressaltar que a tensão mínima (Figura 28) apresenta valor superior à tensão máxima (Figura 27), visto que o software atribui resultado negativo para a compressão da viga.

Figura 27 – Gráfico da tensão de compressão máxima nos apoios em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 28 – Gráfico da tensão de compressão mínima nos apoios em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

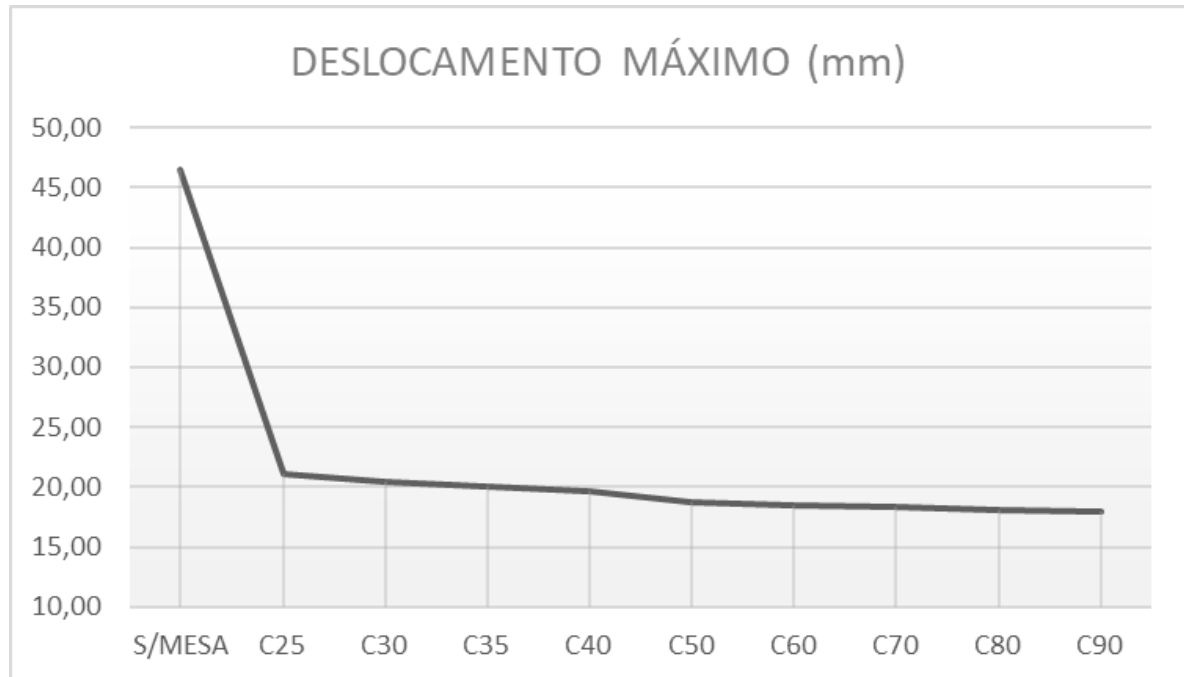
Comparando a verificação manual com a análise computacional, a folga da estrutura apresentada na análise também aponta para a segurança da estrutura, resistindo, porém, com uma folga menor na relação entre carga e capacidade resistente.

Outro fator importante de se verificar é que, em todos os casos, a mesa colaborante de concreto apresentou uma tensão de compressão inferior a 20 MPa, justificando a baixa redução nas tensões ao modificar a resistência do concreto. Tal resultado também era esperado, visto que a variação no momento resistente de cálculo também foi baixa, entre 2 e 8 kN.m.

4.2.2 Deformações

Abordando o deslocamento máximo nas vigas, através da Figura 29 é possível observar uma redução de 55% na flecha máxima ao modificar o tipo de viga empregada.

Figura 29 – Gráfico do deslocamento vertical máximo no meio do vão em função da variação da resistência do concreto.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 5, estão listadas as flechas obtidas pelo software nas situações de superfície de contato entre aço e concreto perfeitamente ligadas, considerando o atrito da interface e as flechas calculadas. Ambos os resultados apresentam leve redução ao incrementar a resistência do concreto e são inferiores à flecha limite estipulada para a estrutura.

Tabela 5 – Flechas máximas nas vigas mistas obtidas por software, considerando a ligação perfeita, superfície submetida ao atrito e a flecha calculada.

VIGA	δ (mm)	δ atrito	δ calc.
C25	17,09	21,1	25,8
C30	16,64	20,5	25,3
C35	16,37	20,1	25,0
C40	16,12	19,7	24,7
C50	15,57	18,8	24,1
C60	15,37	18,5	23,9
C70	15,28	18,4	23,8
C80	15,09	18,1	23,6
C90	14,92	17,9	23,4

Fonte: Autor, 2021.

Ao comparar os valores obtidos da análise numérica considerando o contato perfeito, é observado, em média, um resultado de 8,5 mm ou 35% menor, em relação às flechas

calculadas. Ao modificar a suposição de contato entre as peças para *frictional*, mais aproximada da realidade, o resultado das flechas passa a ser em média 5 mm menor que o cálculo, ou 18%.

Essa variação encontrada nos resultados pode ser associada ao modelo de viga mista, no qual a norma trata sobre vigas com laje apoiada, enquanto que a viga estudada em software era do tipo parcialmente embutida na laje, possuindo uma maior interface aço-concreto, capaz de proporcionar mais aderência entre os materiais.

5 CONCLUSÕES

- Com relação aos cálculos normativos

Dos cálculos estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008, conclui-se que o perfil metálico W 410 X 75 não possui resistência suficiente para suportar as cargas com segurança. Ao utilizar o mesmo perfil, na configuração de viga mista, a estrutura apresenta resistência superior às solicitações ocorridas na viga.

- Com relação às tensões principais

A partir do estudo executado, foi possível analisar a distribuição de tensões e deformações, verificando a eficácia da aplicação do sistema construtivo. Foi possível observar que a viga mista estudada possui tensões principais entre 15% e 35% menores que a viga metálica, tornando as tensões inferiores ao limite de escoamento minorado (227 Mpa).

Dessa forma, é possível perceber que um caso no qual seria necessário o uso de uma viga metálica com perfil mais elevado e/ou enrijecido, a viga mista com perfil W 410 X 75 apresenta tensões abaixo do limite de escoamento do aço.

- Com relação às deformações

Visto que o deslocamento máximo da viga deve ser inferior ou igual à 28,6 mm, foi possível verificar um deslocamento máximo de 46,5 mm na viga metálica e de 17,1 na viga mista, uma redução de aproximadamente 55% que permite atender ao estabelecido na norma vigente.

- Com relação à resistência do concreto

Outro aspecto a ser analisado nas vigas mistas foi a capacidade de aprimoramento da resistência da viga ao incrementar a resistência do concreto de alto desempenho. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que a elevação da resistência do concreto para a classe subsequente causa variações de até 1% na resistência da viga, podendo se tornar relevante quando comparado os concretos de 25 MPa e 90 MPa, no qual há um acréscimo de 36 kN.m no momento resistente.

Na situação acima, aumentar a resistência do concreto só será necessário para casos no qual se deseje fornecer mais segurança à estrutura construída, melhorar o processo construtivo ou acelerar a construção. Um fator que pode ter reduzido essa influência da resistência do concreto é o grau de interação da viga mista, ao invés de tratar de uma viga com interação total, foi estudada uma viga com interação parcial com η_i igual a 0,62.

- Com relação aos conectores de cisalhamento

A partir da análise computacional, foi observado que a interação parcial na viga provocou tensões superiores ao limite de ruptura do aço, podendo prejudicar o funcionamento adequado da viga. Com isso, vê-se a necessidade de modificar a disposição dos conectores de cisalhamento, reduzindo o seu espaçamento ou aumentando a dimensão do conector.

- Com relação ao desempenho da análise computacional

Tratando agora do desempenho da análise computacional, os resultados apresentados para a viga metálica foram precisos e de acordo com as verificações da norma. Para as vigas mistas, foram obtidas as mesmas conclusões da verificação manual, ou seja, capacidade resistente adequada da viga e deslocamentos abaixo do limite estabelecido pela norma, contudo, os resultados entre ambos os métodos de análise apresentaram divergência nos valores de até 18%, podendo atribuir tal variação à maior interação entre aço e concreto da viga parcialmente embutida.

De modo geral, foi possível constatar numericamente que as vigas mistas possuem um nível de resistência estrutural maior que as vigas metálicas, podendo ser aplicada em estruturas que demandem uma menor altura de viga, maiores cargas e também, é possível aplicar as vigas mistas como um reforço estrutural para estruturas metálicas que por ventura sejam mais solicitadas num futuro não previsto.

Além disso, o uso do software para a análise computacional, com aplicação do método dos elementos finitos, se mostrou prático, rápido de ser aplicado e mais econômico, quando comparado aos testes experimentais realizados em laboratório.

Como sugestão para o aprofundamento do conteúdo, é possível explorar os seguintes assuntos:

- Análise computacional de vigas mista do tipo *steel deck*, em comparação com a viga parcialmente embutida na laje;
- Análise computacional de um pavimento construído em estrutura mista.
- Análise computacional de pilares mistos de aço e concreto; e
- Análise computacional dos conectores de cisalhamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS Inc. ANSYS STUDENT R1, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

BARATA, M. S. **Concretos de alto desempenho do estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulin**. 1998. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

CARVALHO, R.C. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. Vol. 1, 3ª ed. EdUFSCAR, São Carlos, 2009.

CAVALCANTE, O. R. O. **Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo ‘V’ em Vigas Mistas**. 2010. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H de C. **Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol. 61, n. 2, p. 239-247, abr./jun. 2008.

DIAS, L.A.M. **Estruturas Híbridas e Mistas de Aço e Concreto**. Editora Zigurate, São Paulo, SP. 2014. 280p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010**. First complete draft. Lausanne: FIB, v.1, 2010.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**. Pini, São Paulo, 2008.

GERDAU AÇOMINAS. **Tabela de bitolas**. 2021. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>>. Acesso em: 28 de agosto de 2021.

LAZZARI, P. M. **Simulação Numérica das Etapas Construtivas de Pontes Estaiadas através do Método dos Elementos Finitos**. 2016. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LIMA, F. B. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. 1997. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

LOPES, E. D. C. **Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga**. 2012. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MARINHO, I. J.P.; VAZ, L. E.; PIMENTEL, R. L. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquivancadas reutilizáveis via ANSYS**. 2002. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

NELSEN, A. C. H. **Comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa**. 2013, 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

OLIVEIRA, A. P. V. **Dimensionamento de um pavimento em estrutura mista aço-concreto**. Orientadora: Larissa Degliuomini Kirchhof. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PETRAUSKI, M. C. **Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores crestbond**. 2016. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. EESC-USP, São Carlos, 2005.

SILVA, E. N. da. **Modelagem numérica do comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto protendidas**. 2018, 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SAÚDE, J. *et al.* Lajes Mistas: Aspectos construtivos Steel Deck. 2015. Disponível em: <<https://metalica.com.br/lajes-mistas-aspectos-construtivos-e-respectivas-recomendacoes/>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

SOUZA, D. A. **Estruturas mistas de aço e concreto**. GERDAU. In: 56 Congresso Brasileiro do Concreto. Natal, 2014. 31p.

SOUZA, V. J. L. **Contribuição ao projeto e dimensionamento da superestrutura de pontes rodoviárias em vigas mistas de aço e concreto**. 2012, 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

TAKATA, L. T. **Tecnologia e concepção de sistemas estruturais híbridos de concreto para edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil**. 2017. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

TUTIKIAN, B.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1283-1325.

VIEIRA, P. C. S. R. **Análise estrutural e arquitetônica das pontes de Robert Maillart com base no software Ansys**. Orientador: Marcos Henrique Ritter de Gregório. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.

WALSYWA. **Catálogo 2019/2020**. 2020. Disponível em: < https://www.walsywa.com.br/wp-content/uploads/2020/05/2193_Catalogo_Walsywa_Completo_02c_compressed.pdf >. Acesso em: 05 de outubro de 2021.

7 ANEXOS

ANEXO A – VERIFICAÇÃO DO PERFIL METÁLICO W 410 X 75.

A.1 Determinação do momento de dimensionamento

O perfil a ser verificado possui peso regularizado de 75 kg/m, e pretende-se verificar se o mesmo resiste à uma carga adicional de 2 t/m com vão livre de 10 metros. Convertendo as unidades para kN e cm, tem-se o seguinte carregamento linear:

$$q = \left(2000 \frac{kg}{m} + 75 \frac{kg}{m} \right) \times 0,0098 \frac{kN}{kg} \times 100 \frac{cm}{m} = 0,203 \frac{kN}{cm} \quad 7.1$$

Considerando uma combinação normal das cargas e que as mesmas são ações permanentes oriundas de elementos construtivos, tem-se o coeficiente de majoração (γ_f) será igual a 1,5. Dessa forma, o momento de dimensionamento da peça será de:

$$M_{sd} = \gamma_f \times \frac{q \times l^2}{8} = \frac{1,5 \times 0,203 \frac{kN}{cm} \times (1000 \text{ cm})^2}{8} \quad 7.2$$

$$M_{sd} = 3,81 \times 10^4 \text{ kN.cm}$$

A.2 Momento resistente da flambagem lateral com torção (FLT)

Para definir o momento resistente da peça, é necessário verificar o parâmetro de esbeltez do perfil e o limite de plastificação:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{1000}{4,03} = 248,14 \quad 7.3$$

$$\lambda_p = 1,76 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \times \sqrt{\frac{20000 \frac{kN}{cm}}{25 \frac{kN}{cm}}} = 49,78 < \lambda \quad 7.4$$

Visto que o parâmetro de esbeltez é superior ao limite de plastificação, também é necessário verificar o início do escoamento:

$$\beta_1 = \frac{0,7 \times f_y \times W}{E \times J} = \frac{0,7 \times 25 \frac{kN}{cm} \times 1337,3 \text{ cm}^3}{20000 \frac{kN}{cm} \times} = 0,018 \quad 7.5$$

$$C_w = \frac{I_y \times (d - t_f)^2}{4} = \frac{1559 \text{ cm}^4 \times 41,3 \text{ cm} \times 1,6 \text{ cm}}{4} = 6,14 \times 10^5 \quad 7.6$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \times \sqrt{I_y \times J}}{r_y \times J \times \beta_1} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times C_w \times \beta_1^2}{I_y}}} \quad 7.7$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \times \sqrt{1559 \times 65,21}}{4,03 \times 65,21 \times 0,018} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 614000 \times 0,018^2}{1559}}}$$

$$= 164,38 < \lambda$$

Como o parâmetro de esbeltez é superior ao início do escoamento, o momento de resistência para o FLT será o menor valor entre:

$$M_{rd1} = \frac{Z_x}{\gamma_{a1}} = \frac{1518,3}{1,1} = 1381 \text{ kN.cm} \quad 7.8$$

$$M_{rd2} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{\gamma_{a1} \times L_b^2} \times \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \times \left(1 + 0,039 \times \frac{J \times L_b^2}{C_w}\right)}$$

$$M_{rd2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 1559}{1,1 \times 1000^2} \sqrt{\frac{614000}{1559} \left(1 + 0,039 \times \frac{65,21 \times 1000^2}{614000}\right)} \quad 7.9$$

$$= 1,26 \times 10^4 \text{ kN.cm}$$

A.3 Momento resistente da flambagem local da alma (FLA)

Assim como no FLT, para o FLA também é necessária verificar o limite de plasticidade:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28 \quad 7.10$$

$$\lambda_p = 3,76 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \times \sqrt{\frac{20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}} = 106,35 > \lambda \quad 7.11$$

Visto que o parâmetro de esbeltez é inferior ao limite de plasticidade, o momento resistente pode ser calculado por:

$$M_{rd} = \frac{Z_x \times f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1518,6 \times 25}{1,1} = 3,45 \times 10^4 \text{ kN.cm} \quad 7.12$$

A.4 Momento resistente da flambagem local da mesa comprimida (FLM)

Assim como no FLT, para o FLA também é necessária verificar o limite de plasticidade:

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \times t_f} = \frac{18}{2 \times 1,6} = 5,63 \quad 7.13$$

$$\lambda_p = 0,38 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \times \sqrt{\frac{20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}} = 10,75 > \lambda \quad 7.14$$

Visto que o parâmetro de esbeltez é inferior ao limite de plasticidade, o momento resistente terá o mesmo resultado obtido para o FLA. Dado que nenhum dos momentos resistentes obtidos é superior ao momento de dimensionamento, o perfil W 410 X 75 não é capaz de resistir ao momento aplicado.

A.5 Verificação da resistência à força cortante

Para verificar a resistência ao cisalhamento, o esforço cortante de dimensionamento será o seguinte:

$$V_{sd} = \gamma_f \times \frac{q \times l}{2} = \frac{1,5 \times 0,203 \frac{kN}{cm} \times 1000 \text{ cm}}{2} = 152,5 \text{ kN} \quad 7.15$$

De forma análoga ao momento fletor, a verificação do limite de plasticidade ocorre da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28 \quad 7.16$$

$$\lambda_p = 1,1 \times \sqrt{\frac{5 \times E}{f_y}} = 1,1 \times \sqrt{\frac{5 \times 20000 \frac{kN}{cm}}{25 \frac{kN}{cm}}} = 69,57 > \lambda \quad 7.17$$

Assim sendo, a cortante resistente do perfil será de:

$$V_{rd} = \frac{0,6 \times f_y \times d \times t_w}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 25 \times 41,3 \times 0,97}{1,1} = 546,29 \text{ kN} \quad 7.18$$

A cortante resistente do perfil é superior à cortante de dimensionamento, mostrando que o perfil possui capacidade de resistência ao cisalhamento.

A.6 Cálculo da flecha no meio do vão

Para determinar a deformação vertical máxima, que ocorre no meio do vão da viga biapoiada, pode ser utilizada a seguinte expressão:

$$\delta = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = \frac{5 \times 0,203 \times 1000^4}{384 \times 20000 \times 27616} = 4,79 \text{ cm} \quad 7.19$$

ANEXO B – VERIFICAÇÃO DA VIGA MISTA COM PERFIL W 410 X 75.

B.1 Metodologia de cálculo da viga mista

Devido a presença da mesa colaborante de concreto na viga mista, é adicionado o seu peso no carregamento da viga. Visto que a mesa colaborante apresenta um peso de 468,75 kg/m, tem-se o seguinte carregamento linear:

$$\begin{aligned} q &= \left(2000 \frac{kg}{m} + 75 \frac{kg}{m} + 468,75 \frac{kg}{m} \right) \times 0,0098 \frac{kN}{kg} \times 100 \frac{cm}{m} \\ &= 0,249 \frac{kN}{cm} \end{aligned} \quad 7.20$$

Dessa forma o momento de dimensionamento passa a ser de:

$$\begin{aligned} M_{sd} &= \gamma_f \times \frac{q \times l^2}{8} = \frac{1,5 \times 0,249 \frac{kN}{cm} \times (1000 \text{ cm})^2}{8} \\ M_{sd} &= 4,67 \times 10^4 kN \cdot cm \end{aligned} \quad 7.21$$

Para realizar o cálculo da resistência à flexão da viga mista, é necessário seguir o procedimento especificado no Anexo O da ABNT NBR 8800:2008. O primeiro passo da verificação consiste em classificar a esbeltez da viga.

$$\frac{h}{t_w} = \frac{38,1}{0,97} = 39,28 < 3,76 \times \sqrt{\frac{20000 \frac{kN}{cm^2}}{25 \frac{kN}{cm}}} = 106,35 \quad 7.22$$

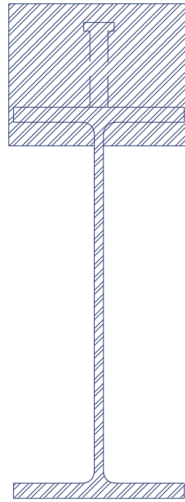
Visto que a suposição acima é verdadeira, a viga mista é classificada como compacta e pode ser dimensionada com as propriedades plásticas da seção mista. Em seguida, é necessário homogeneizar a seção transversal da viga mista, calculando a razão modular entre os materiais.

$$\alpha_E = \frac{E}{E_c} = \frac{20000 \frac{kN}{cm^2}}{2800 \frac{kN}{cm^2}} = 7,14 \quad 7.23$$

$$b_c = \frac{b}{\alpha_E} = \frac{125 \text{ cm}}{7,14} = 17,5 \text{ cm} \quad 7.24$$

Com a largura da mesa colaborante corrigida, a seção transversal da viga mista é transformada para uma viga de material metálico conforma a Figura 30.

Figura 30 – Seção homogeneizada da viga mista de aço e concreto.



Fonte: Autor, 2021.

Então a o momento de inércia da seção homogeneizada, representada pela Figura 30, será de:

$$y = \frac{yc \times Ac + yw \times Aw + yi \times Ai}{Ac + Aw + Ai} \quad 7.25$$

$$y = \frac{44,7 \times 262,5 + 19,4 \times 34,53 + 0,8 \times 28,8}{262,5 + 34,53 + 28,8} = 38,14 \text{ cm}$$

$$I_{tr} = \frac{b_c \times t_c^3 + t_w \times h_w^3 + b_f \times t_f^3}{12} + Ac \times (yc - y)^2$$

$$+ Aw \times (yw - y)^2 + Ai \times (yi - y)^2 \quad 7.26$$

$$I_{tr} = \frac{17,5 \times 15^3 + 0,97 \times 35,6^3 + 18 \times 1,6^3}{12}$$

$$+ 262,5 \times (44,7 - 38,14)^2$$

$$+ 34,53 \times (19,4 - 38,14)^2$$

$$+ 28,8 \times (0,8 - 38,14)^2 = 73535 \text{ cm}^4$$

A resistência dos conectores de cisalhamento será o menor resultado entres as seguintes expressões.

$$\sum Q_{Rd} = \frac{n \times A_{cs} \times \sqrt{f_{ck} \times Ec}}{\gamma_{cs}} = \frac{15 \times \frac{\pi \times 1,9^2}{4} \times \sqrt{2,5 \times 2800}}{1,25} \quad 7.27$$

$$= 2847 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sum Q_{Rd} &= \frac{n \times R_g \times R_g \times A_{cs} \times f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \\ &= \frac{15 \times 1 \times 1 \times \frac{\pi \times 1,9^2}{4} \times 40}{1,25} = 1361 \text{ kN} \end{aligned} \quad 7.28$$

Para determinar o grau de interação da viga mista, é necessário calcular a força de cisalhamento de cálculo a partir do menor valor entre as duas equações a seguir:

$$F_{hd} = A_a \times \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = 95,8 \times \frac{25}{1,1} = 2177 \text{ kN} \quad 7.29$$

$$F_{hd} = 0,85 \times \frac{f_{ck}}{\gamma_{a1}} \times b \times t_c = 0,85 \times \frac{2,5}{1,4} \times 125 \times 15 = 2846 \text{ kN} \quad 7.30$$

Dessa forma, o grau de interação da viga mista será de:

$$\eta_i = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} = \frac{1361}{2177} = 0,625 \quad 7.31$$

$$\eta_{i,min} = 1 - \frac{E}{578 \times f_y} \times (0,75 - 0,0003l) \quad 7.32$$

$$\eta_{i,min} = 1 - \frac{20000}{578 \times 25} \times (0,75 - 0,0003 \times 1000) = 0,377 < 0,4$$

Para que a viga possuísse interação total, seriam necessários 26 conectores de cisalhamento ao invés dos 15 utilizados. Com as informações acima, define-se que o processo de cálculo adequado do momento resistente está detalhado no item O.2.3.1.1.1 da norma para viga de alma cheia com interação parcial.

$$C_{cd} = \sum Q_{Rd} = 1361 \quad 7.33$$

$$C_{ad} = \frac{A_a \times \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - C_{cd}}{2} = \frac{95,8 \times \frac{2,5}{1,4} - 1361}{2} = 408,17 \quad 7.34$$

$$y_t = y_c = \frac{y1 \times a1 + y2 \times a2}{a1 + a2} = \frac{11,12 \times 18,48 + 0,8 \times 28,8}{18,48 + 28,8} = 4,84 \text{ cm} \quad 7.35$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_f - d - y_t \right) \right]$$

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= 1 \left[408,17(41,3 - 4,84 - 4,84) + 1361 \left(\frac{1361}{2 \times 0,85 \times \frac{2,5}{1,4} \times 125} + h_f \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 41,3 - 4,84 \right) \right] = 8,56 \times 10^4 \text{ KN.cm} \end{aligned} \quad 7.36$$

Como o momento resistente é superior ao momento de dimensionamento, a viga mista possui capacidade de resistir aos esforços atuantes, ao contrário da viga metálica. Para calcular a flecha da viga, é necessário determinar o momento de inércia efetivo da viga, já que a mesma tem interação parcial.

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\eta_i} \times (I_{tr} - I_a) = 62828 \text{ cm}^4 \quad 7.37$$

$$\delta = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = \frac{5 \times 0,249 \times 1000^4}{384 \times 20000 \times 63920} = 2,58 \text{ cm} \quad 7.38$$

B.2 Resultados obtidos

Replicando o procedimento de verificação, foram organizados na Tabela 6 os resultados para as demais classes de resistência de concreto estudadas.

Tabela 6 – Momentos resistentes e flechas máximas para cada caso de viga mista estudada.

RESISTÊNCIA	M_{Rd} (10⁴ KN.cm)	δ (mm)
C25	8,56	25,8
C30	8,64	25,3
C35	8,70	25,0
C40	8,74	24,7
C50	8,81	24,1
C60	8,85	23,9
C70	8,88	23,8
C80	8,90	23,6
C90	8,92	23,4

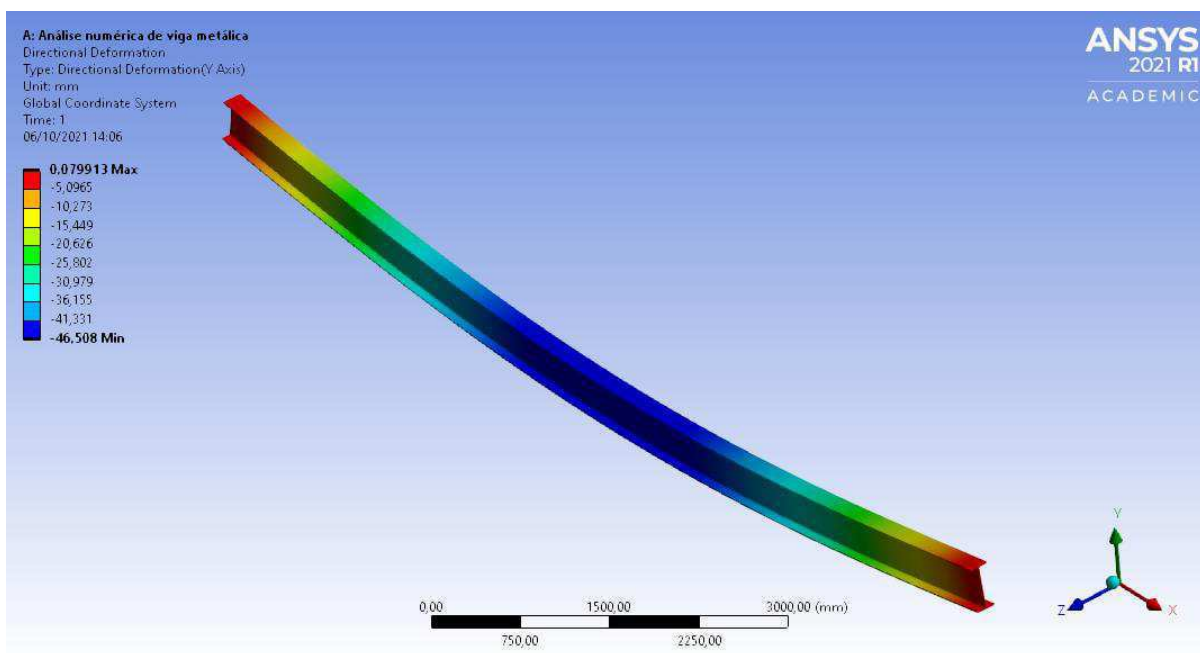
Fonte: Autor, 2021.

ANEXO C – RESULTADOS DA ANÁLISE COMPUTACIONAL NO ANSYS STUDENT.

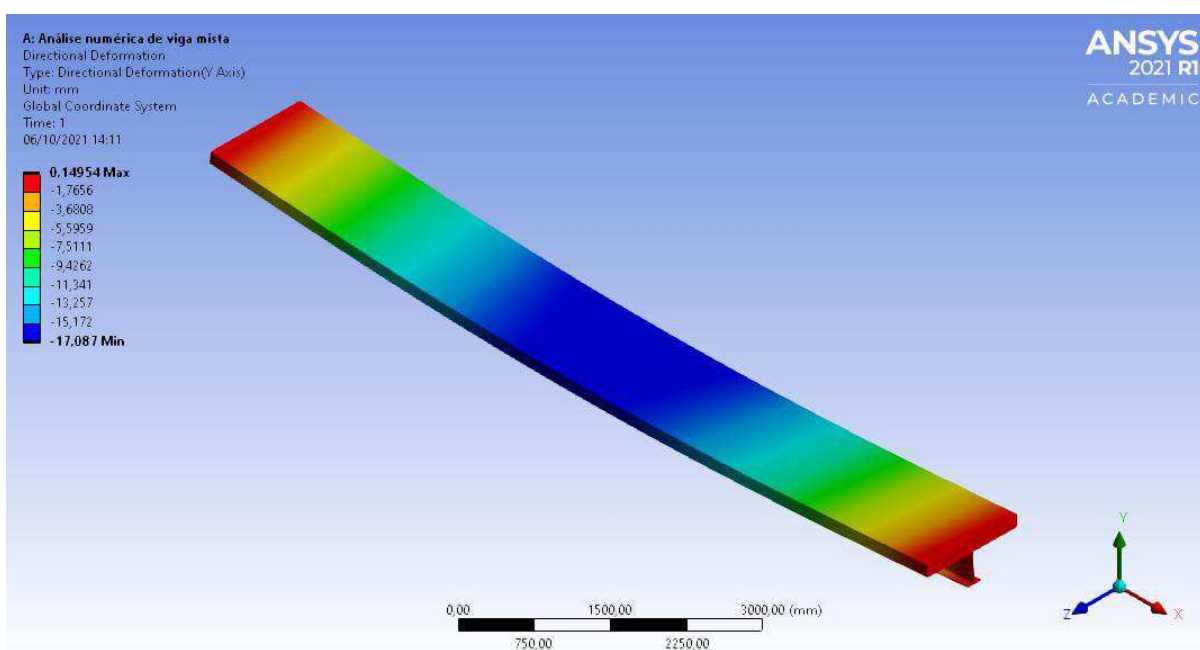
C.1 Deformações

A sequência de figuras abaixo mostra os resultados obtidos a partir do *Directional Deformation*, aplicado na direção y, para obter o comportamento da flecha nas vigas estudadas.

Figura 31 – Deformação da viga metálica com perfil W 410 X 75.

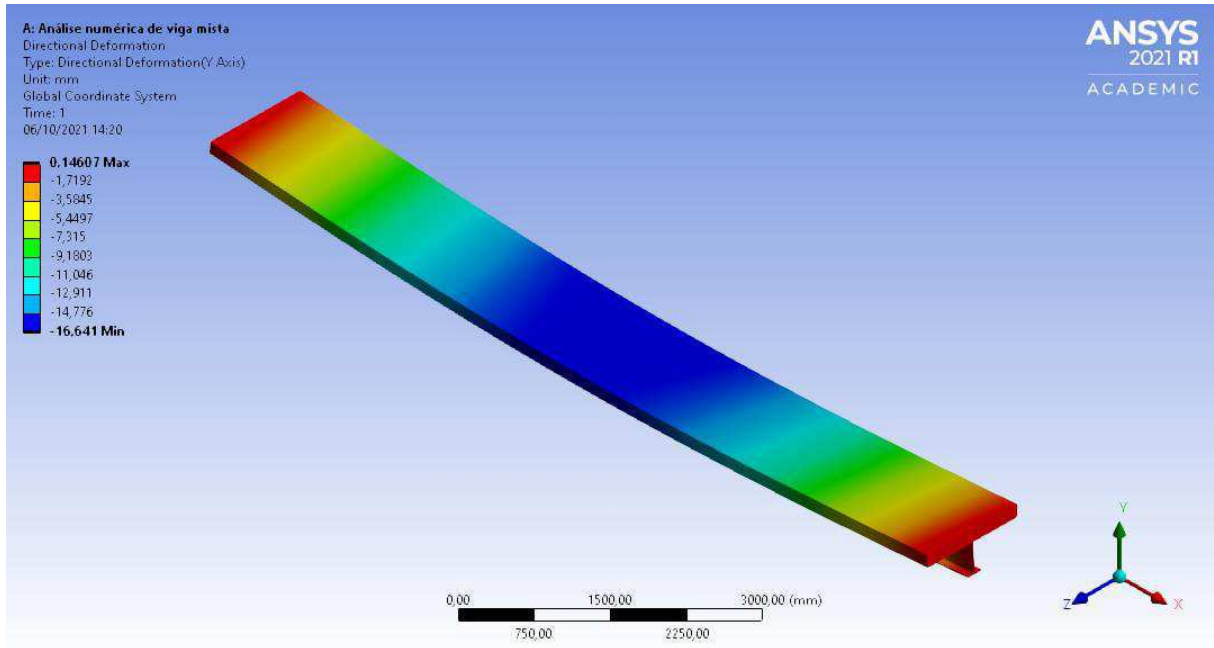


Fonte: Autor, 2021.

Figura 32 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 25 MPa.

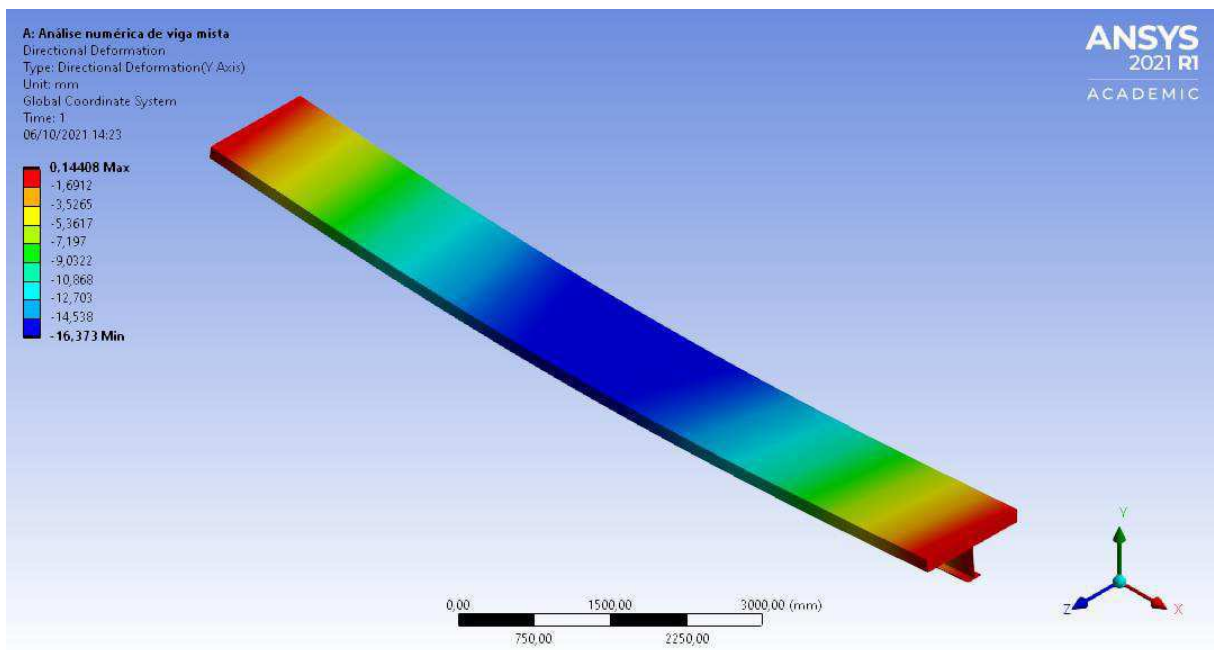
Fonte: Autor, 2021.

Figura 33 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 30 MPa.



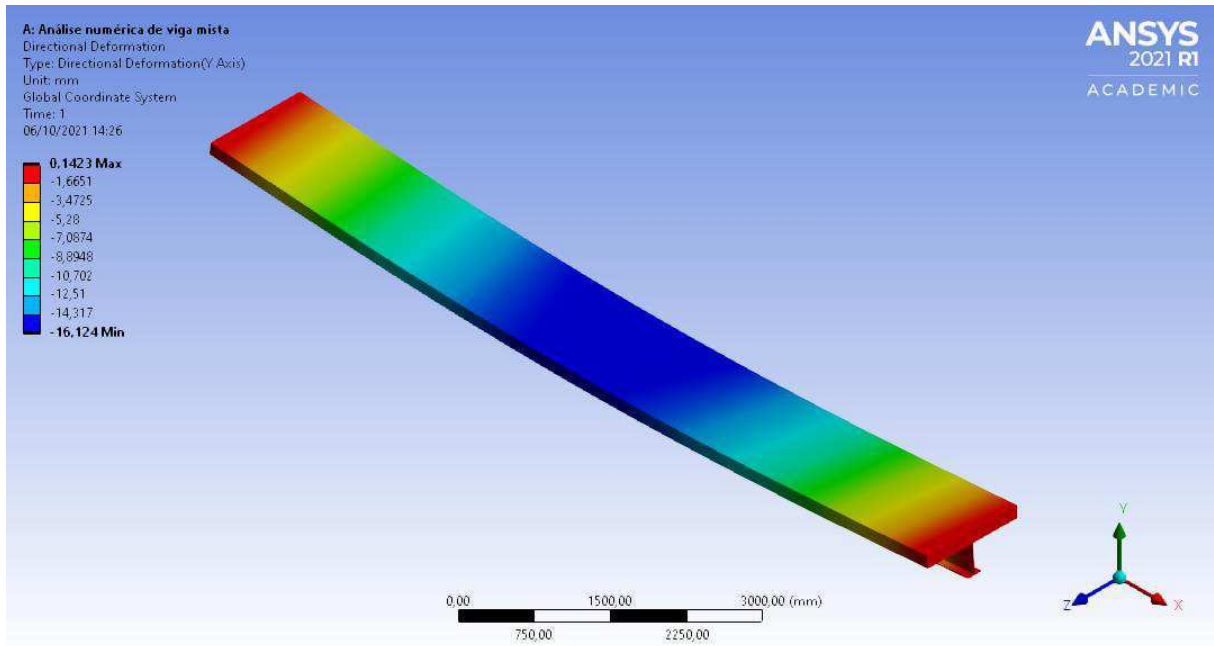
Fonte: Autor, 2021.

Figura 34 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 35 MPa.



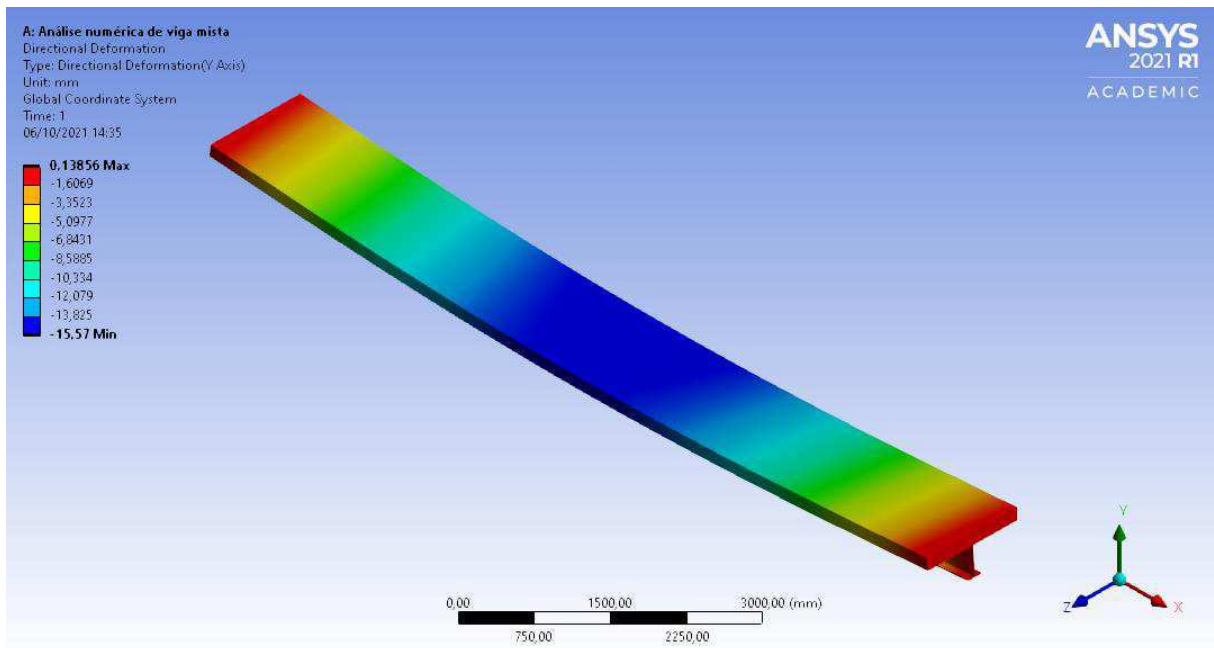
Fonte: Autor, 2021.

Figura 35 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 40 MPa.



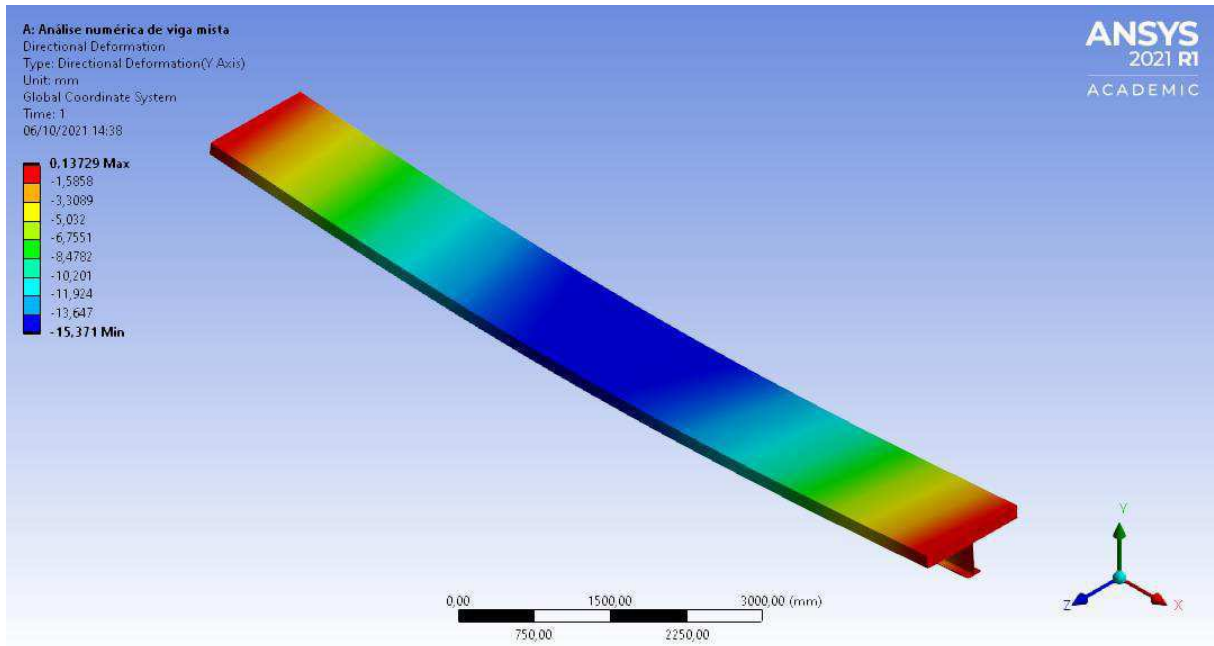
Fonte: Autor, 2021.

Figura 36 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 50 MPa.



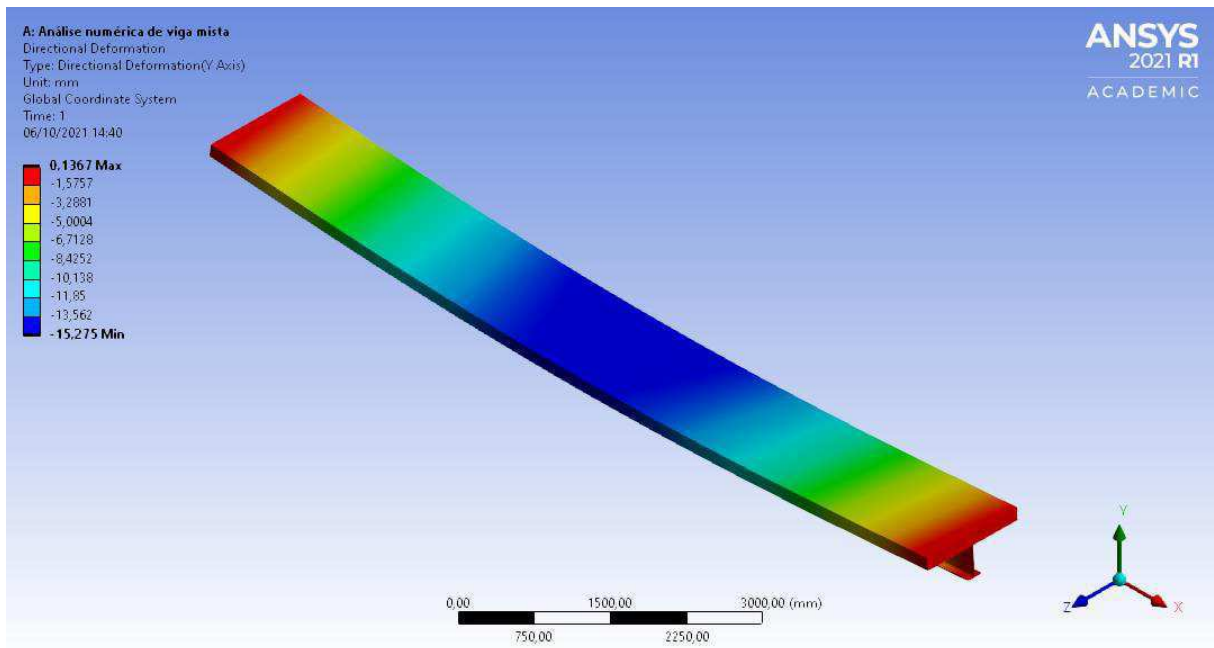
Fonte: Autor, 2021.

Figura 37 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 60 MPa.



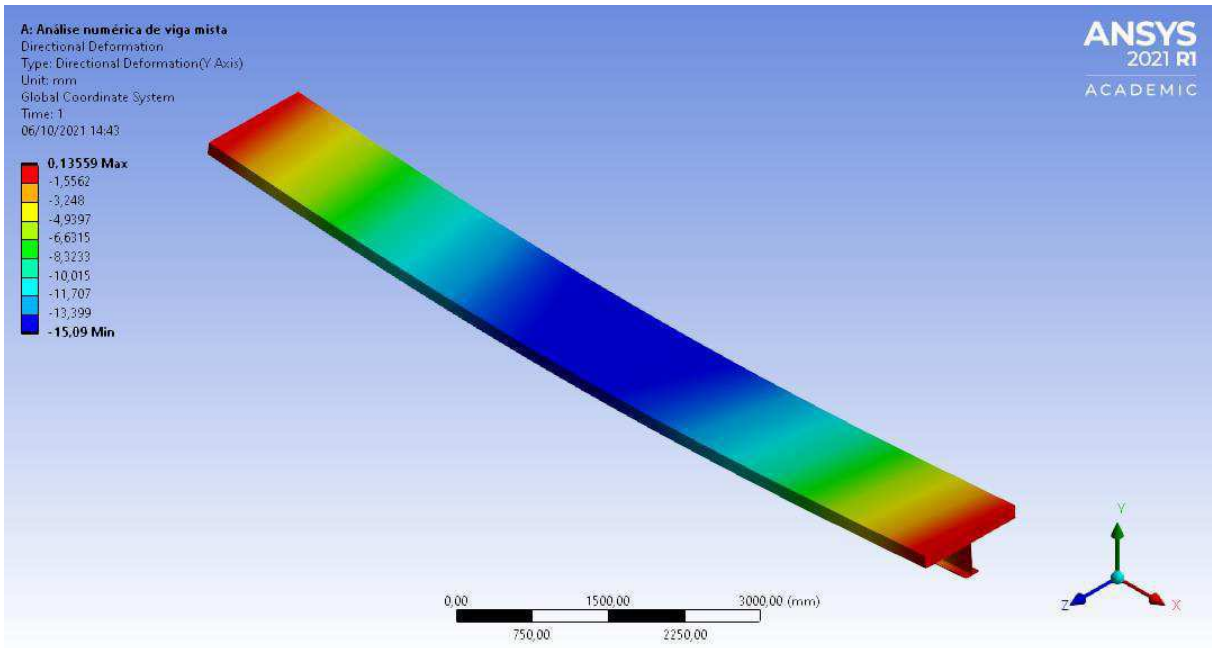
Fonte: Autor, 2021.

Figura 38 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 70 MPa.



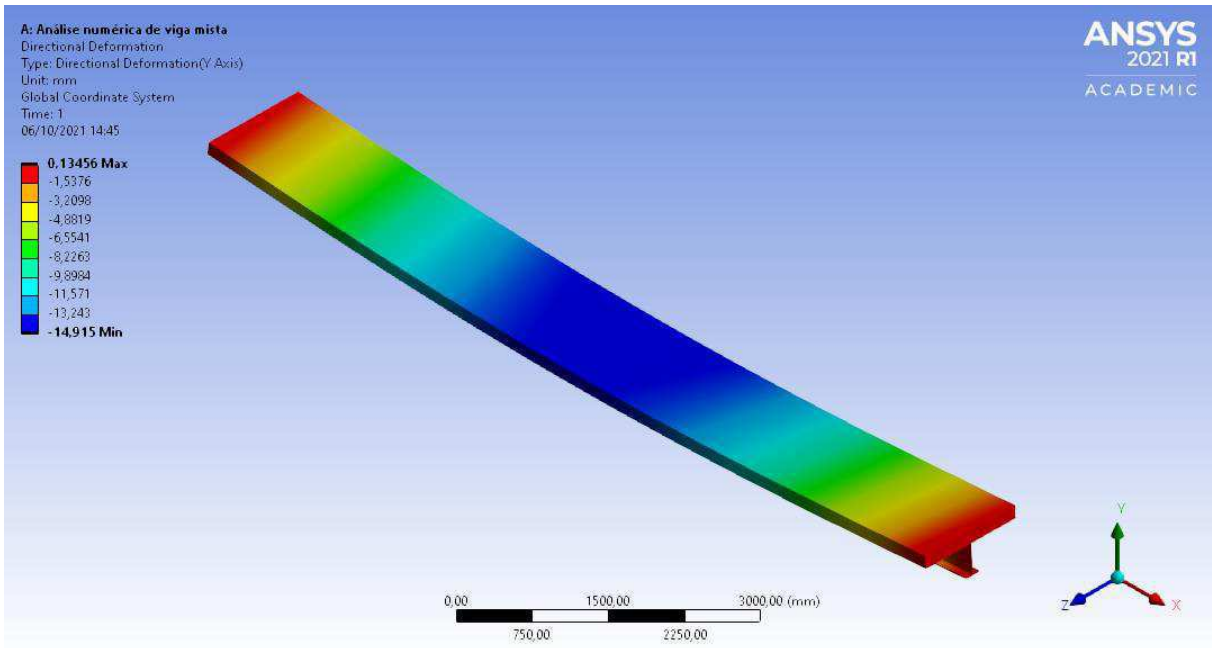
Fonte: Autor, 2021.

Figura 39 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 80 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 40 – Deformação da viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 90 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 7, estão expostas as flechas máximas das vigas, que ocorrem no meio do vão.

Tabela 7 – Flechas máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.

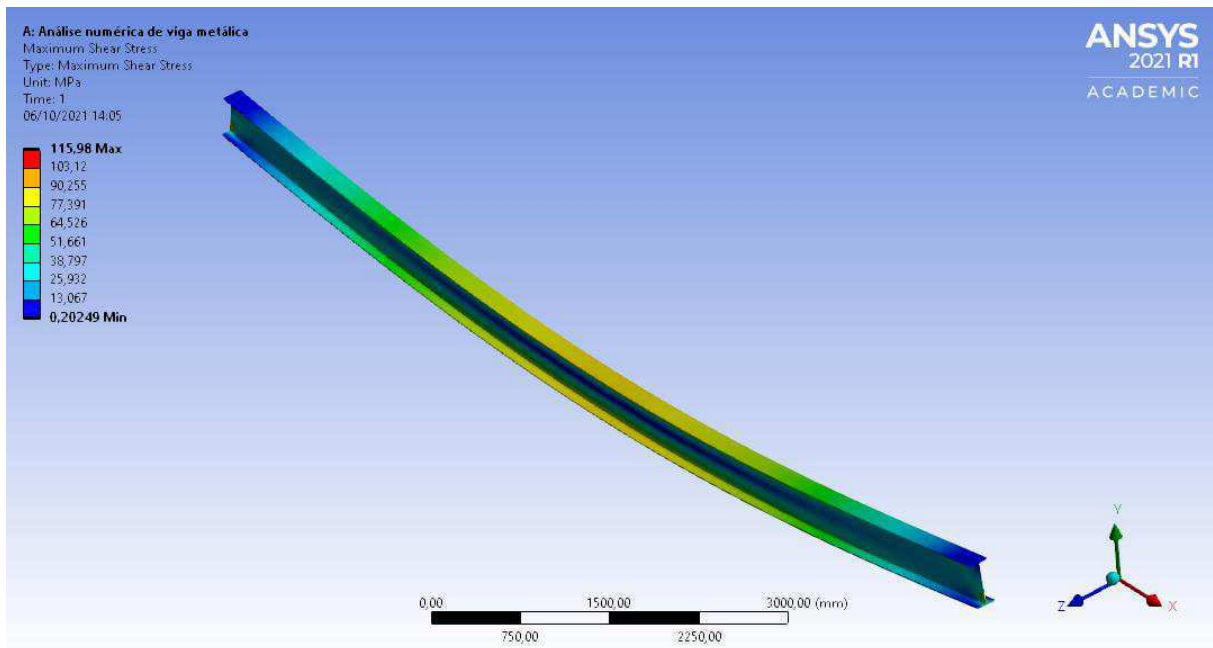
VIGA	δ (mm)
METÁLICA	46,50
C25	17,09
C30	16,64
C35	16,37
C40	16,12
C50	15,57
C60	15,37
C70	15,28
C80	15,09
C90	14,92

Fonte: Autor, 2021.

C.2 Tensão de cisalhamento

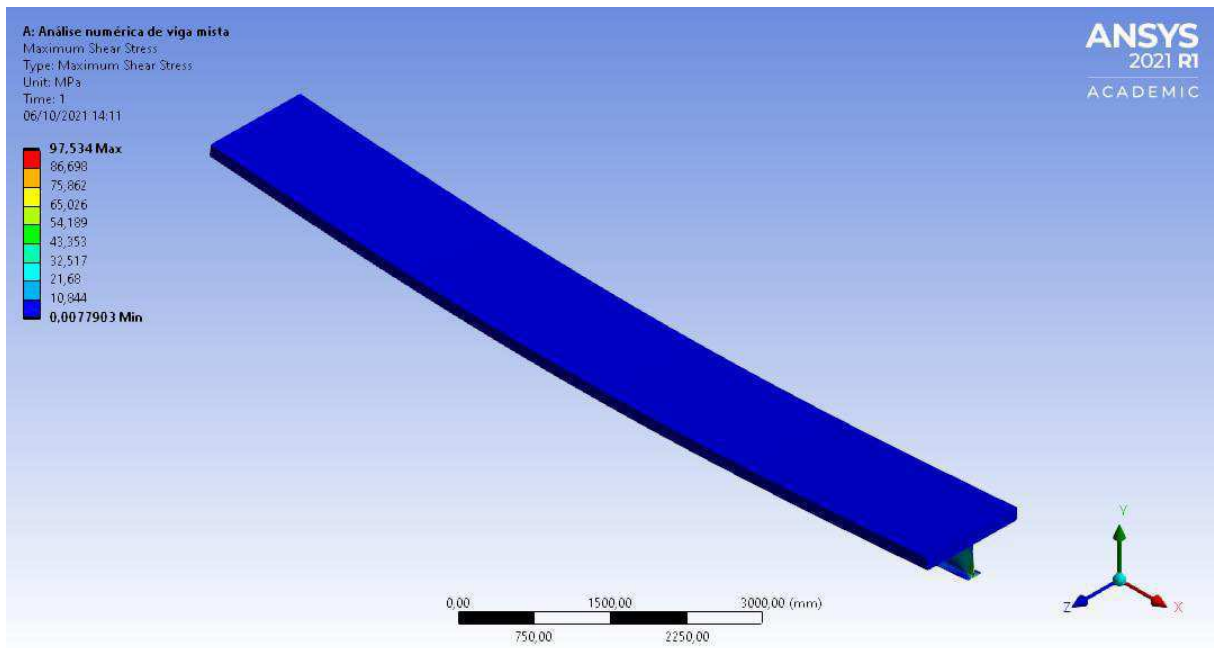
Nas figuras abaixo, são apresentados os dados da *Maximum Shear Stress*, que retorna as tensões de cisalhamento ao longo da viga.

Figura 41 – Tensão de cisalhamento incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75.



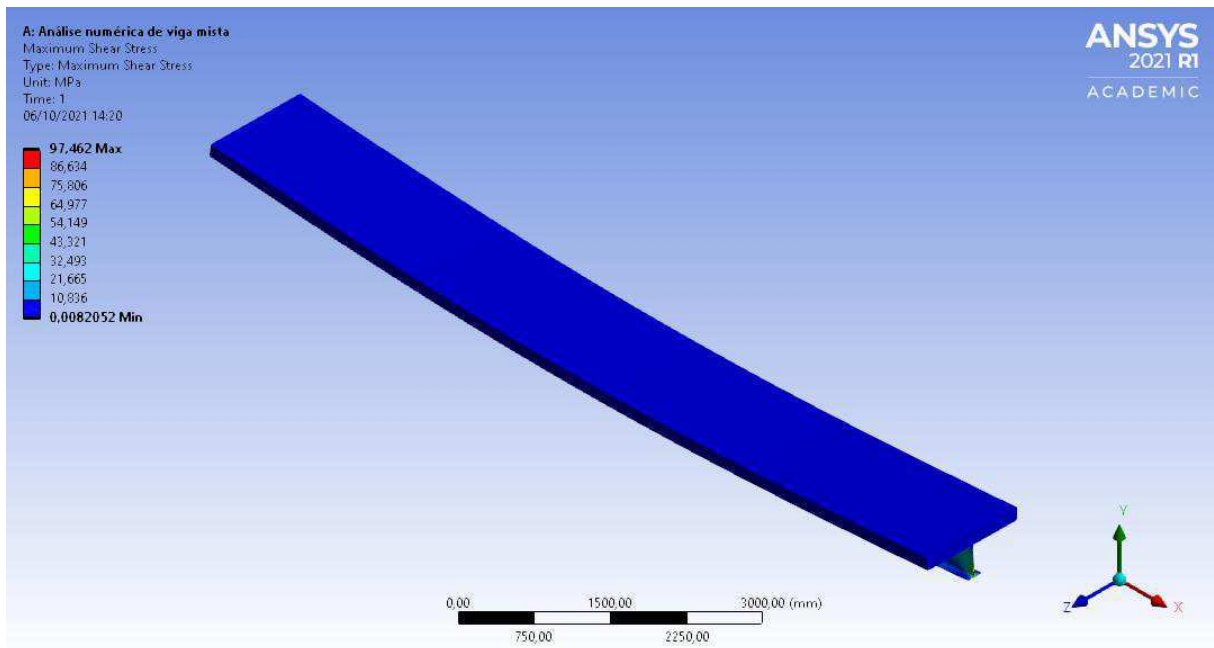
Fonte: Autor, 2021.

Figura 42 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.



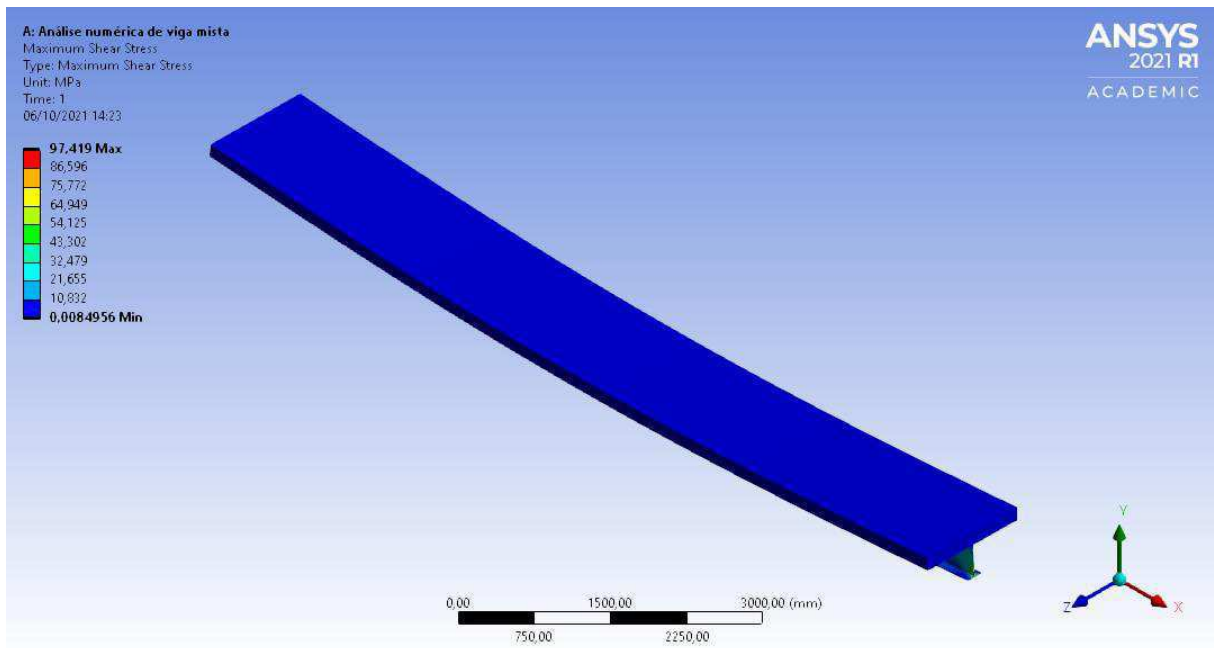
Fonte: Autor, 2021.

Figura 43 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.



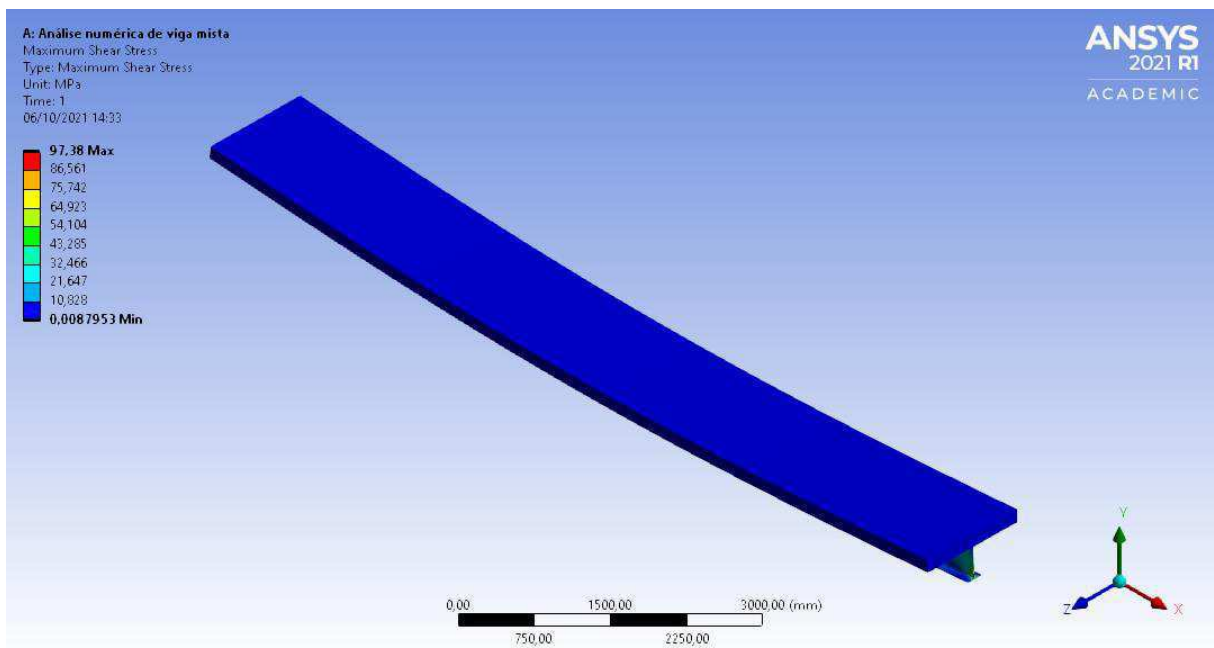
Fonte: Autor, 2021.

Figura 44 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.



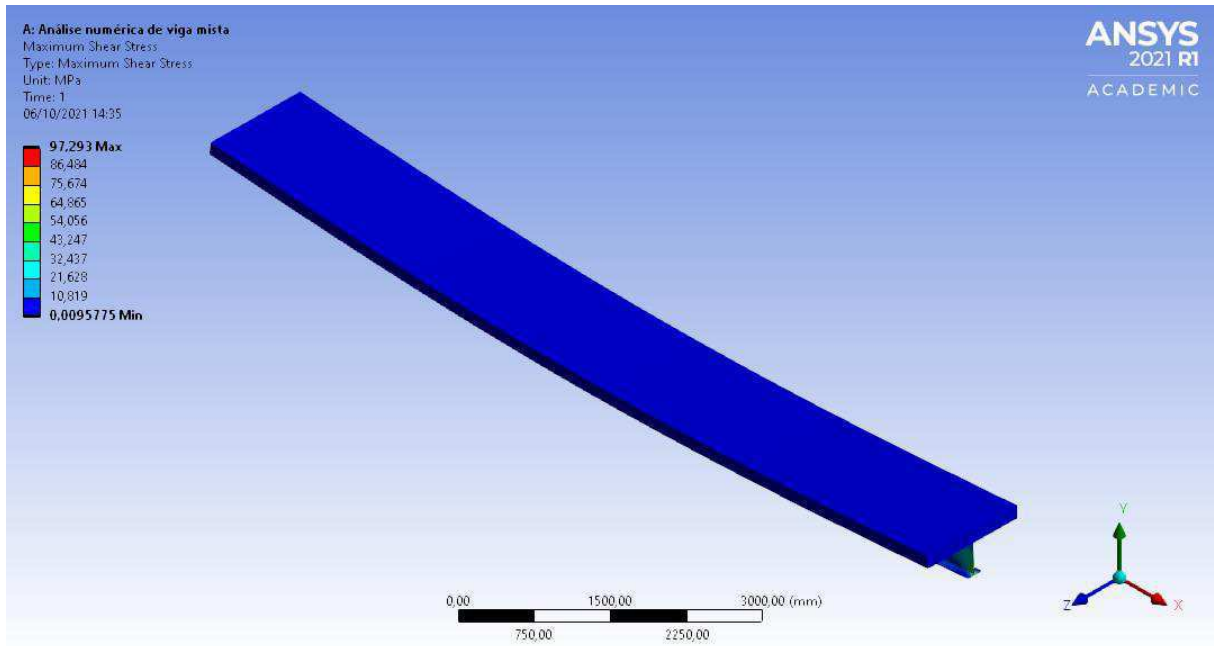
Fonte: Autor, 2021.

Figura 45 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.



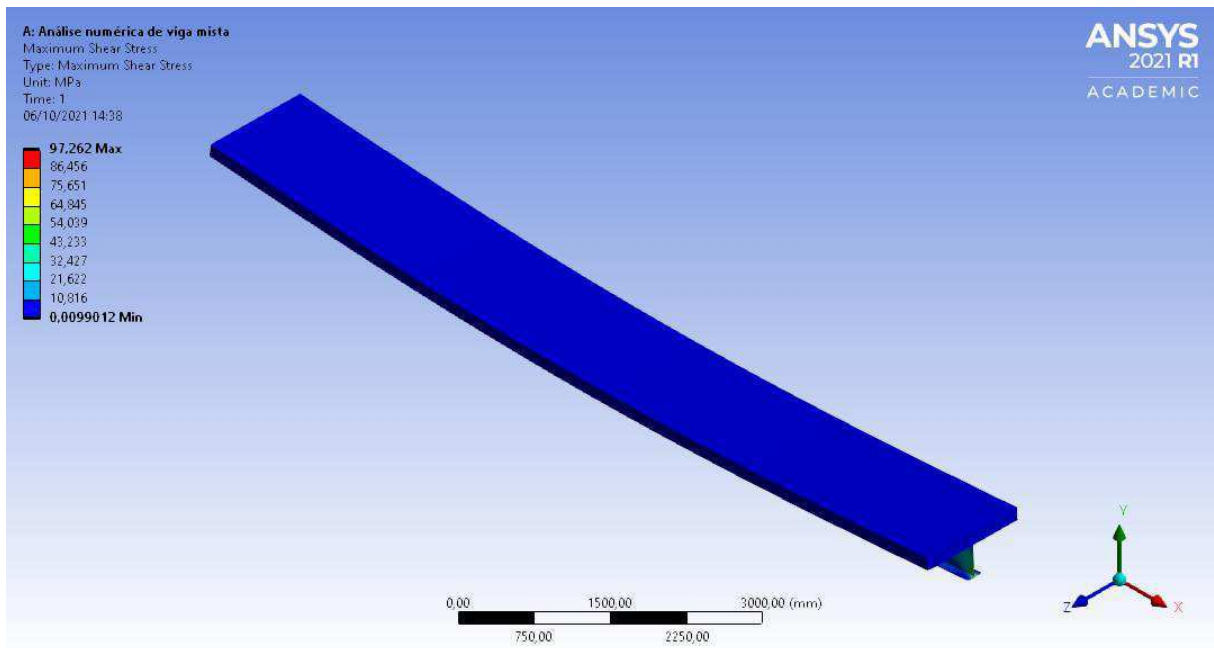
Fonte: Autor, 2021.

Figura 46 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.



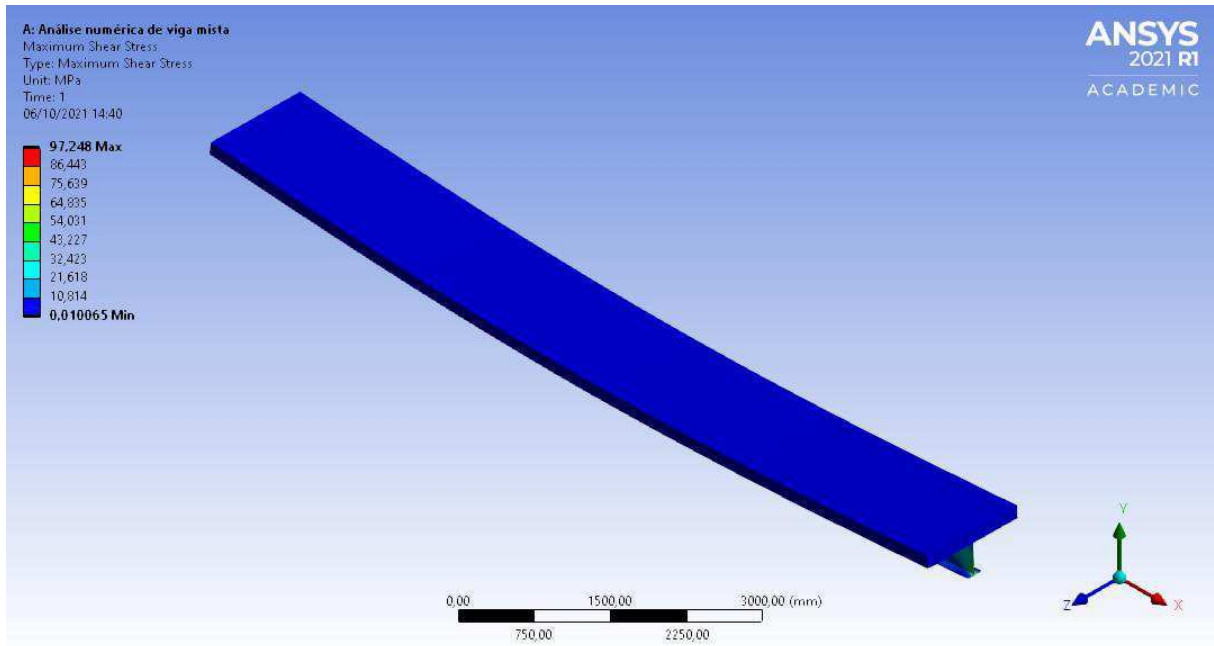
Fonte: Autor, 2021.

Figura 47 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.



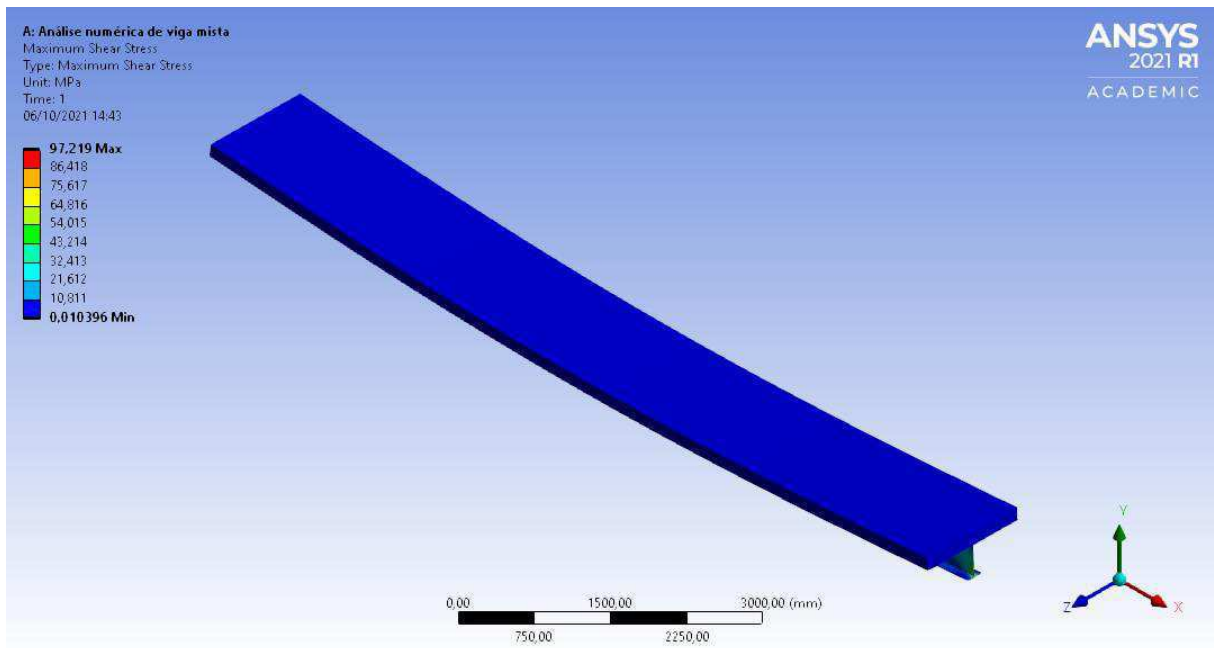
Fonte: Autor, 2021.

Figura 48 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.



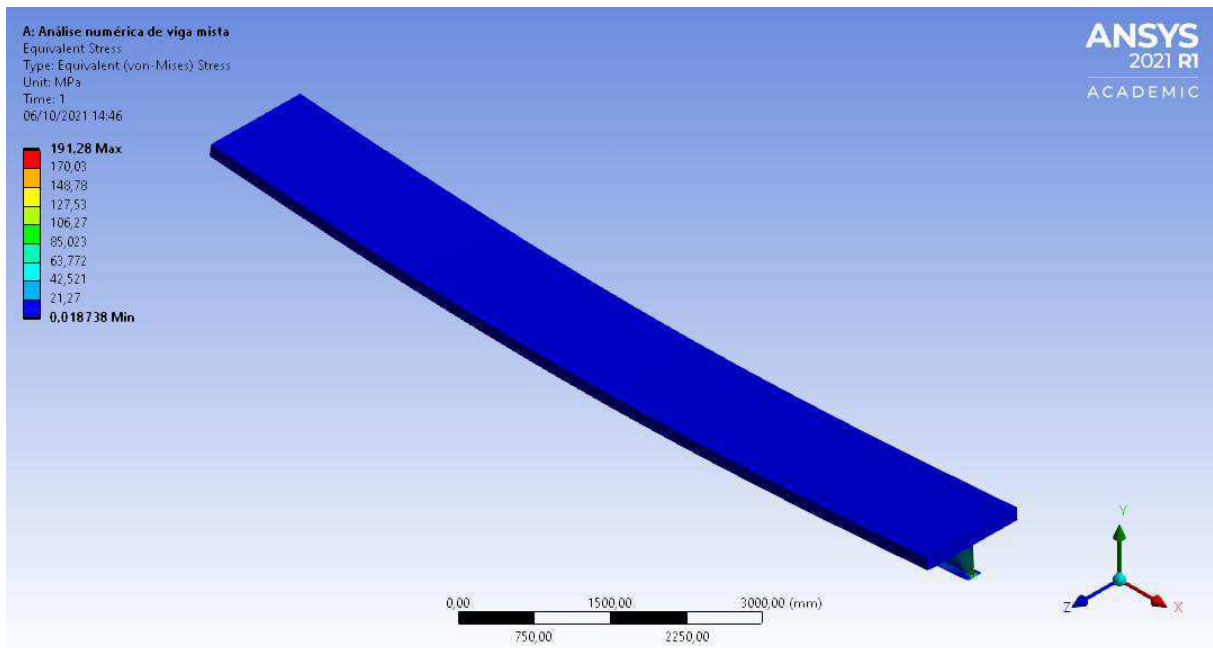
Fonte: Autor, 2021.

Figura 49 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 50 – Tensão de cisalhamento incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 8, estão destacados os valores máximos para a tensão de cisalhamento das vigas, que ocorre em sua extremidade, na região inferior da alma do perfil metálico.

Tabela 8 – Tensões de cisalhamento máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.

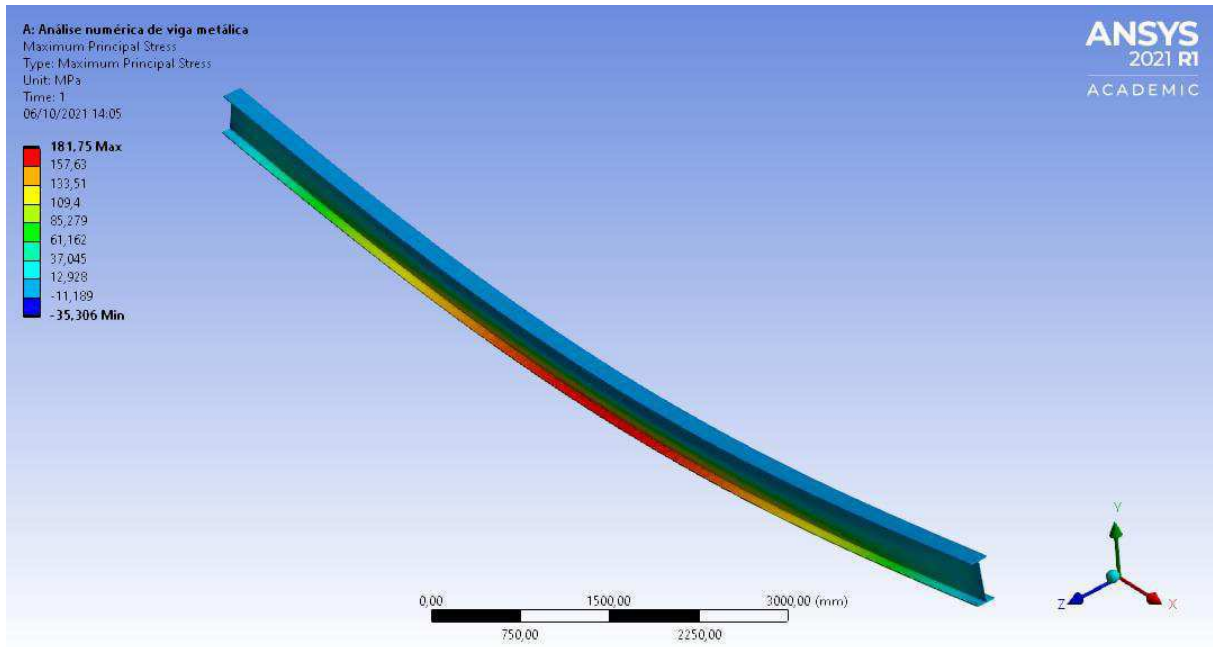
VIGA	σ_v (MPa)
METÁLICA	115,98
C25	97,53
C30	97,46
C35	97,42
C40	97,38
C50	97,29
C60	97,26
C70	97,25
C80	97,22
C90	97,19

Fonte: Autor, 2021.

C.3 Tensão principal máxima

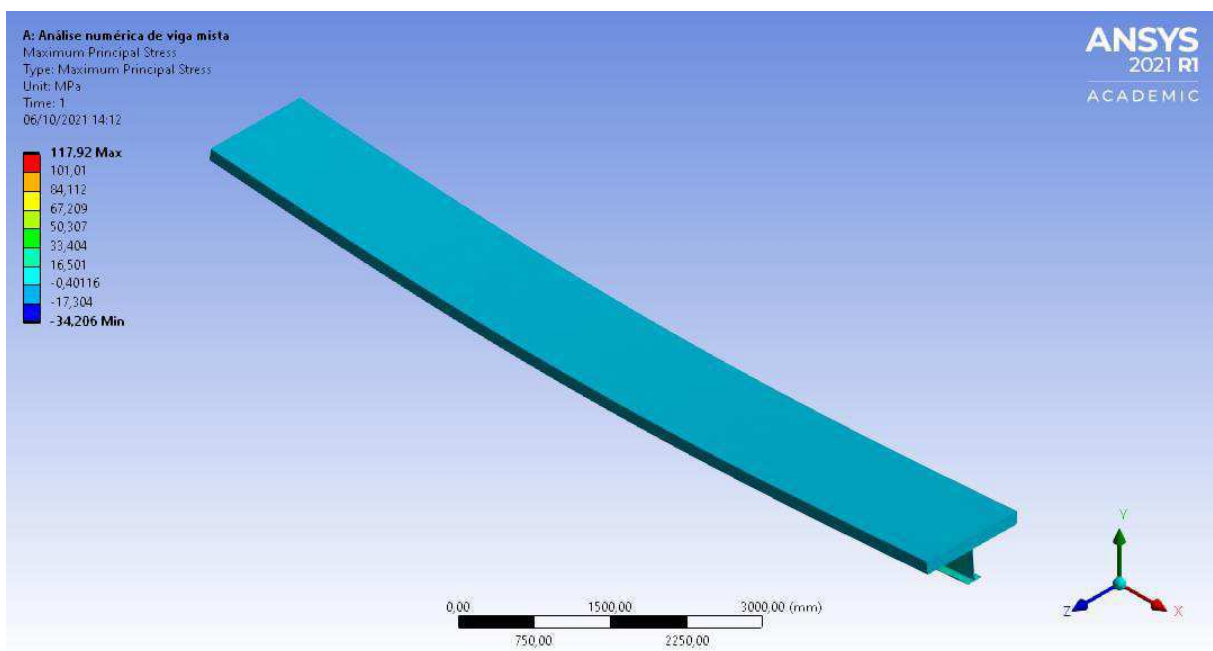
Na sequência de figuras abaixo, estão listados os resultados de *Maximum Principal Stress*, que retorna a tensão máxima à flexão incidente na peça, tendo os valores positivos associados à tração e, os negativos, à compressão.

Figura 51 – Tensão de flexão máxima incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75.



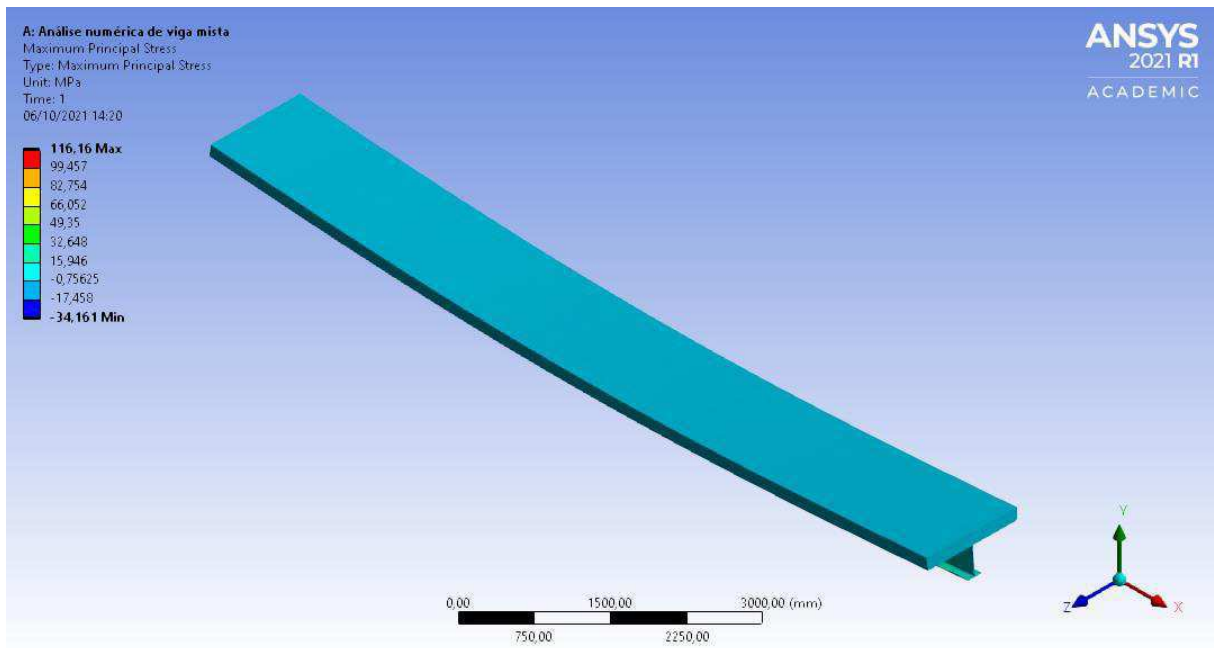
Fonte: Autor, 2021.

Figura 52 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 25 MPa.



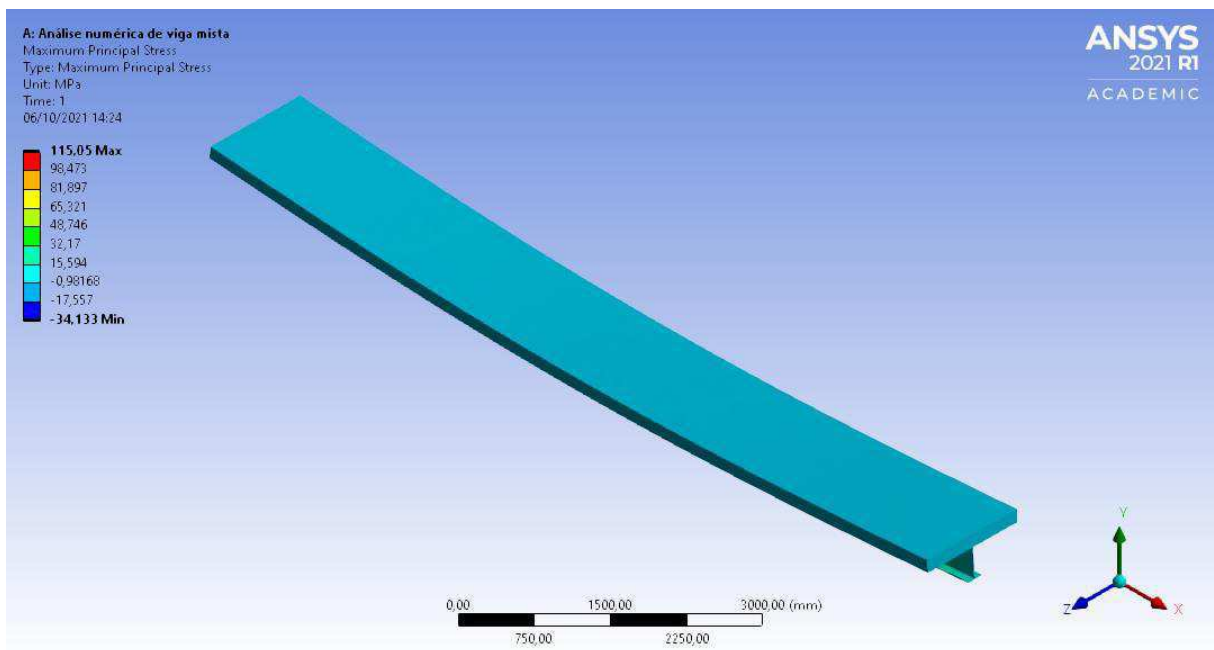
Fonte: Autor, 2021.

Figura 53 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 30 MPa.



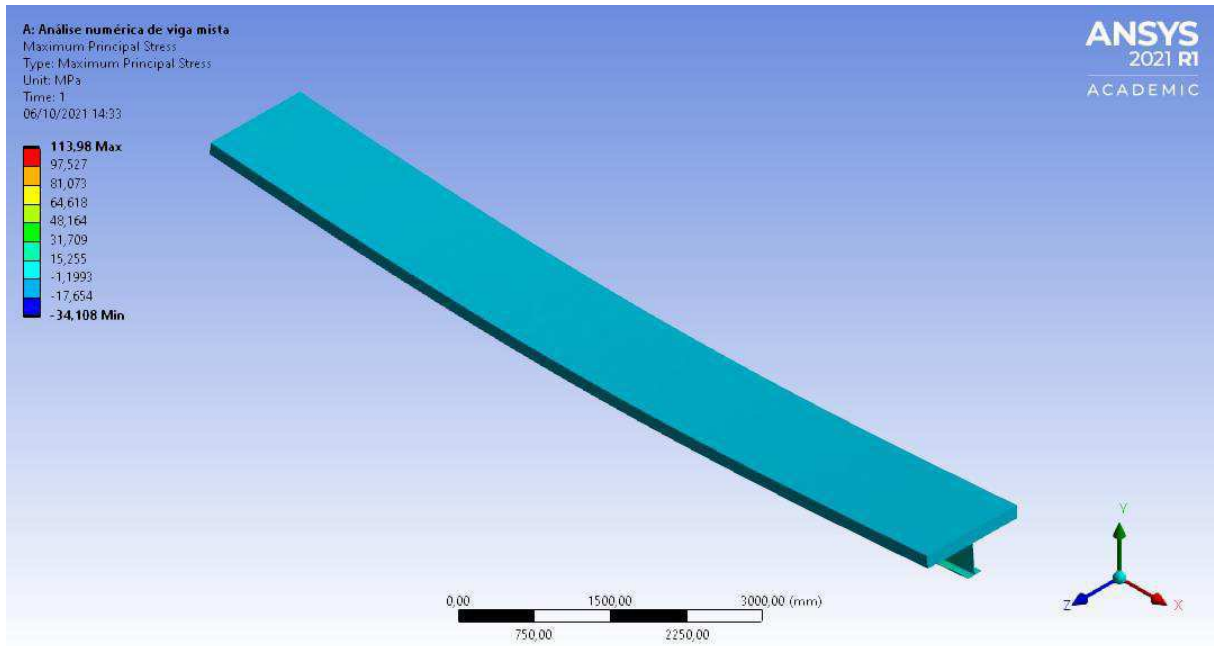
Fonte: Autor, 2021.

Figura 54 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.



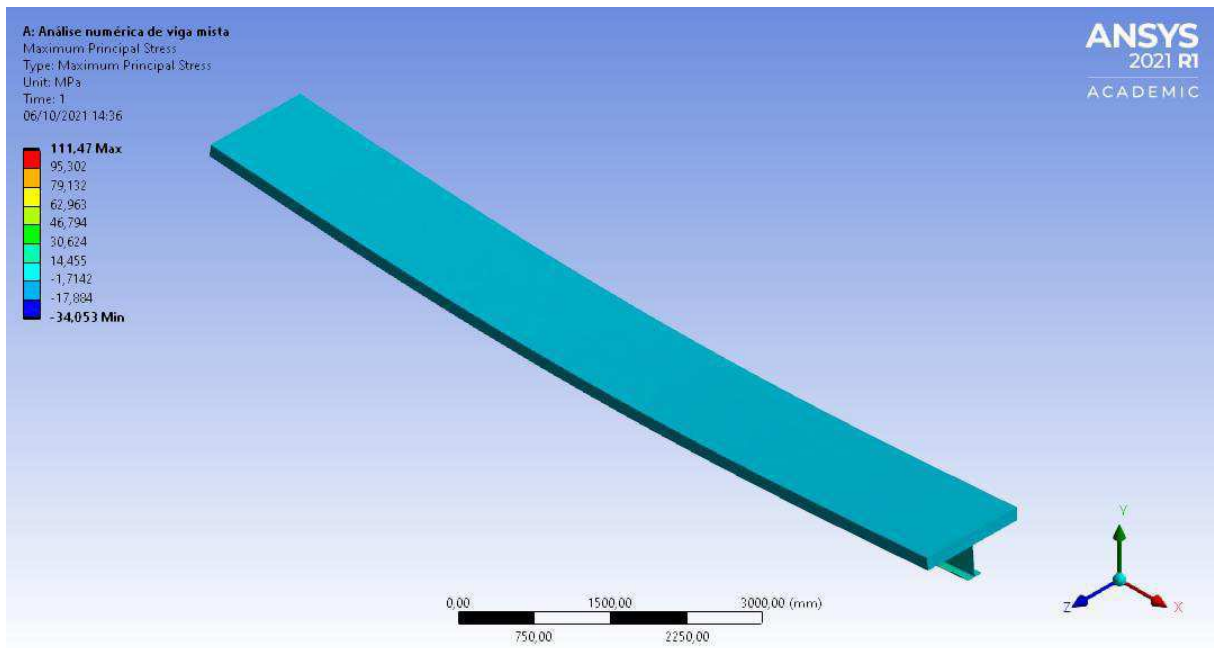
Fonte: Autor, 2021.

Figura 55 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.



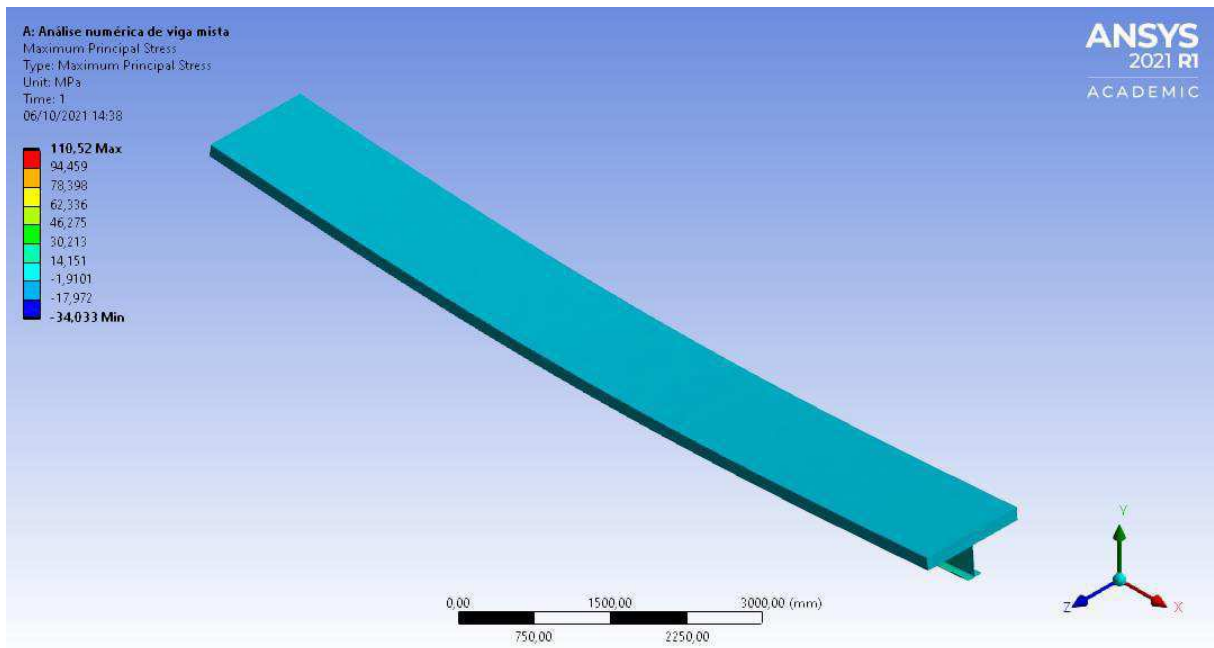
Fonte: Autor, 2021.

Figura 56 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.



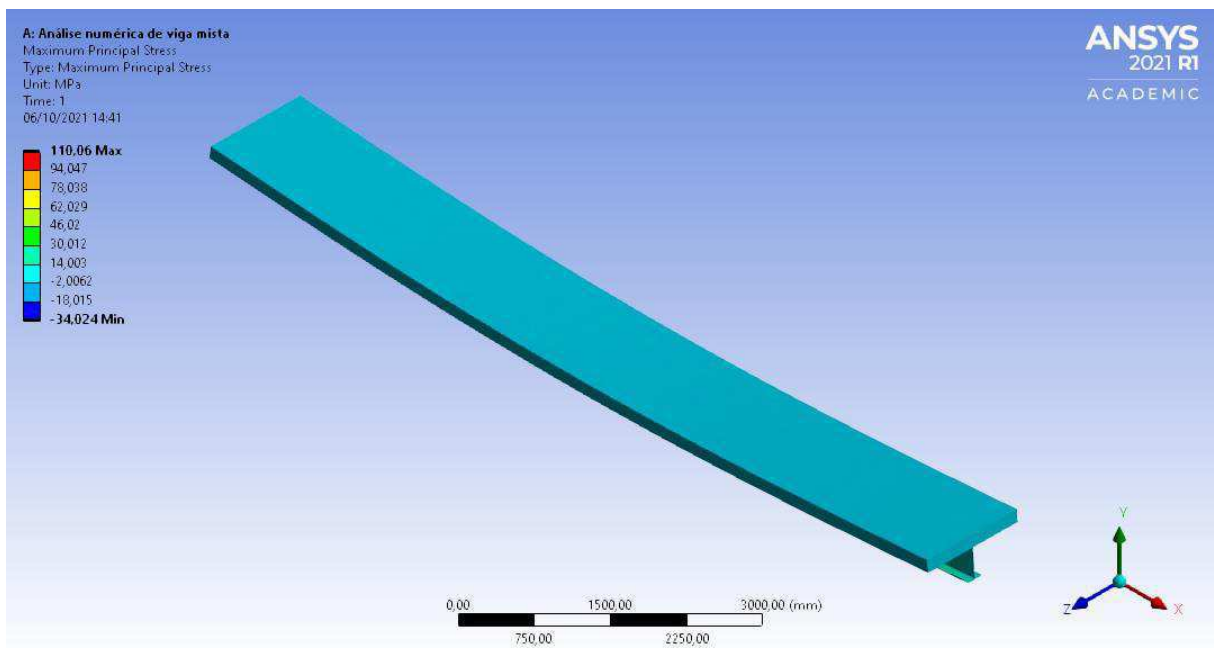
Fonte: Autor, 2021.

Figura 57 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.



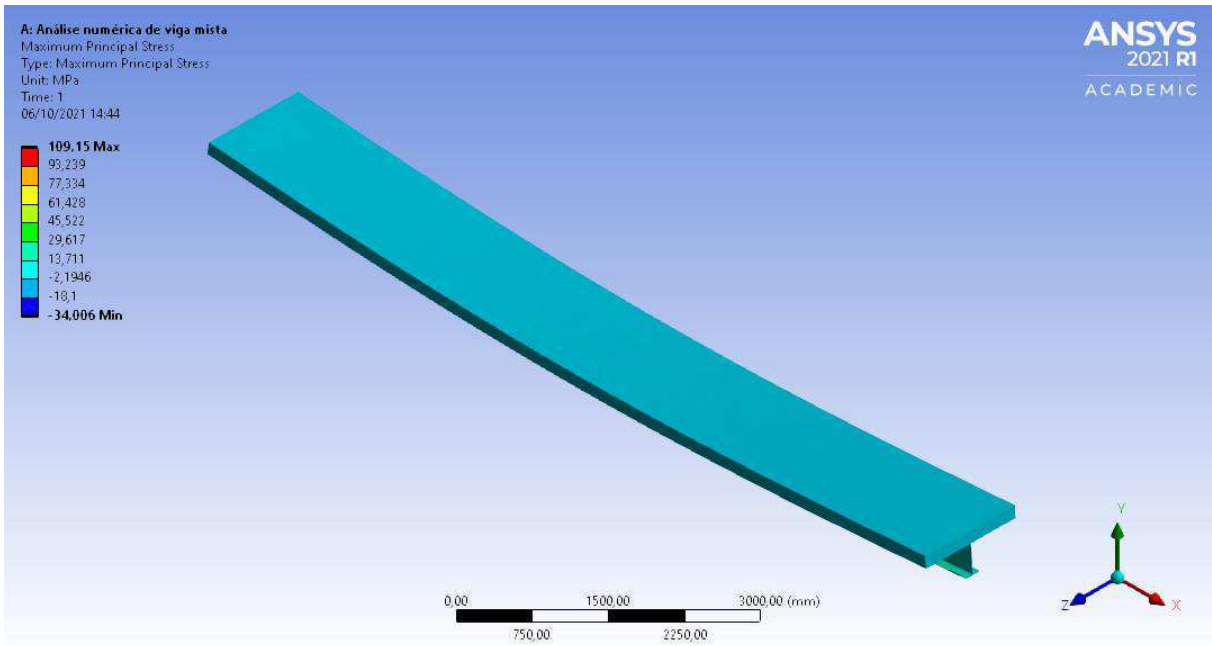
Fonte: Autor, 2021.

Figura 58 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.



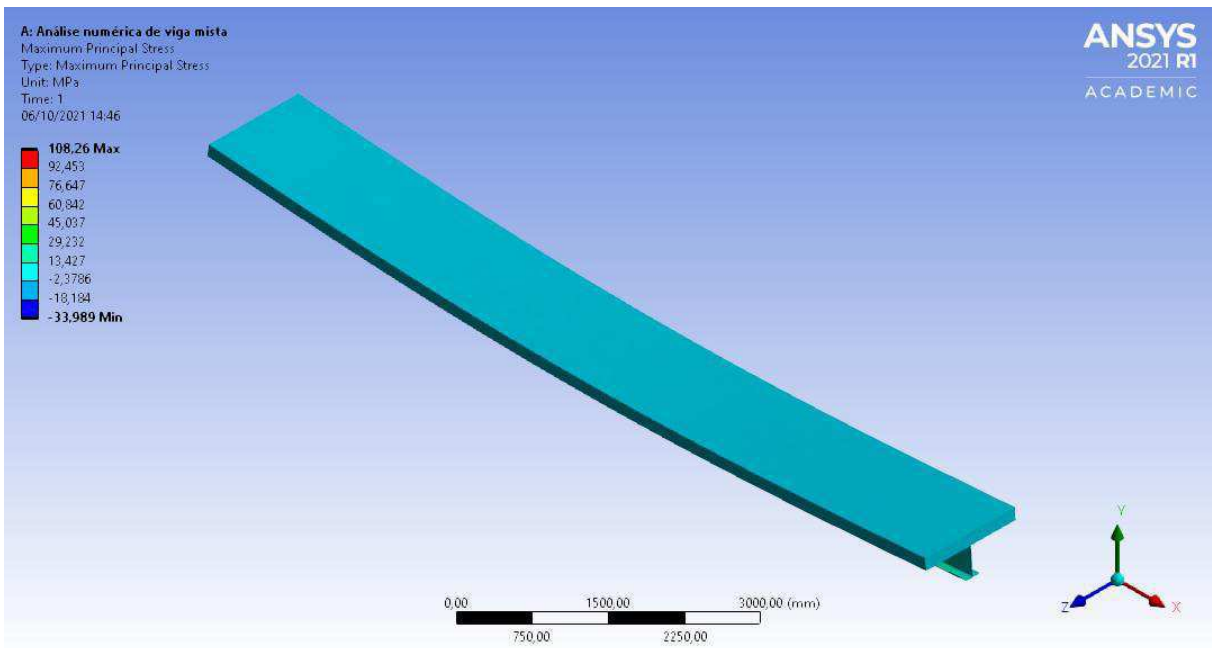
Fonte: Autor, 2021.

Figura 59 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 60 – Tensão de flexão máxima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 9, estão destacados os valores máximos para a tensão gerada pela flexão das vigas. A região mais tracionada na peça ocorre na mesa inferior do perfil, no meio do vão, enquanto a maior zona de compressão ocorre na mesma região com maior tensão de cisalhamento, ou seja, em sua extremidade, na região inferior da alma do perfil metálico.

Tabela 9 – Tensões de flexão máximas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.

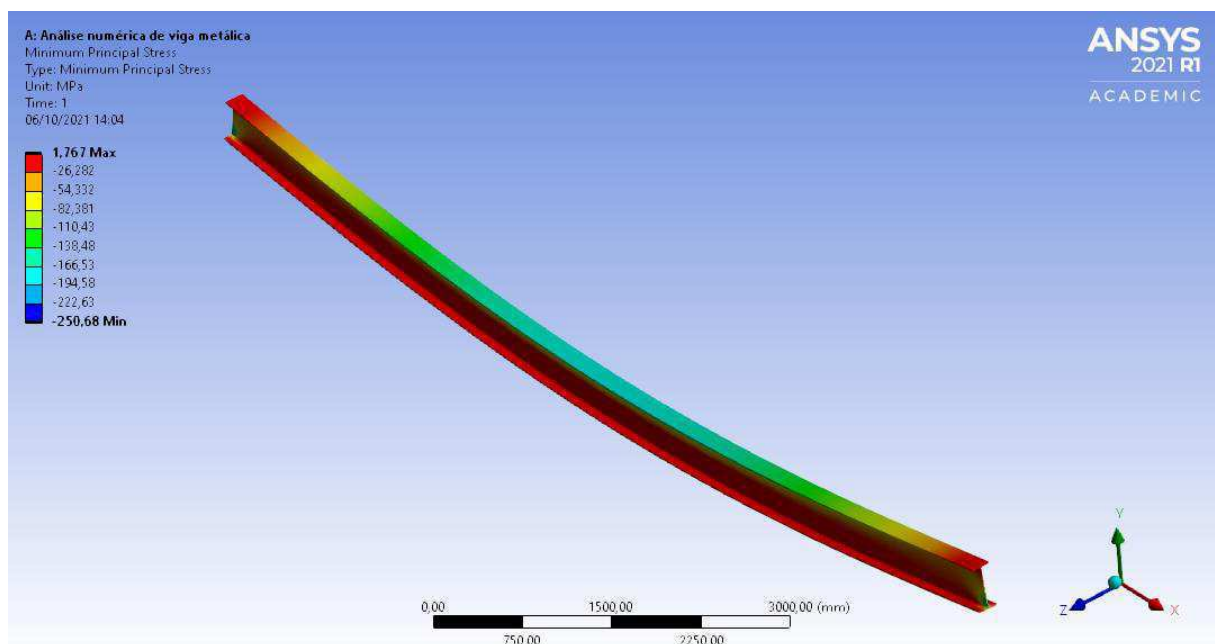
VIGA	σ_{\max}^+ (MPa)	σ_{\max}^- (MPa)
METÁLICA	181,75	35,31
C25	117,92	34,21
C30	116,16	34,16
C35	115,05	34,13
C40	113,98	34,11
C50	111,47	34,05
C60	110,52	34,03
C70	110,06	34,02
C80	109,15	34,00
C90	108,26	33,99

Fonte: Autor, 2021.

C.4 Tensão principal mínima

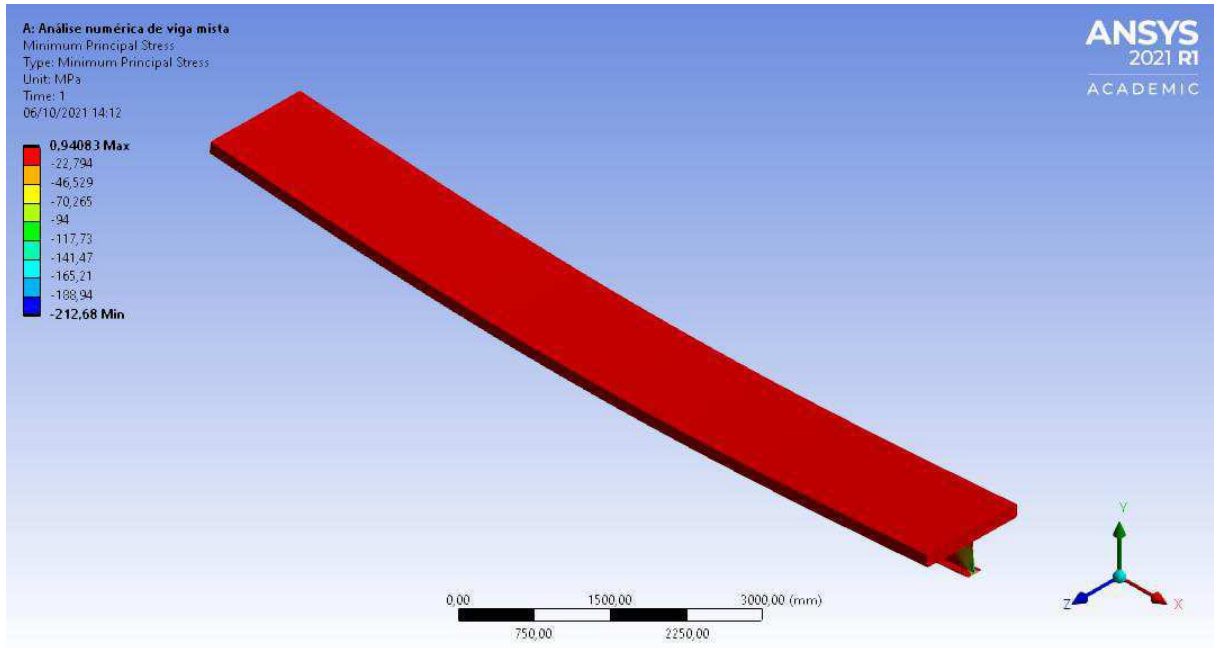
Na sequência de figuras abaixo, estão listados os resultados de *Minimum Principal Stress*, que retorna a tensão máxima à flexão incidente na peça, tendo os valores positivos associados à tração e, os negativos, à compressão.

Figura 61 – Tensão de flexão mínima incidente na viga metálica com perfil W 410 X 75.



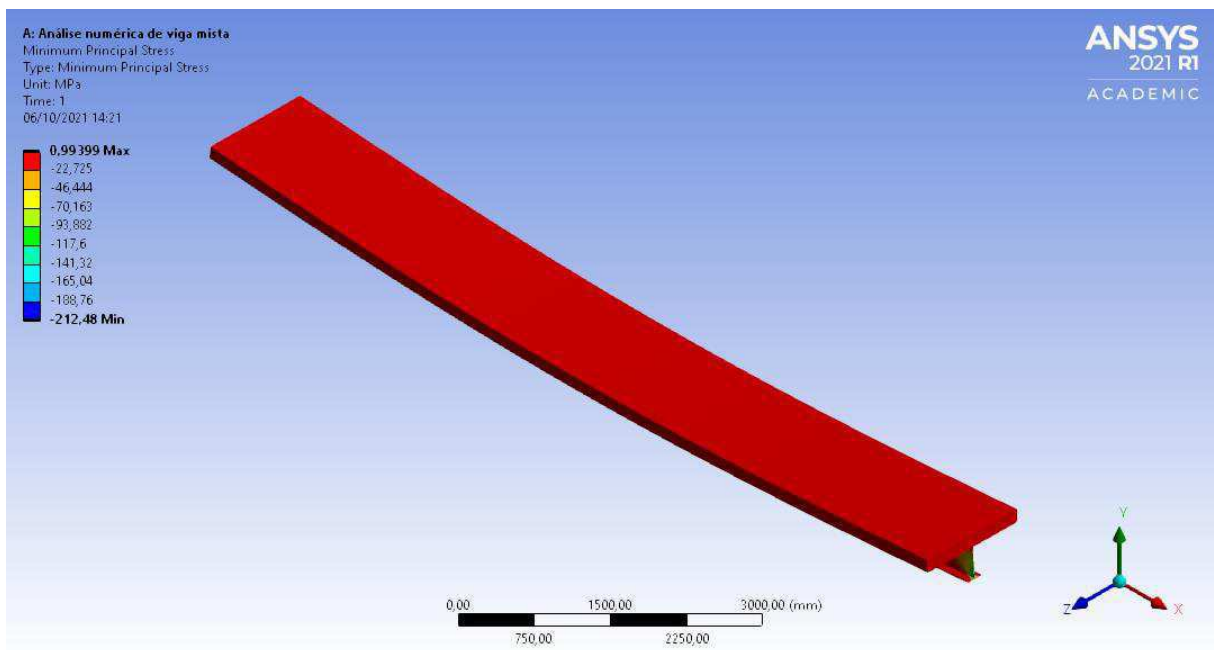
Fonte: Autor, 2021.

Figura 62 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 25 MPa.



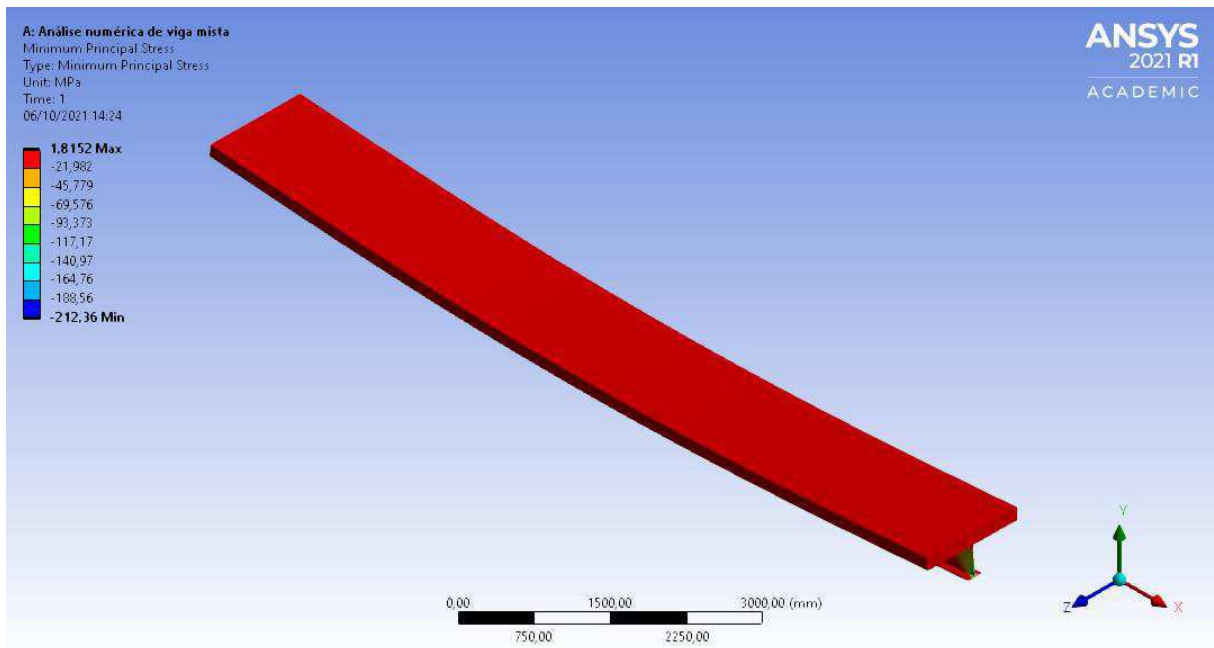
Fonte: Autor, 2021.

Figura 63 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto f_{ck} 30 MPa.



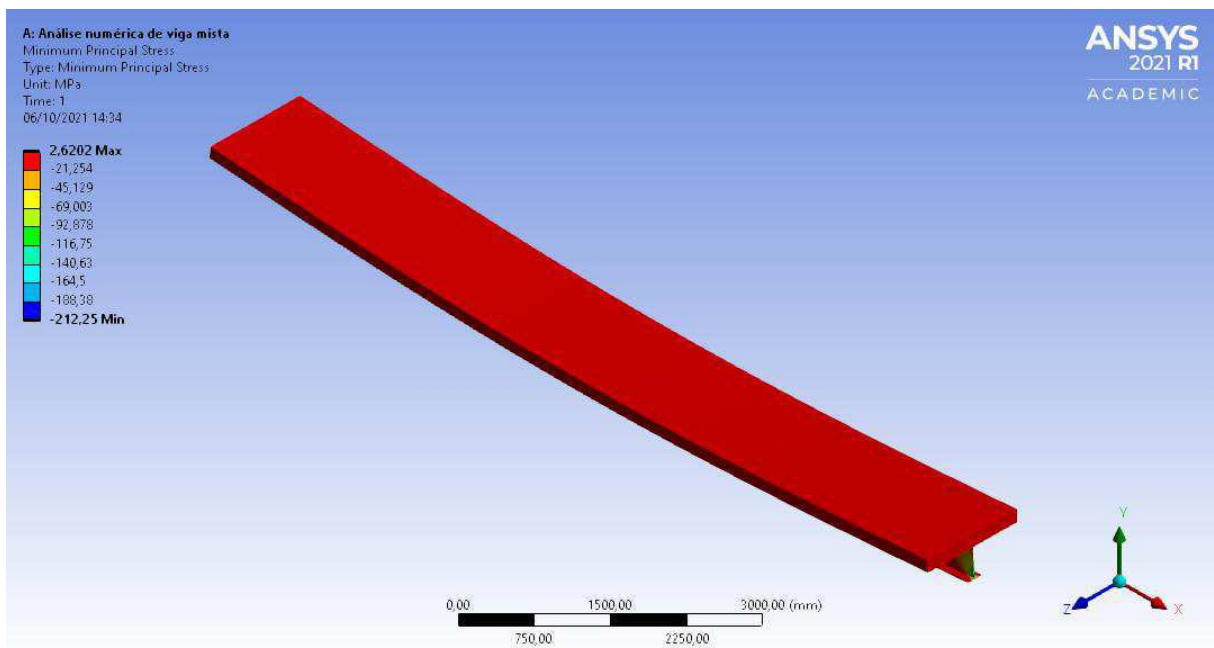
Fonte: Autor, 2021.

Figura 64 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 35 MPa.



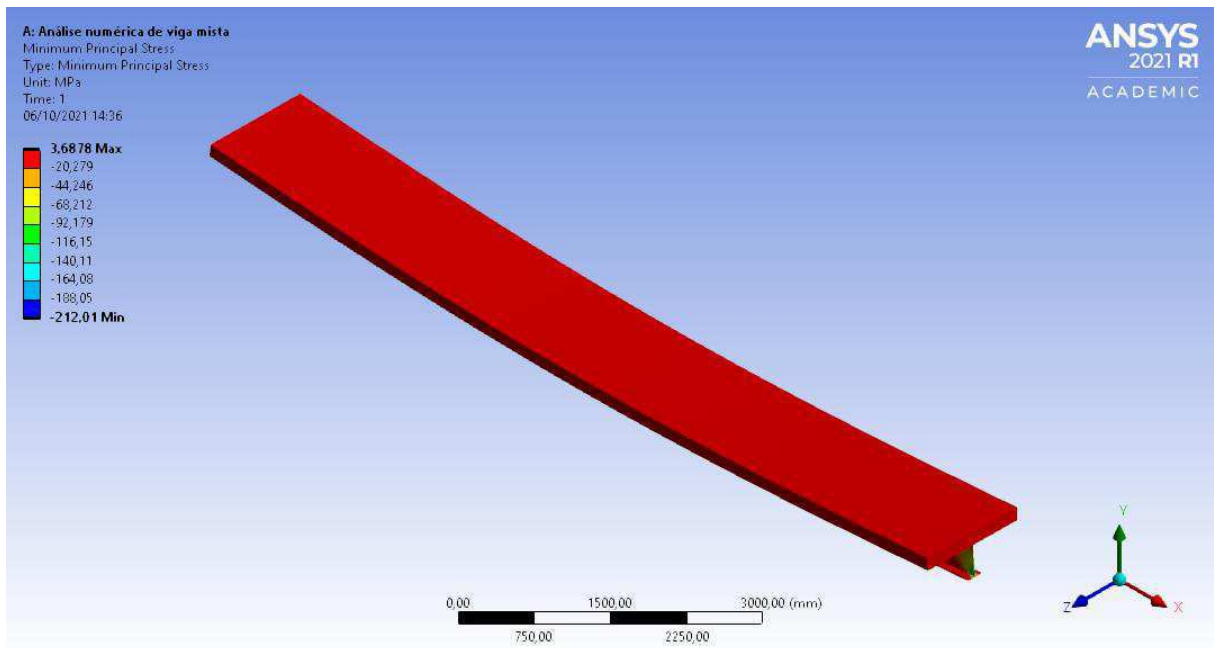
Fonte: Autor, 2021.

Figura 65 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 40 MPa.



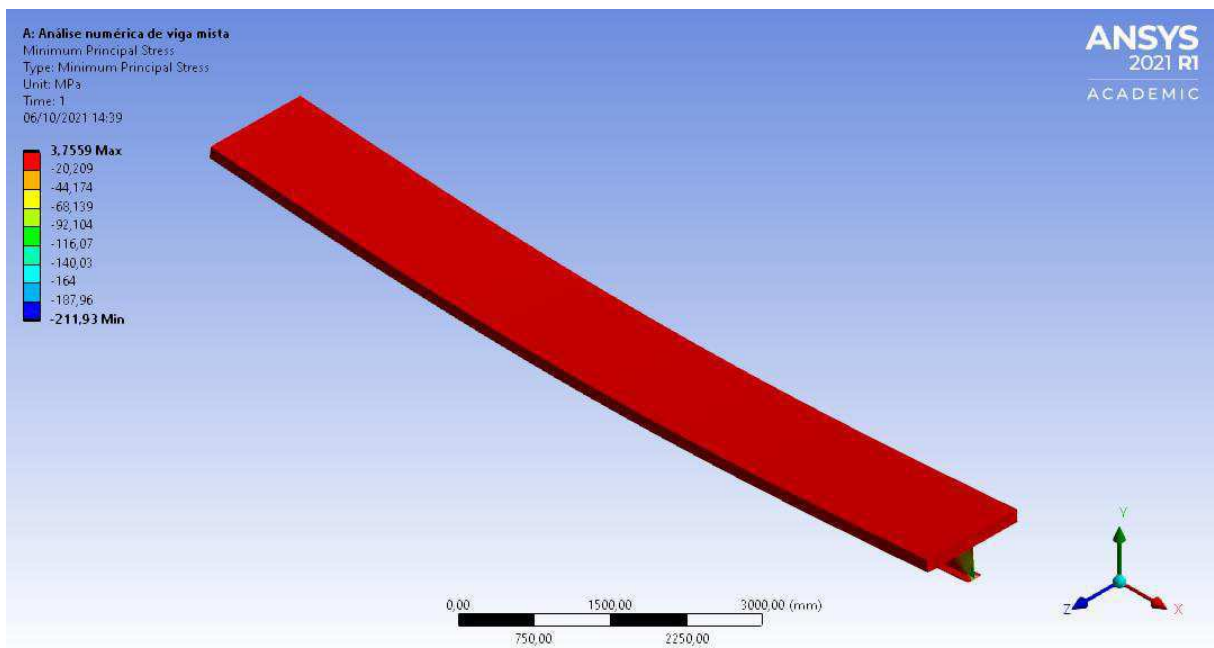
Fonte: Autor, 2021.

Figura 66 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 50 MPa.



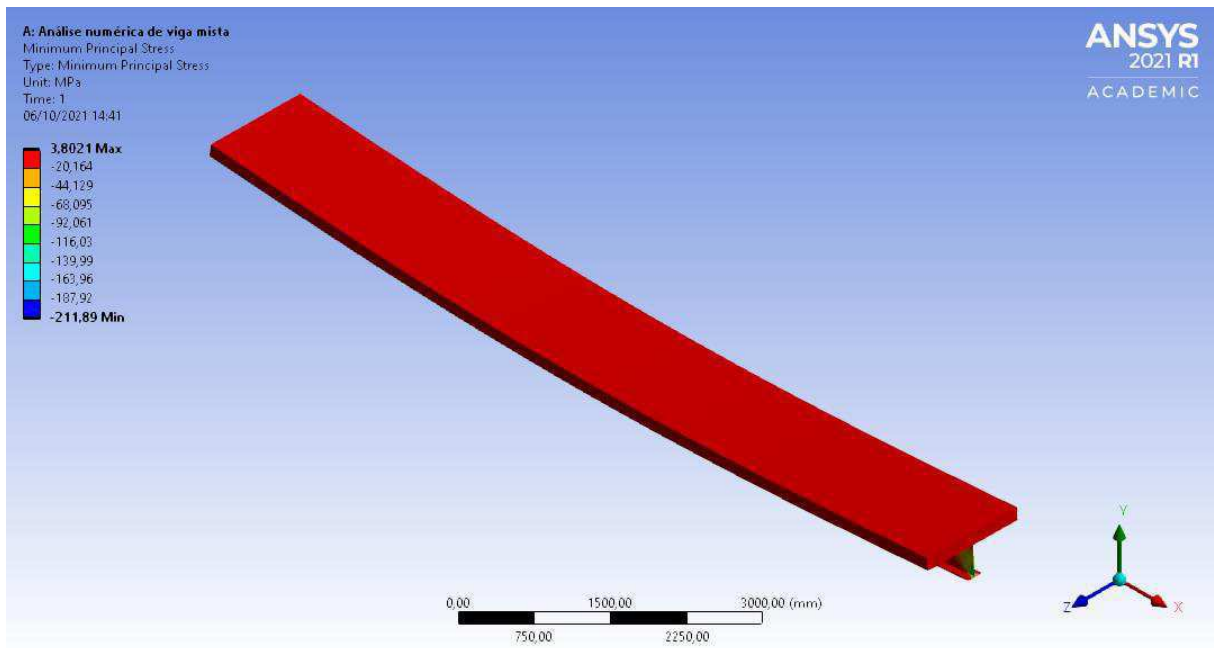
Fonte: Autor, 2021.

Figura 67 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 60 MPa.



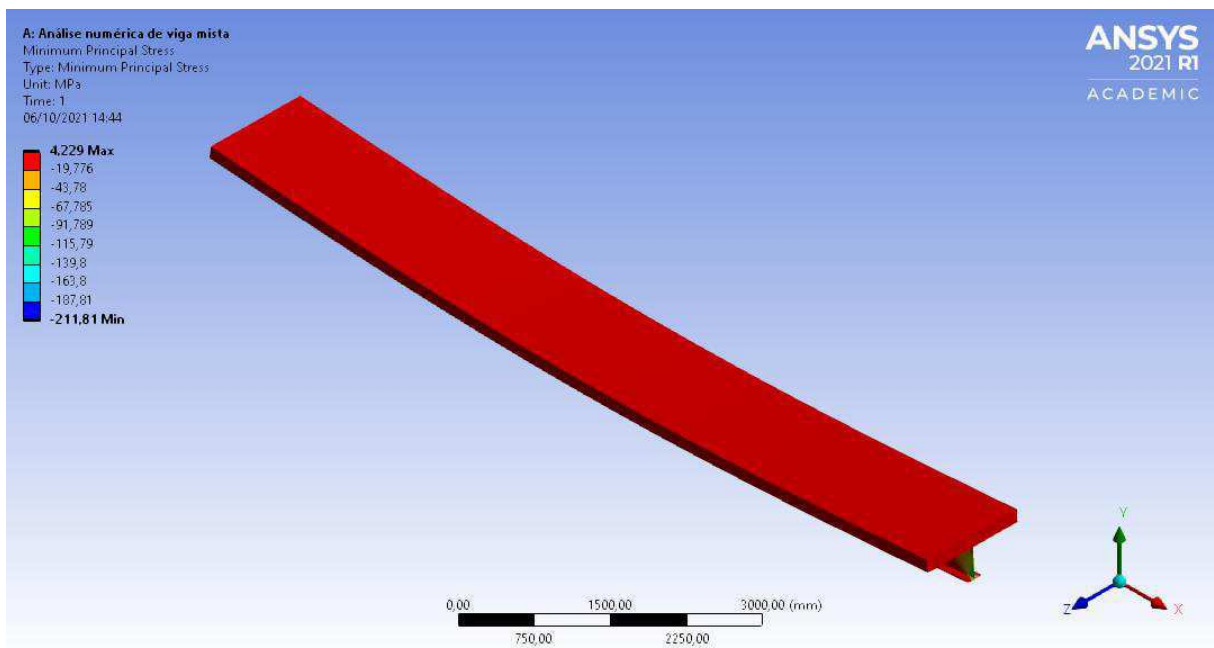
Fonte: Autor, 2021.

Figura 68 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 70 MPa.



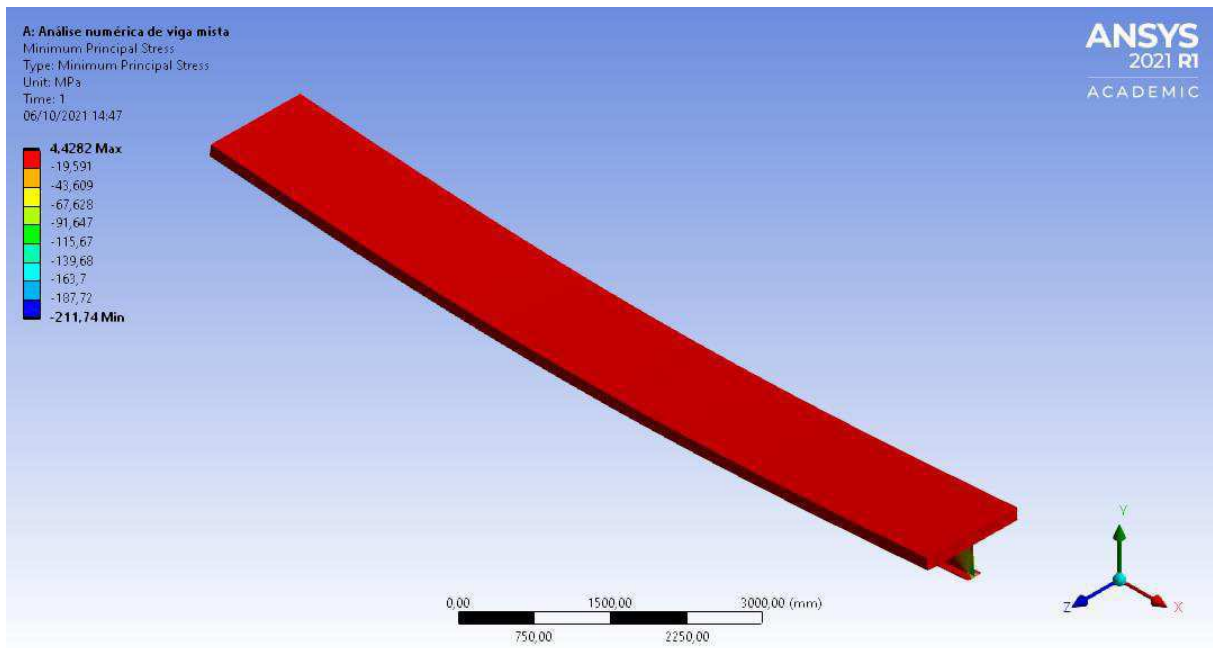
Fonte: Autor, 2021.

Figura 69 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 80 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 70 – Tensão de flexão mínima incidente na viga mista com perfil W 410 X 75 e mesa colaborante de concreto fck 90 MPa.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 10, estão destacados os valores mínimos para a tensão gerada pela flexão das vigas. A região mais tracionada na peça ocorre na mesa inferior do perfil, no meio do vão, enquanto a maior zona de compressão ocorre na mesma região com maior tensão de cisalhamento, ou seja, em sua extremidade, na região inferior da alma do perfil metálico.

Tabela 10 – Tensões de flexão mínimas das vigas obtidas a partir do método dos elementos finitos.

VIGA	σ_{\min}^+ (MPa)	σ_{\min}^- (MPa)
S/MESA	1,77	250,68
C25	0,94	212,68
C30	0,99	212,48
C35	1,81	212,36
C40	2,62	212,25
C50	3,69	212,01
C60	3,76	211,93
C70	3,80	211,89
C80	4,23	211,81
C90	4,43	211,74

Fonte: Autor, 2021.