

Josllanda Thaynara Leite Schussler

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO
CONVENCIONAIS E COM APLICAÇÃO DE PROTENSÃO EXTERNA EM PONTES

Palmas – TO

2020

Josllanda Thaynara Leite Schussler

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO
CONVENCIONAIS E COM APLICAÇÃO DE PROTENSÃO EXTERNA EM PONTES

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.Sc Daniel Iglesias de Carvalho

Palmas – TO

2020

Josllanda Thaynara Leite Schussler

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO
CONVENCIONAIS E COM APLICAÇÃO DE PROTENSÃO EXTERNA EM PONTES

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia civil pelo Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.Sc Daniel Iglesias de Carvalho

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc Daniel Iglesias de Carvalho

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof. M.Sc. Dênis Cardoso Parente

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof. M.Sc Leondiniz Gomes

Palmas – TO

2020

Dedico este trabalho à minha filha Maitê Schussler
Cunha, minha maior motivação.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à Deus, pela vida, e por sua infinita bondade de me conceder tamanha conquista.

Aos meus pais Vilmar Pedro e Maria Sônia, pelo amor e apoio, pela confiança depositada em mim e por nunca medirem esforços para que eu conquistasse essa graduação. A vocês a minha eterna admiração e gratidão.

Ao meu esposo João Neto, pelo incentivo diário, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos e, principalmente, por suprir com tamanha dedicação a minha ausência com a nossa filha nos últimos períodos de graduação. Obrigada pelo amor, cuidado e compreensão.

À minha irmã Hyolle, por ser minha melhor amiga, pelo companheirismo e por acreditar na minha capacidade; e ao meu irmão Leonardo, pela confiança e incentivo.

À toda a minha família e amigos que direta ou indiretamente contribuíram para essa realização, em especial à Terezinha, por não ter medido esforços para ajudar quando mais precisei; e minha amiga Karol, pela amizade e parceria nessa trajetória.

Ao professor Daniel Iglesias, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e por acreditar na realização deste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil do Ceulp/Ulbra por compartilharem seus conhecimentos e por contribuírem tão ricamente para nossa formação profissional.

Especialmente, agradeço à minha filha Maitê, pelo amor infinito, e por ser minha maior razão de determinação e persistência. A você, toda a minha vida, filha.

“A persistência é o menor caminho para o êxito”.
(Charlie Chaplin)

RESUMO

SCHUSSLER, Josllanda Thaynara Leite. **Análise comparativa de vigas longarinas mistas aço-concreto convencionais e com aplicação de protensão externa em pontes**. 2020. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2020.

O presente trabalho discorre sobre a análise do comportamento estrutural de vigas longarinas mistas aço-concreto convencional e com a aplicação de protensão externa em pontes rodoviárias. A pesquisa foi realizada por meio do software ANSYS 2019 R3, na qual foram analisadas quatro vigas longarinas mistas, sendo uma viga mista convencional e três vigas mistas com protensão externa, extraídas a partir de uma ponte referência. Os cabos de protensão externa foram ancorados em três diferentes alturas em relação à mesa inferior da viga, sendo estas 15 cm, 25 cm e 35 cm. Com os resultados obtidos, observou-se que as deformações da viga protendida a 15 cm da mesa inferior foram reduzidas em 15,19% na laje de concreto e 15,32% na viga metálica; e a 25 cm da mesa inferior foram reduzidas em 8,98% na laje de concreto e 8,87% na viga metálica, em comparação a viga mista convencional. Entretanto, com os cabos ancorados a 35 cm a deformação aumentou em 0,19% na laje e 0,34% na viga, devido a protensão propiciar na estrutura um acréscimo de força de compressão. Analisando as tensões normais, verificou-se que, no meio do vão as tensões de compressão na laje obtiveram um aumento com a aplicação da protensão, com acréscimos nas vigas 15 cm, 25 cm e 35 cm acima da mesa inferior de 3,98%, 8,74% e 13,87%, respectivamente, comparadas a viga mista convencional. Na mesa superior das vigas a protensão ocasionou-se uma modificação das tensões, na qual a viga mista convencional apresentou tensão de tração, e as vigas protendidas resultaram em tensões de compressão, sendo a viga com 15 cm acima da mesa inferior a menor tensão de compressão, com diferenças de 48,82% e 91,28% comparada as vigas 25 cm e 35 cm acima da mesa inferior. Na mesa inferior todas as vigas protendidas obtiveram melhor comportamento estrutural comparadas a viga mista convencional, com reduções nos valores de tensões normais de tração de 29,41%, 27,97% e 23,83%, respectivamente, nas vigas 15 cm, 25 cm e 35 cm acima mesa inferior. Os valores máximos de tensões de tração e compressão apresentaram-se nas extremidades das vigas mistas, tanto nos apoios quanto na placa da ancoragem. Conclui-se que a protensão externa proporciona à viga mista aço-concreto um melhor comportamento estrutural em sua extensão, tanto em deformações quanto em tensões normais, e que a aplicação da protensão próximo à mesa inferior apresentou-se mais satisfatória.

Palavras-chave: Vigas longarinas. Estrutura mista aço-concreto. Protensão externa. Comportamento Estrutural.

ABSTRACT

SCHUSSLER, Josllanda Thaynara Leite. **Comparative analysis of conventional steel-concrete beam joists with application of external prestressing to bridges**. 2020. 100 f. Course Conclusion Paper (Graduation) - Civil Engineering Course, Lutheran University Center of Palmas, Palmas / TO, 2020.

The present work discusses the analysis of the structural behavior of conventional steel-concrete beam joists and with the application of external prestressing on road bridges. The research was carried out using the ANSYS 2019 R3 software, in which four composite beam members were analyzed, one conventional composite beam and three composite beams with external prestressing, extracted from a reference bridge. The external prestressing cables were anchored at three different heights in relation to the lower beam table, these being 15 cm, 25 cm and 35 cm. With the results obtained, it was observed that the deformations of the prestressed beam at 15 cm from the lower table were reduced by 15.19% in the concrete slab and 15.32% in the metal beam; and 25 cm from the lower table were reduced by 8.98% in the concrete slab and 8.87% in the metal beam, compared to the conventional mixed beam. However, with the cables anchored at 35 cm, the deformation increased by 0.19% on the slab and 0.34% on the beam, due to prestressing providing an increase in the compression force in the structure. Analyzing the normal stresses, it was found that, in the middle of the span, the compression stresses in the slab increased with the application of prestressing, with increases in the beams 15 cm, 25 cm and 35 cm above the lower table of 3.98%, 8.74% and 13.87%, compared to the conventional mixed beam. In the upper table of the beams the prestressing caused a modification of the stresses, in which the conventional mixed beam presented tensile stress, and the prestressed beams resulted in compression stresses, with the beam 15 cm above the lower table the lowest tension compression, with differences of 48.82% and 91.28% compared to beams 25 cm and 35 cm above the lower table. In the lower table, all prestressed beams obtained better structural behavior compared to the conventional mixed beam, with reductions in the values of normal tensile stresses of 29.41%, 27.97% and 23.83%, respectively, in beams 15 cm, 25 cm and 35 cm above the lower table. The maximum values of tensile and compression stresses were presented at the ends of the mixed beams, both on the supports and on the anchorage plate. It is concluded that the external prestressing provides the steel-concrete composite beam with a better structural behavior in its extension, both in deformations and in normal stresses, and that the application of the prestressing near the lower table was more satisfactory.

Keywords: Beam beams. Mixed steel-concrete structure. External prestressing. Structural Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos constituintes de uma ponte	19
Figura 2 - Seção transversal da ponte	20
Figura 3 - Tipos estruturais de pontes.	21
Figura 4 - Distribuição das cargas	25
Figura 5 - Comparação entre ação mista e não mista	27
Figura 6 - Tipos mais usuais de viga mista.....	28
Figura 7 - Tipos de perfis de aço aplicado a sistemas horizontais.....	29
Figura 8 - Tipos de conectores	31
Figura 9 - Protensão em estruturas de concreto.....	32
Figura 10 - Protensão em estruturas metálicas	33
Figura 11 - Croqui esquemático de protensão externa em viga mista aço-concreto.....	33
Figura 12 - Desenhos esquemáticos de monocordoalha e cordoalha engraxadas.....	35
Figura 13 - Geometria dos cabos de protensão.....	36
Figura 14 - Ancoragem através da utilização de cunhas metálicas.....	37
Figura 15 - Sistema de ancoragem rosca e porca para barras de protensão	37
Figura 16 - Tipos de desviadores dos cabos de protensão	38
Figura 17 - Desviadores para posicionamento abaixo da viga metálica	38
Figura 18 - Exemplo de processo de protensão	39
Figura 19 - Estrutura subdividida em elementos finitos	42
Figura 20 – Elemento LINK180.....	43
Figura 21 - Tensão normal de tração e compressão.....	44
Figura 22 - Tensão de cisalhamento	44
Figura 23 - Deformação em viga biapoiada.	45
Figura 24 – Seção transversal da ponte proposta.....	47
Figura 25 – Seção transversal da estrutura no software Ftool	50
Figura 26 – Reações de apoio nas vigas longarinas.....	50
Figura 27 – Perfil I da viga metálica	52
Figura 28 – Altura dos cabos de protensão.....	53
Figura 29 – Fluxograma de elaboração das vigas longarinas	54
Figura 30 - Interface Workbench 2019 R3 para análise estática estrutural	55
Figura 31 - Interface Workbench 2019 R3 para selecionar os materiais da estrutura: concreto.....	56
Figura 32 - Interface Workbench 2019 R3 para selecionar os materiais da estrutura: aço.....	56

Figura 33 - Interface Workbench 2019 R3 para inserir a geometria da estrutura	57
Figura 34 – Geometria da viga mista no SpaceClaim	57
Figura 35 – Interface Workbench 2019 R3 para entrar na plataforma ANSYS/Mechanical	58
Figura 36 - Interface da plataforma ANSYS/Mechanical para modificar os materiais da estrutura.....	58
Figura 37 - Interface do ANSYS/Mechanical para seleção de contato.....	59
Figura 38 - Interface do ANSYS/Mechanical para definir a malha de elementos finitos	60
Figura 39 - Interface do ANSYS/Mechanical para fixar os apoios	60
Figura 40 - Interface do ANSYS/Mechanical para inserir as forças exercidas na estrutura.....	61
Figura 41 - Interface do ANSYS/Mechanical para selecionar as soluções para análise.....	62
Figura 42 - Interface do ANSYS/Mechanical para processar a estrutura e gerar os resultados.....	62
Figura 43 - Geometria da viga mista com ancoragem no SpaceClaim	64
Figura 44 - Geometria da viga mista com protensão externa no Design Modeler	64
Figura 45 - Interface do ANSYS/Mechanical para aplicar os comandos de protensão	65
Figura 46 - Comandos para protensão externa	65
Figura 47 - Interface do ANSYS/Mechanical para fixar contatos dos cabos de protensão	66
Figura 48 - Interface do ANSYS/Mechanical para aplicar cargas sobre a estrutura.....	67
Figura 49 - Deformação na laje de concreto (viga referência).	68
Figura 50 - Deformação mínima (viga referência).	69
Figura 51 - Deformação na viga de aço (viga referência)	69
Figura 52 - Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (viga referência).....	70
Figura 53 - Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (viga referência)	70
Figura 54 – Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (viga referência)	71
Figura 55 - Tensão normal de tração máxima (viga referência).	71
Figura 56 - Tensão normal de compressão máxima (viga referência)	72
Figura 57 - Deformação na laje de concreto (vigaP15).....	72
Figura 58 - Deformação mínima (vigaP15).....	73
Figura 59 - Deformação na viga de aço (vigaP15)	73
Figura 60 - Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP15)	74
Figura 61 - Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP15).....	74

Figura 62 - Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP15)	75
Figura 63 - Tensão normal de tração máxima (vigaP15).....	75
Figura 64 – Tensão normal de compressão máxima (vigaP15).....	76
Figura 65 - Deformação na laje de concreto (vigaP25).....	76
Figura 66 - Deformação mínima (vigaP25).....	77
Figura 67 - Deformação na viga de aço (vigaP25)	77
Figura 68 – Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP25).....	78
Figura 69 - Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP25).....	78
Figura 70 - Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP25)	79
Figura 71 - Tensão normal de tração máxima (vigaP25).....	79
Figura 72 - Tensão normal de compressão máxima (vigaP25).....	80
Figura 73 - Deformação na laje de concreto (vigaP35).....	80
Figura 74 - Deformação mínima (vigaP35).....	81
Figura 75 - Deformação na viga de aço (vigaP35)	81
Figura 76 - Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP35)	82
Figura 77 - Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP35).....	83
Figura 78 - Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP35)	83
Figura 79 - Tensão normal de tração máxima (vigaP35).....	84
Figura 80 - Tensão normal de compressão máxima (vigaP35).....	84
Figura 81 - Deformações máximas.....	86
Figura 82 - Deformação total máxima.....	88
Figura 83 - Tensão normal na laje de concreto (meio do vão).	89
Figura 84 - Tensão normal na mesa superior da viga (meio do vão).....	91
Figura 85 - Tensão normal na mesa inferior da viga (meio do vão).....	92
Figura 86 - Tensão normal máxima de tração.	93
Figura 87 - Tensão normal máxima de compressão	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso específico dos materiais	24
Tabela 2 - Carregamento dos guarda-rodas da ponte	49
Tabela 3 - Carregamento do guarda-corpo da ponte.....	49
Tabela 4 - Carregamento do revestimento de pavimentação	49
Tabela 5 - Cálculo do coeficiente de impacto	51
Tabela 6 - Perfil estrutural I da Tabela de Bitolas Gerdau	51
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos materiais da viga mista aço-concreto convencional.....	55
Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos materiais das vigas mistas protendidas	63
Tabela 9 - Deformações máximas	86
Tabela 10 - Deformação total máxima	87
Tabela 11 – Tensão normal na laje de concreto (meio do vão).	89
Tabela 12 - Tensão normal na mesa superior da viga (meio do vão)	90
Tabela 13 – Tensão normal na mesa inferior da viga (meio do vão).....	91
Tabela 14 - Tensão normal máxima de tração	93
Tabela 15 – Tensão normal máxima de compressão	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
OAE	Obra de Arte Especial
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TO	Tocantins
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

kN	Quilonewton
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro quadrado
Fy	Tensão de escoamento
cm ²	Centímetro quadrado
FCK	Resistência característica do concreto à compressão
MPa	Megapascal
p	Carga uniformemente distribuida
P	Carga pontual
σ	Tensão normal
ΔA	Área
ΔF	Força
T	Tensão de cisalhamento
m	Metro
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 PONTES.....	19
2.1.1 Definição de Ponte	19
2.1.2 Elementos constituintes	19
2.1.3 Classificação das Pontes	20
2.2 AÇÕES E CARGAS EM PONTES	23
2.2.1 Ações permanentes	23
2.2.2 Ações variáveis	24
2.2.3 Ações excepcionais	26
2.3 VIGAS MISTA AÇO-CONCRETO	27
2.3.1 Perfil de Aço	28
2.3.2 Laje de Concreto	29
2.3.3 Conectores de Cisalhamento	30
2.4 PROTENSÃO EXTERNA.....	32
2.4.1 Cabos de Protensão	35
2.4.2 Traçado dos Cabos de Protensão	35
2.4.3 Ancoragem	36
2.4.4 Desviadores	38
2.4.5 Aplicação da Protensão	39
2.4.6 Perdas de Protensão	40
2.5 SOFTWARE ANSYS	40
2.5.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)	42
2.5.2 Elemento LINK180	42
2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL.....	43
2.6.1 Tensão	44
2.6.2 Deformação	45

3 METODOLOGIA	46
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	46
3.2 OBJETO DE ESTUDO.....	47
3.3 CARREGAMENTO DA PONTE PROPOSTA.....	47
3.3.1 Ações permanentes	48
3.3.2 Ações variáveis	50
3.4 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DAS VIGAS LONGARINAS.....	51
3.5 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE ESTÁTICA NO ANSYS 2019 R3.....	54
3.5.1 Viga mista aço-concreto convencional	55
3.5.2 Viga mista aço-concreto com protensão externa	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 DIAGRAMAS DE VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO ANALISADAS NO ANSYS 2019 R3.....	68
4.1.1 Viga mista aço-concreto convencional (Viga Referência)	68
4.1.2 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP15)	72
4.1.3 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP25)	76
4.1.4 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP35)	80
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO.....	84
4.2.1 Análise comparativa de deformações das vigas mistas aço-concreto	84
4.2.2 Análise comparativa de tensões normais das vigas mistas aço-concreto	88
5 CONCLUSÃO	95
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Pontes são obras necessárias para manter a continuidade de uma via de comunicação qualquer que seja (estrada de rodagem, estrada de ferro, canal etc.) através de um obstáculo natural ou artificial constituído por depressão do terreno sem que haja obstrução da seção transposta. Caso este obstáculo transposto seja constituído em sua maior extensão por massa de água, designa-se “ponte”, e se no obstáculo há ausência de água, transpondo vales ou outras vias, designa-se a obra como “viaduto” (BERNARDO, 1980).

As pontes rodoviárias são obras de arte especiais (OAE), geralmente de grande porte, destinadas a vencer vãos extensos e que demandam um volume elevado de materiais para suportar as cargas, tensões e deformações que são solicitadas pela mesma. É notório a necessidade de tecnologias alternativas que atentam aos requisitos mínimos de uma ponte: funcionalidade, segurança, estética e economia, de maneira adequada e, desta forma, é imprescindível a busca por estruturas que supram estes requisitos.

A utilização de estruturas mistas aço-concreto possui diferenciais consideráveis, visto que permite maior aproveitamento dos materiais. Esse tipo de estrutura alia a excelente resistência à tração do aço e compressão do concreto, permitindo que cada material exerça aquilo que possui melhor desempenho. Além disso, a estrutura mista permite a dispensa de escoramento, uma vez que a viga de aço possui resistência suficiente para suportar a carga da laje de concreto em processo de cura, quando projetada para este fim.

Entretanto, um elemento estrutural formado pela associação dos materiais aço e concreto só é considerado como misto quando há um comportamento conjunto entre os componentes da seção transversal, ou seja, quando existe compatibilidade de deformações entre aço e concreto (NELSEN, 2013). Para tanto, no caso de vigas mistas utiliza-se os conectores de cisalhamento, que garantem a perfeita interface laje-viga, impedindo o deslizamento da laje sobre a viga, devido à falta de aderência do aço.

O sistema de protensão externa caracteriza-se por os cabos de protensão serem ancorados no exterior da estrutura, e as tensões de protensão são transmitidas para a mesma através dos pontos de ancoragem e dos desviadores. Este sistema consiste em aplicar nas estruturas tensões opostas àquelas que ela está submetida pela carga. Desta forma, no concreto, nos pontos em que há solicitação de resistência a tração, a protensão cria tensões prévias de compressão, visto que este material é pouco resistente a tração. Nas estruturas de aço a protensão promove na mesma peça tensões de tração e compressão em equilíbrio, permitindo que a mesma trabalhe em sua máxima capacidade de resistência a tração.

Diante do exposto, a presente pesquisa realizou uma análise comparativa de estruturas de vigas mistas aço-concreto convencionais e com a aplicação de protensão externa em ponte rodoviária, contribuindo para a obtenção de informações desse tipo de tecnologia alternativa ainda pouco empregada no Brasil.

Há diversas possibilidades de utilização de protensão externa em vigas mistas, caracterizadas por suas particularidades, método de execução, vantagens e desvantagens. Este trabalho realizou a avaliação do comportamento estrutural de uma viga longarina mista aço-concreto de determinada ponte proposta para o município de Palmas-TO, sendo esta convencional e com variados tipos de protensão externa, a fim de demonstrar os comportamentos de cada método, comparando os resultados obtidos. O comparativo foi realizado por meio da ferramenta computacional ANSYS 2019 R3 que faz uso do método dos elementos finitos, o que permitiu maior precisão dos resultados numéricos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e comparar o comportamento estrutural de vigas longarinas mistas aço-concreto convencionais e com aplicação de protensão externa em ponte no município de Palmas-TO.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar quatro modelos de vigas mistas aço-concreto, sendo um modelo de viga mista convencional e três modelos de viga mista com protensão externa, alterando a altura do ponto de ancoragem dos cabos de protensão;
- Apresentar deformações e tensões normais das vigas estudadas, com auxílio de ferramenta computacional;
- Comparar os modelos analisados e avaliar os comportamentos estruturais para aplicação em pontes rodoviárias.

1.2 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa propõe realizar estudo de vigas mistas aço-concreto e compará-las com diferentes modelos de viga mista aço-concreto com protensão externa, com intuito de analisar o comportamento desta aplicação em pontes. Como existem poucas pesquisas aplicadas no Brasil a respeito da proteção externa em vigas mistas, este trabalho possui grande relevância

visto que propõe analisar uma nova ferramenta, a fim de servir como suporte e auxílio para engenheiros civis em decisões de projetos estruturais.

Na engenharia civil as buscas por tecnologias e materiais que atendam às necessidades sociais de forma satisfatória devem ser constantes. Na área da engenharia estrutural é necessário atentar-se primordialmente à segurança da estrutura, bem como sua economia. Diante disto, este trabalho propõe o estudo de uma nova tecnologia pouco empregada no Brasil: o uso de protensão externa em vigas mistas, que serve tanto para novos projetos quanto para recuperação de estruturas. Este método é uma solução geralmente rápida, que ganham prazos e minimizam custos de execução.

Além disso, este comparativo poderá auxiliar governos, órgãos públicos e instituições que pretendem investir em soluções na elaboração de projetos com estruturas econômicas, ágeis e eficientes, pois está aplicado em uma ponte ainda não existente no Tocantins.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Considerando estruturas de vigas mistas aço-concreto convencionais e vigas mistas aço-concreto com protensão externa, tendo em vista tensões normais e deformações, como estas se comportam aplicadas em pontes rodoviárias?

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PONTES

2.1.1 Definição de Ponte

Pontes são obras-de-arte especiais destinadas a permitir o tráfego sobre obstruções da via, sendo estas: rios, vales, outras vias, entre outras. Quando o obstáculo é composto por água, denomina-se ponte. Entretanto, quando o obstáculo não possuir água, tendo como objetivo o tráfego sobre vales ou outras vias, denomina-se viaduto.

De acordo com PFEIL (1979, p.1)

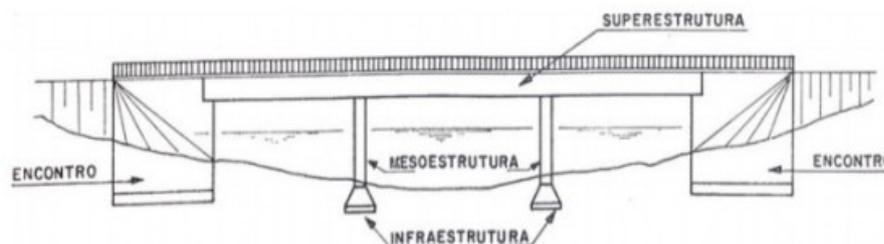
Denomina-se ponte a obra destinada a transposição de obstáculos à continuidade do leito normal de uma via, tais como rios, braços de mar, vales profundos, outras vias, etc. Quando a ponte tem por objetivo a transposição de vales, outras vias ou obstáculos em geral não constituídos por água é, comumente, denominada viaduto.

Os requisitos básicos para o projeto de uma ponte são basicamente quatro: funcionalidade, estética, segurança e economia. Conforme Bernardo (1980), por funcionalidade deve-se entender que a ponte venha satisfazer o fim para o qual foi destinada, permitindo o tráfego atual com previsões para o incremento deste tráfego e permitindo também que o escoamento das águas sob a ponte se processe com o mínimo de perturbações. Quanto à segurança da ponte, devem-se considerar: as tensões, as deformações e a duração da ponte. No que se refere à estética, a ponte deve atender ao aspecto de boa aparência e deve satisfazer arquitetonicamente sem criar grandes contrastes com o ambiente em que ela é implantada. Quanto à economia, deve-se atender aos requisitos precedentes, com a solução mais vantajosa do ponto de vista da realização do projeto, com menor custo.

2.1.2 Elementos constituintes

Do ponto de vista funcional, segundo Pfeil (1979), as pontes são constituídas por três elementos principais: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. A figura 1 apresenta tais elementos constituintes.

Figura 1 - Elementos constituintes de uma ponte.



- **Infraestrutura**

A infraestrutura é composta pelas fundações, elementos estes que transferem o carregamento da ponte para o solo, podendo ser: sapatas, estacas, tubulões etc.

- **Mesoestrutura**

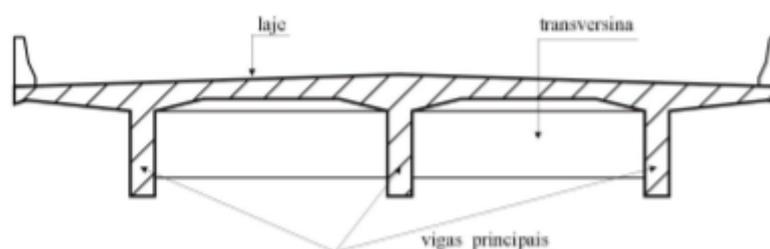
A mesoestrutura é formada pelos pilares e aparelhos de apoio, que recebem as cargas e esforços da superestrutura e transferem para a infraestrutura. Vitório (2002) explica que os pilares são localizados a cada linha de apoio transversal do tabuleiro. Suas quantidades, formas e dimensões dependem de diversos fatores como a altura da obra, a largura da superestrutura e o tipo de fundação. Os aparelhos de apoio são elementos que transmitem as cargas do tabuleiro para o pilar, permitindo alguns movimentos e impedindo outros, de acordo com o tipo de estrutura.

- **Superestrutura**

“A superestrutura, composta geralmente de lajes e vigas principais e secundárias, é o elemento de suporte imediato do estrado, que constitui a parte útil da obra, sob ponto de vista de sua finalidade” (PFEIL, 1979, p.2).

As vigas longarinas (principais) são projetadas no sentido longitudinal da ponte, apoiando-se nos pilares, com função de vencer o vão e receber o carregamento da laje do tabuleiro, transferindo-o para a mesoestrutura. As vigas transversinas (secundárias) são projetadas no sentido transversal da ponte, com intuito de distribuir o carregamento da ponte entre as vigas, reduzindo assim as ações solicitantes nas vigas longarinas, conforme ilustra a figura 2. Além disso, a superestrutura constitui-se também de: passeios de pedestres, guarda-corpos e barreiras, juntas de dilatação, sistema de drenagem, pista de rolamento dos veículos, entre outros elementos.

Figura 2 - Seção transversal da ponte.



Fonte: Vitório (2002)

2.1.3 Classificação das Pontes

As pontes podem ser classificadas de diversas formas, sendo mais consideradas quanto à finalidade, material e tipo estrutural.

- **Quanto à finalidade**

No que se refere à finalidade, as pontes podem ser classificadas em: rodoviárias, ferroviárias, passarelas (ponte para pedestres), aeroviárias, aquedutos e mistas.

“Estas denominações são associadas ao tipo de tráfego principal. As pontes mistas são aquelas destinadas a mais de um tipo de tráfego, por exemplo ponte rodo-ferroviária que serve para estabelecer a continuidade de uma rodovia e de uma ferrovia” (TAKEYA & DEBS, 2007).

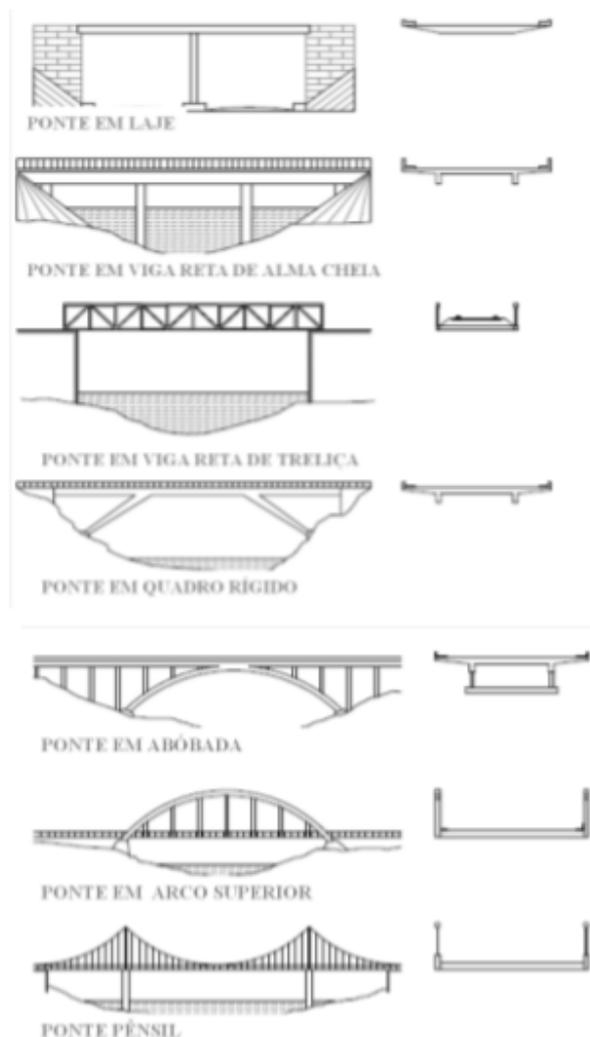
- **Quanto ao material**

Quanto ao material com que predominantemente são construídas, as pontes podem ser de madeira, de pedra, de concreto armado ou protendido, e metálicas.

- **Quanto ao tipo estrutural**

No que tange à tipologia estrutural, as pontes são comumente classificadas em: pontes em laje, pontes em viga, pontes em treliças, pontes em arcos, pontes em pórticos, pontes pênsis e pontes estaiadas. A figura 3 apresenta alguns dos principais tipos de pontes.

Figura 3 - Tipos estruturais de pontes.



a) Pontes em Laje

As pontes em laje caracterizam-se por possuírem a seção transversal desprovida de qualquer vigamento, podendo ter um sistema estrutural simplesmente apoiado ou contínuo. Conforme Takeya e Debs (2007) nas seções transversais das pontes em laje o tabuleiro e o sistema estrutural forma uma única peça. Esse tipo de seção apresenta como principal característica a simplicidade de execução das formas, armaduras e da concretagem. Além disso, a seção transversal da laje garante excelente distribuição transversal de esforços.

b) Pontes em Viga

Este sistema estrutural possui vigamentos suportando o tabuleiro. É composto por vigas principais denominadas de longarinas e normalmente são introduzidas transversinas no perfil transversal, com intuito de aumentar a rigidez do conjunto. Caso a seção transversal seja feita com vigas sem laje inferior, pode-se adotar transversinas intermediárias além das transversinas de apoio e, caso a seção transversal seja feita em caixão celular não é necessário ter-se transversinas intermediárias em função da grande rigidez à torção do conjunto (MATTOS, 2001).

Conforme Vitório (2002) as pontes em viga podem ser constituídas por vigas simplesmente apoiadas ou vigas contínuas. As pontes em vigas simplesmente apoiadas são formadas por um sistema estrutural estaticamente determinado, podem ter seção constante ou variável e são muito utilizadas para vencer um vão com um único tramo, sendo uma solução econômica e de fácil execução. As pontes em vigas contínuas podem ter inércia constante ou variável, onde a inércia constante é empregada para vencer vãos pequenos, e a inércia variável é utilizada para grandes vãos, com finalidade de permitir boa distribuição dos esforços solicitantes e redução do peso próprio.

c) Pontes em Pórtico

Estas pontes caracterizam-se por a superestrutura e a mesoestrutura estarem monoliticamente ligadas, permitindo assim a eliminação do uso de aparelhos de apoio. Esse sistema é utilizado quando há necessidade de reduzir o comprimento de flambagem devido a pilares esbeltos, e devido à mínima manutenção da ponte devido a inexistência de aparelhos de apoio (LEONHARDT, 1979).

d) Pontes em Arco

Segundo Mattos (2001), as pontes em arco em arco permitem o uso do concreto armado convencional em pontes com grandes vãos com pequeno consumo de material, uma vez que o eixo do arco é preferencialmente projetado coincidindo com a linha de pressões devidas à carga permanente, beneficiando-se da resistência à compressão que o concreto possui. As estruturas

em arco podem ser sustentadas por montantes, projetadas com tabuleiro superior, ou sustentadas por tirante ou pendurais, com tabuleiro inferior. Além destes, há ainda o sistema misto com o arco intermediário, sustentado lateralmente por montantes e, no centro, por pendurais.

e) Pontes Pênseis

As pontes Pênseis são estruturas geralmente executadas em vigamentos metálicos suspensos por cabos portantes de aço, constituídas por cabos dispostos parabolicamente e pendurais verticais. Os vigamentos devem ter grande rigidez à flexão e a torção, de forma que minimize os efeitos dos movimentos vibratórios transversais, impedindo o desconforto aos usuários ou mesmo risco à estrutura. Podem ser executados em treliças ou vigas de alma cheia (VITÓRIO, 2002).

f) Pontes Estaiadas

Mattos (2001) cita que o sistema estrutural de uma ponte estaiada consiste em um vigamento de grande rigidez à torção que se apoia nos encontros e nas torres de ancoragem, e de um sistema de cabos retos esticados denominados estais, partindo dos acessos do vigamento, passando sobre uma ou duas torres de ancoragem e dirigindo-se ao vão central para ancorá-lo e sustentá-lo. Esse sistema difere-se nas pontes pênseis apenas na forma em que os cabos são conectados à torre.

2.2 AÇÕES E CARGAS EM PONTES

As ações e cargas solicitadas pelas pontes podem ser classificadas em três tipos distintos: ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

2.2.1 Ações permanentes

Segundo a NBR 7187 (ABNT, 2003), as ações permanentes são ações cujas intensidades podem ser consideradas como constantes ao longo da vida útil da construção. Também são consideradas permanentes as que crescem no tempo, tendendo a um valor limite constante. A norma cita que ações permanentes compreendem, entre outras: as cargas do peso próprio de todos os elementos que constituem a ponte; os empuxos de terra e de líquidos; as forças de protensão; e as deformações provocadas por fluência e retração do concreto, por variações de temperatura e por deslocamentos de apoios. A tabela 1 apresenta os pesos específicos dos materiais que podem utilizados na execução dos elementos de pontes.

Tabela 1 - Peso específico dos materiais.

Material	Peso Específico (kN/m³)
Aço	78.5
Concreto armado	25.0
Concreto simples	24.0
Argamassa de cimento e areia	21.0
Concreto asfáltico	18.0
Madeira (tipo peroba)	8.0
Ferro fundido	72.5
Alumínio e ligas	28.0

Fonte: Pinho et al (2001 apud ELLER, 2011, p.20)

2.2.2 Ações variáveis

De acordo com a NBR 7187 (ABNT, 2013), ações variáveis são ações de caráter transitório que compreendem, entre outras: as cargas móveis; as cargas de construção; as cargas de vento; o empuxo de terra provocado por cargas móveis; a pressão da água em movimento; o efeito dinâmico do movimento das águas; as variações de temperatura.

- **Cargas Móveis**

As cargas móveis constituem-se do peso dos veículos sendo considerados como força pontual sobre a ponte, e das pessoas (multidão) consideradas como carregamento uniformemente distribuído.

No projeto de pontes rodoviárias, conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013), as cargas são classificadas de acordo com a categoria ou tipo de estrada, sendo o peso do veículo padrão representado por cargas concentradas e o peso dos pedestres representado por cargas uniformemente distribuídas.

Para a determinação das cargas móveis, deve-se padronizar o trem-tipo, que se refere ao carregamento móvel aplicado sobre a ponte. Para a escolha das cargas móveis, a norma NBR 7188 (ABNT, 2013) divide as pontes rodoviárias em dois tipos: TB-240 e TB-450.

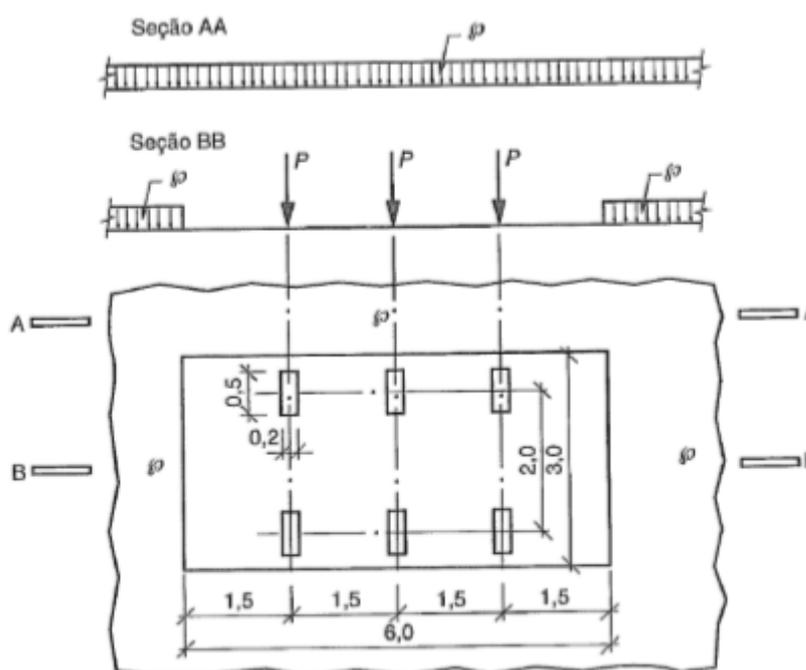
- TB-240: considera como base padrão um veículo tipo de 240 kN de peso total, com três eixos;
- TB-450: considera como base padrão um veículo-tipo de 450 kN de peso total, com três eixos;

A norma explicita que o tipo TB-240 é indicado para estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares, sendo definido por um veículo tipo de 240 kN, com seis rodas,

$P=40\text{kN}$, com três eixos afastados entre si em 1,5 m, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p=4,0\text{ kN/m}^2$.

Ademais, a norma determina que obras-de-arte especiais devem ser projetadas para a classe 45, visto que essa é a carga móvel padrão, referente a trem-tipos de 450 kN, com seis rodas, $P=75\text{ kN}$, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18,0 m², e multidão com carga uniformemente distribuída constante $p=5\text{ kN/m}^2$, conforme apresentado pela figura 4.

Figura 4 - Distribuição das cargas.



Fonte: NBR 7188 (2013)

- **Coefficiente de Impacto**

De acordo com a norma ABNT NBR 7188:2013, para a realização de análise estrutural estática de cargas móveis, deve-se majorar as cargas com o coeficiente de ponderação das cargas verticais, uma vez que por meio deste coeficiente é possível abranger a análise estática da estrutura englobando a análise dinâmica.

Este coeficiente é obtido a partir dos coeficientes de impacto vertical, coeficiente do número de faixas e coeficiente de impacto adicional.

- **Coefficiente de Impacto Vertical**

Conforme a norma ABNT NBR 7188:2013, as cargas móveis verticais devem ser majoradas para o dimensionamento de todos os elementos estruturais pelo Coeficiente de Impacto Vertical “CIV”, obtendo-se os valores “ Q ” e “ q ” para dimensionamento dos elementos estruturais. O mesmo segue os seguintes critérios:

- a) $CIV=1,35$ para estruturas com vão menor do que 10,0m.
 b) $CIV = 1+1,06 * (\frac{20}{Liv+50})$ para estruturas com vão entre 10,0 e 200,0m.

Onde:

Liv: vão em metros para o cálculo de CIV, conforme o tipo de estrutura, sendo:

Liv = L para estruturas de vão isostático.

Liv = média aritmética dos vãos nos casos de vãos contínuos.

Liv = comprimento do próprio balanço para estruturas em balanço.

L= vão em metros.

Para estruturas com vãos acima de 200,0 m, deverá ser realizado estudo específico para a consideração da amplificação dinâmica e definição do Coeficiente de Impacto Vertical.

- Coeficiente do número de faixas

Segundo a ABNT NBR 7188:2013, as cargas móveis verticais características, devem ser ajustadas pelo Coeficiente do Número de Faixas do tabuleiro “CNF”, conforme descrito abaixo:

- a) $CNF=1-0,05*(n-2) >0,9$

Onde:

n = número (inteiro) de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo. Acostamentos e faixas de segurança não são faixas de tráfego da rodovia.

- Coeficiente de Impacto Adicional

De acordo com a ABNT NBR 7188:2013, os esforços das cargas móveis verticais devem ser majorados na região das juntas estruturais e extremidades da obra. Todas as seções dos elementos estruturais a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5,0 m para cada lado da junta ou descontinuidade estrutural, devem ser dimensionadas com os esforços das cargas móveis majorados pelo Coeficiente de Impacto Adicional, abaixo definido:

- a) $CIA = 1,25$ para obras em concreto ou mistas.
 b) $CIA = 1,15$ para obras em aço.

2.2.3 Ações excepcionais

Segundo a NBR 7187 (ABNT, 2003) ações excepcionais aquelas cuja ocorrência se dá em circunstâncias anormais, como por exemplo: os choques de objetos móveis; as explosões; os fenômenos naturais pouco frequentes, como ventos ou enchentes catastróficas e sismos; entre outros.

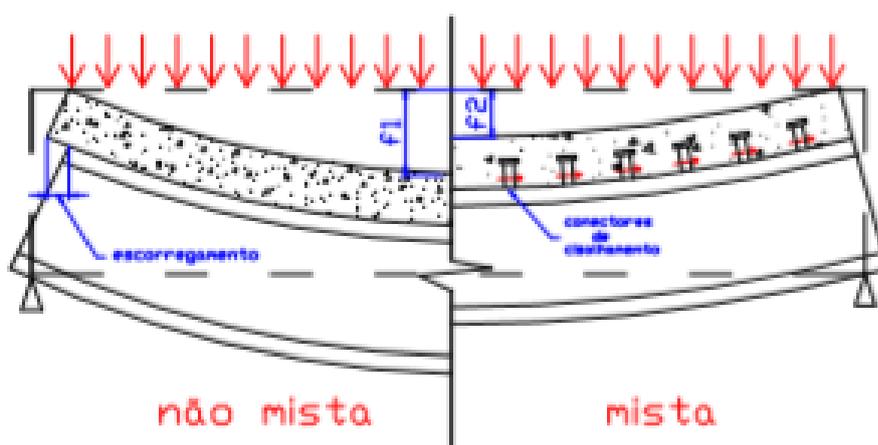
2.3 VIGAS MISTA AÇO-CONCRETO

As vigas mistas aço-concreto são elementos estruturais constituídos de uma viga com perfil de aço e laje em concreto, podendo este ser: armado, protendido ou pré-moldado; unidos por conectores de cisalhamento. Este conector é responsável por manter a perfeita interface entre laje e viga, transferindo os esforços entre as mesmas e impedindo o deslizamento por falta de aderência entre aço e concreto.

De acordo com Pfeil (2000, pag. 226) “denomina-se viga mista a viga formada pela associação de um perfil metálico com uma laje de concreto, sendo os dois elementos ligados por conectores mecânicos. No sistema misto, a laje de concreto é utilizada com duas funções: laje estrutural; parte do vigamento”.

O princípio de funcionamento de uma ponte em vigas mista, em conformidade com Klinsky (1999), consiste na associação da laje de concreto armado, ou protendido, às vigas metálicas que lhe servem de suporte. A associação entre vigas e lajes ocorre se os deslocamentos na interface aço-concreto são impedidos ou minimizados, de forma que as tensões de cisalhamento sejam transferidas entre laje e viga. Essa transferência advém de tal forma que os elementos laje e viga atuam solidariamente em conjunto, para resistir às ações solicitadas pela ponte, aumentando desta forma a resistência e rigidez da mesma, como demonstra a figura 5.

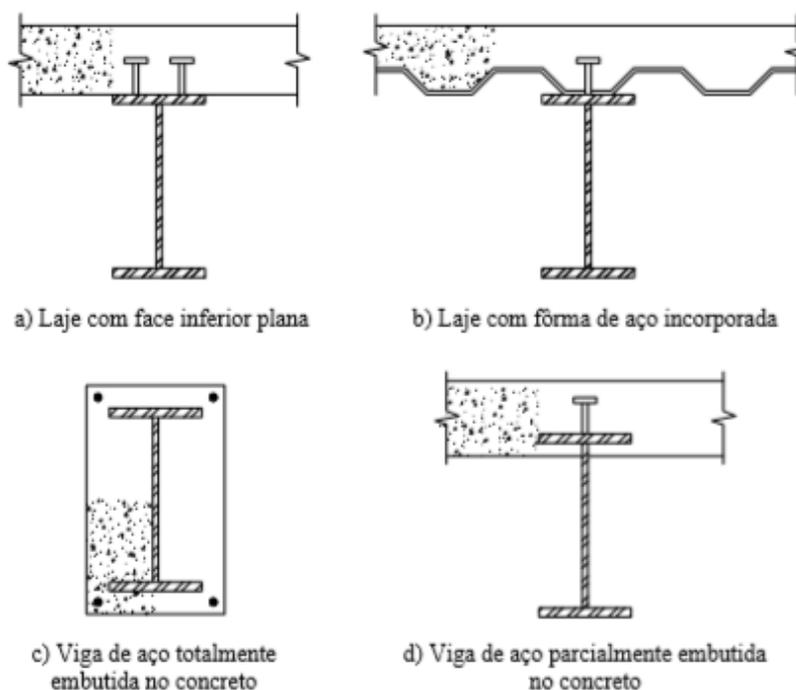
Figura 5 - Comparação entre ação mista e não mista.



Fonte: Klinsky (1999)

As estruturas mistas aço-concreto geralmente são vigas que possuem seção de viga metálica em formato I, com a laje de concreto sobre a mesa superior da viga. Entretanto, há outras possibilidades de perfis mistos que podem ser empregados, como: laje com fôrma de ar incorporada, e laje parcialmente ou completamente embutida no concreto. A figura 6 demonstra os tipos mais usuais de vigas mistas aço-concreto

Figura 6 - Tipos mais usuais de viga mista.



Fonte: Malite et al (1990 apud ALVA, 2000, p.32)

Segundo Eller (2011), o emprego de sistemas mistos de aço e concreto apresenta diversas vantagens sobre estruturas que não possuem comportamento misto, como:

- a) Grande redução de peso do aço;
- b) Diminuição das alturas dos perfis;
- c) Aumento da rigidez pela contribuição do concreto;
- d) Aumento da capacidade de sobrecarga;
- e) Possibilidade do não uso do escoramento;
- f) Aumento da precisão dimensional da construção;
- g) Redução das proteções contra incêndio.

Conforme Alva (2000, p.33) “a principal desvantagem reside na necessidade de provisão dos conectores de cisalhamento na interface aço-concreto”.

2.3.1 Perfil de Aço

Atualmente há diversos tipos de aço utilizados na construção de pontes, com diferentes propriedades físicas e mecânicas, sendo empregados em forma de chapas, perfis laminados ou perfis soldados.

De acordo com Klinsky (1999, p. 28)

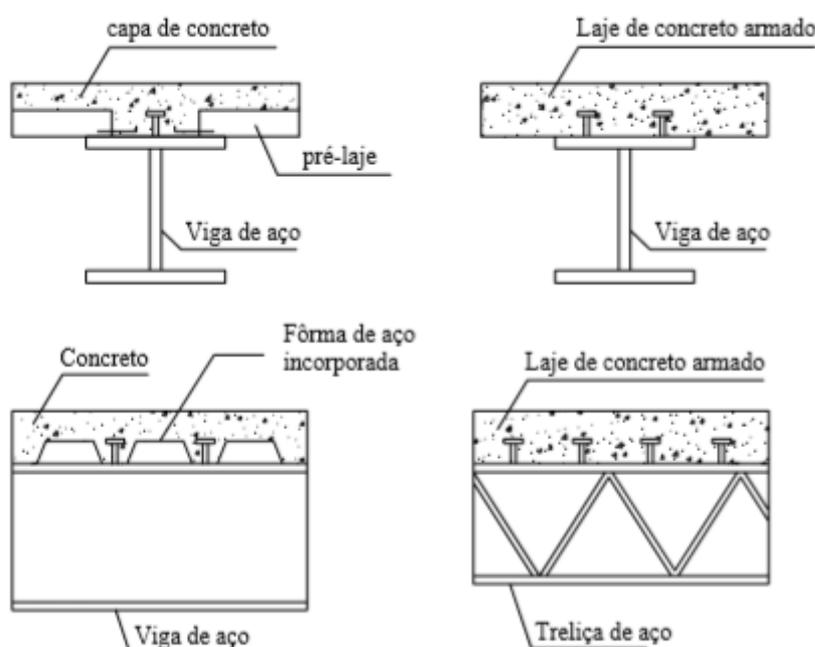
O aço é uma liga de ferro (98%) com pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês, etc. O carbono é o componente que maior influência exerce nas propriedades do aço, podendo este ser dividido nos seguintes grupos: aços carbono, aços de baixa liga e aços patináveis.

Segundo Pinho e Bellei (2007) aços carbonos ou de média resistência apresentam moderado teor de carbono, tensão de escoamento $F_y = 25 \text{ kN/cm}^2$, possuem boa soldabilidade aos processos usuais de solda elétrica, sendo constituídos pelos aços: MR-250 (Norma Brasileira), ASTM A36 (Norma Americana) e At-37 (Norma alemã).

Ainda, conforme Pinho e Bellei (2007), aços de baixa liga ou de alta resistência possuem alta resistência a corrosão atmosférica, devido a adição de elementos de liga como cromo, vanádio, cobre e titânio; e possuem limite de escoamento superior a 30 kN/cm^2 . No Brasil, a maioria das pontes e viadutos são construídas com este tipo de aço, uma vez que em muitos casos não necessita de pintura, gerando economia à obra. Os aços desse grupo são: ASTM A572- Alta resistência mecânica e ASTM A588 de alta resistência mecânica e atmosférica.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) expõe que os perfis de aço comumente utilizados em vigas mistas são o perfil I podendo apresentar alma lisa ou alma corrugada, perfil caixão, perfil tubular retangular ou uma treliça, conforme a figura 7.

Figura 7 - Tipos de perfis de aço aplicado a sistemas horizontais.



Fonte: Alva (2000)

2.3.2 Laje de Concreto

O concreto é o material utilizado nas vigas mistas aço-concreto com a principal função de resistir aos esforços de compressão. Além disso, é usual em pontes visto que possui ótima resistência à ação dos solos. O concreto utilizado em vigas mistas geralmente possui FCK entre 20 e 30 Mpa, seguindo os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2003).

De acordo com Nelsen (2013), qualquer tipo de laje pode ser utilizado em conjunto com vigas de aço, embora as mais usuais sejam em concreto armado ou protendido, pré-moldadas ou moldadas in loco. As lajes mais utilizadas são:

- Laje convencional em concreto armado ou protendido;
- Laje de concreto com vigas metálicas;
- Lajes de elementos pré-fabricados, servindo de forma e trabalhando como laje mista aço- concreto;
- Laje com forma metálica trabalhando como laje mista aço-concreto.

No sistema misto, a laje de concreto não contribui para resistir aos esforços com a viga em toda a sua extensão, diante disso, adota-se os conceitos de largura efetiva da laje. Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), a largura efetiva das lajes de concreto sobre as vigas de aço são:

- Vigas mistas biapoiadas:

A largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- a) $1/8$ do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- b) Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- c) Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

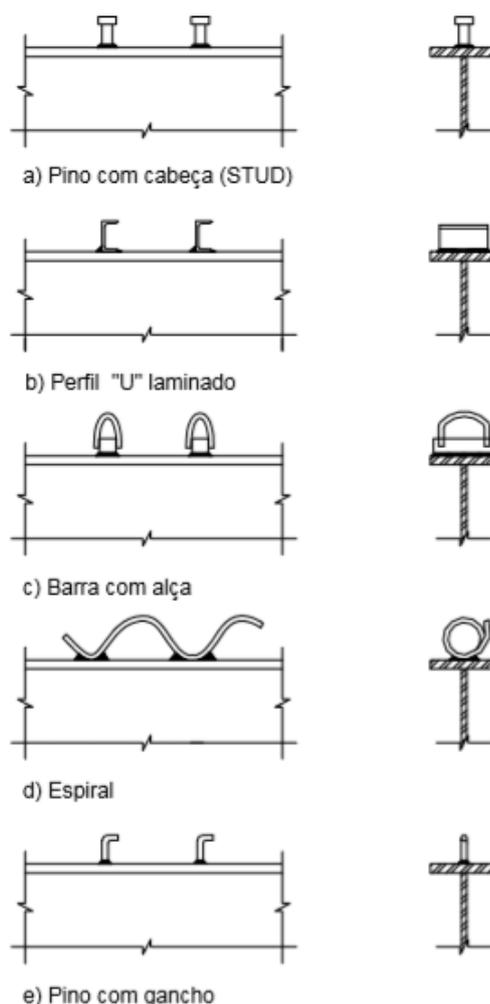
- Vigas mistas contínuas e semicontínuas:

- a) Nas regiões de momento positivo:
 - $4/5$ da distância entre apoios, para vãos extremos;
 - $7/10$ da distância entre apoios, para vãos internos;
- b) Nas regiões de momento negativo:
 - $1/4$ da soma dos vãos adjacentes.

2.3.3 Conectores de Cisalhamento

Conforme Nelsen (2013), os conectores de cisalhamento são elementos metálicos soldados a estrutura de aço, e possuem como principal função absorver os esforços de cisalhamento exercidos na viga mista, impedindo o deslocamento vertical e deslizamento entre laje e viga. Há diversos tipos de conectores de cisalhamento, como ilustra a figura 8, visto que os mais usuais são do tipo pino com cabeça (ou stud bolt) ou perfil U.

Figura 8 - Tipos de conectores.



Fonte: Alva (2000)

A NBR 8800 (ABNT, 2008), regulamenta os conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça e perfil U laminado ou formado a frio com espessura de chapa igual ou superior a 3 mm. Conforme a norma, os conectores do tipo pino com cabeça devem ter, após a instalação, comprimento mínimo igual a 4 vezes ao seu diâmetro. Os conectores em perfil U laminado ou formado a frio devem ser soldados à mesa superior do perfil de aço com solda contínua pelo menos nas duas extremidades de sua mesa, com resistência mínima igual a 1,25 vez a força resistente de cálculo do conector. Todos os tipos de conectores devem ficar completamente embutidos no concreto da laje, com cobertura superior mínimo de 10 mm.

O número de conectores depende diretamente do tipo de interação que se deseja obter na interface mista, podendo ser interação total ou parcial. Na interação total os conectores de cisalhamento devem ter quantidade suficiente para absorver totalmente o fluxo de cisalhamento horizontal na interface aço e concreto. Portanto, assume-se que na seção mais solicitada não há deslocamento entre os materiais e o cálculo do momento resistente considera a plastificação da

seção. Entretanto, na interação parcial, o número de conectores é calculado para absorver apenas uma parte desse fluxo e o momento resistente é calculado em função da resistência ao cisalhamento horizontal dos conectores (NELSEN, 2013).

2.4 PROTENSÃO EXTERNA

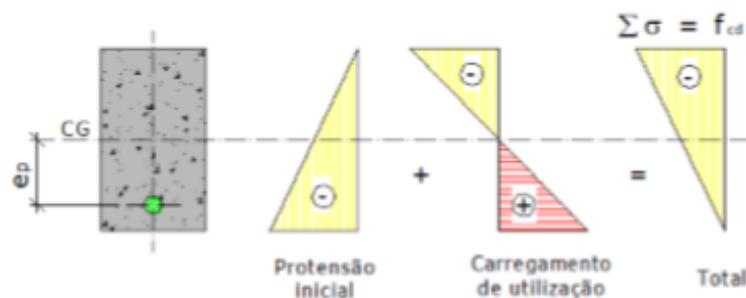
O sistema de protensão consiste em aplicar nas estruturas tensões opostas àquelas a que ela está submetida pela carga. Desta forma, nos pontos em que o concreto possui pouca resistência a tração, a protensão cria tensões prévias de compressão, melhorando assim a resistência da estrutura. Nas estruturas de aço, a protensão permite que a peça trabalhe em sua máxima capacidade de resistência à tração, visto que promove na mesma peça tensões de tração e compressão em equilíbrio.

Conforme Leonhardt et al (1983 apud NELSEN, 2013, p.26)

A protensão foi aplicada a estruturas de concreto com o objetivo de melhorar a sua deficiência a tração, uma vez que a protensão cria tensão de compressão prévias nas regiões onde o concreto seria tracionado em função das ações atuantes na estrutura. O efeito da protensão reduz ou até anula as tensões de tração provocadas pelas solicitações de utilização da estrutura.

Dessa forma, há um melhor aproveitamento dos materiais, uma vez que, com a aplicação da protensão, o concreto desempenha apenas a função de resistência a compressão, como ilustra a figura 9.

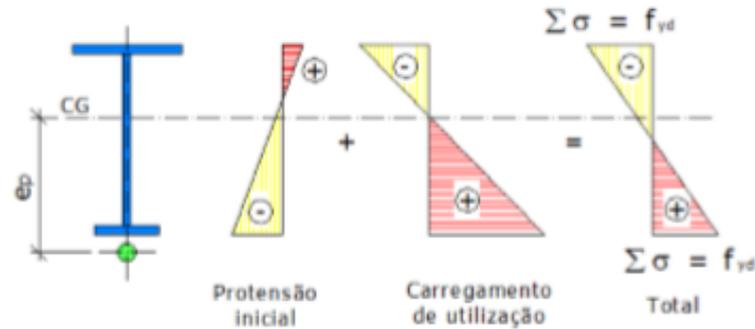
Figura 9 - Protensão em estruturas de concreto.



Fonte: Nelsen (2013)

Nas estruturas metálicas a protensão propicia um maior aproveitamento da seção da viga na sua máxima capacidade, visto que permite atingir tensões máximas admissíveis de projeto nas duas mesas da viga quando solicitada pelos carregamentos externos, ou seja, em uma mesma seção transversal há tensões de tração e compressão (NELSEN, 2013). Com isso, pode-se adotar perfis mais leves, conferindo economia de material. A figura 10 apresenta o princípio da protensão em estruturas metálicas

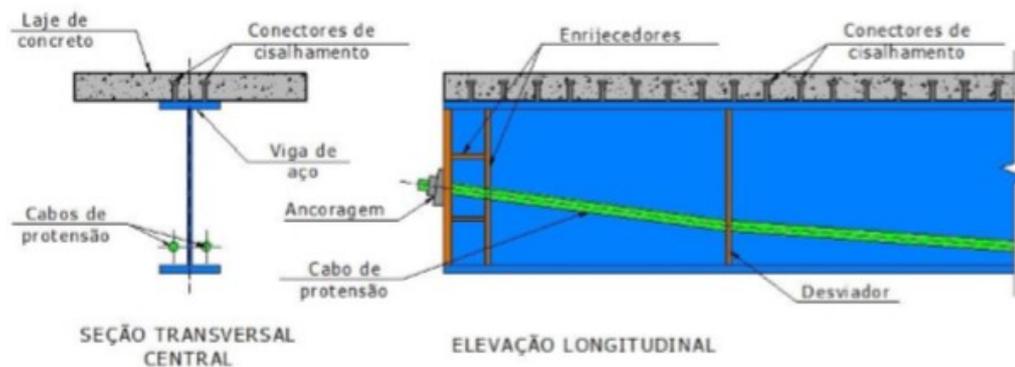
Figura 10 – Protensão em estruturas metálicas.



Fonte: Nelsen (2013)

A protensão externa caracteriza-se por os cabos de protensão serem dispostos ao lado de fora da seção transversal da estrutura e, conforme Romero (2007), as forças de protensão são transferidas para a estrutura por meio dos pontos de ancoragens e dos desviadores, conforme figura 11. Não há aderência entre os cabos e a estrutura, somente nos pontos de ancoragem e nos desviadores, onde o atrito é intencionalmente gerado, permitindo a fixação do cabo.

Figura 11 - Croqui esquemático de protensão externa em viga mista aço-concreto.



Fonte: Nelsen (2013)

Segundo Reis (2003), com as particularidades apresentadas pela protensão externa, é possível chegar as seguintes conclusões:

- As aplicações de protensão externa são possibilitadas em quase todos os tipos de materiais de construção: aço, madeira, concreto, concreto combinados e outros que recentemente foram incorporados ao rol dos materiais de construção, como os materiais compósitos. Isso faz com que a aplicação desta técnica seja ampliada consideravelmente na construção civil;
- Como os cabos são colocados fora da seção estrutural, eles apresentam mais expostos aos agentes agressivos do meio ambiente, necessitando de excelentes dispositivos de proteção dos mesmos, tornando estes dispositivos objeto de interesse específico;

- Devido a disponibilidade de acesso aos cabos, os trabalhos de inspeção e manutenção dos mesmos são facilitados;
- Em decorrência da ausência de aderência entre os cabos e a estrutura é possível aliviar a protensão, reprotender, e até mesmo substituir os cabos de protensão, desde que os detalhes do projeto estrutural permitam estas alterações.

O sistema de protensão externa, quando comparadas à protensão interna possui vantagens consideráveis. De acordo com Desir (1993), algumas destas vantagens são:

- Um eficiente meio para recuperação e reforço de estruturas;
- A melhoria e facilidade de concretagem, posto que a ausência dos cabos no interior no concreto facilita a vibração, elevando a qualidade do concreto;
- Redução no tempo de execução do trabalho. A protensão externa dispensa muitas operações que são imprescindíveis na protensão interna, como colocação, regulagem e fixação das bainhas, e concordância de bainhas nas juntas de obras com aduelas pré-fabricadas.
- A facilidade no traçado dos cabos e redução de perdas de protensão por atrito, já que o traçado é ligado à estrutura apenas nos pontos de desvio e ancoragem;
- Melhores condições de injeção e de controle de qualidade. A inspeção de injeção é direta, sendo fácil analisar possíveis fugas das bainhas ou entupimento das mesmas, assegurando, desta forma, a proteção contra corrosão dos cabos;
- Possibilidade de substituição dos cabos;
- A independência da estrutura e da protensão. Esta flexibilidade gerada por este sistema permite a combinação de diferentes tipos de materiais com a protensão externa.

Entretanto, apesar as vantagens apresentadas, a aplicação de protensão externa também possui desvantagens quando comparadas à protensão interna. Algumas desvantagens citadas por Desir (1993) são:

- O controle de vibração ao longo do cabo;
- O risco de ruptura sem aviso prévio, visto que a capacidade do cabo depende muito do desenho da ancoragem e dos desviadores;
- O problema de difusão das forças nos pontos de aplicação da protensão.

Além destas desvantagens, Reis (2003) menciona o fato de os cabos estarem mais expostos a influências ambientais tais como fogo, vandalismo e agressividade dos elementos

químicos presentes no meio ambiente. Além disso, os desviadores e ancoragens devem ser colocados com alto grau de precisão, o que em muitas circunstâncias é difícil conseguir.

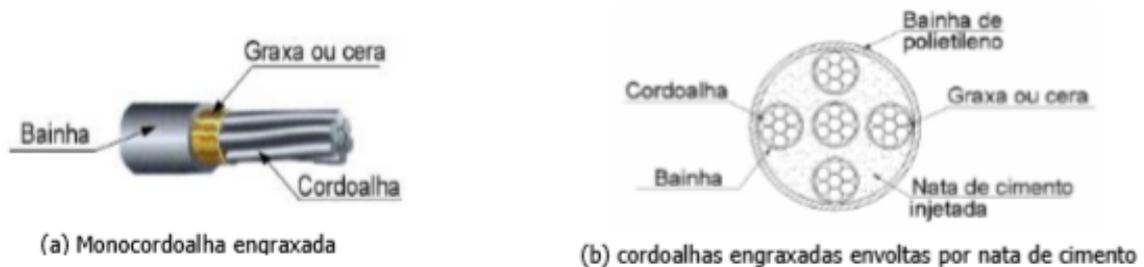
2.4.1 Cabos de Protensão

Os cabos de protensão são formados por um conjunto de fios ou cordoalhas de aço, que consiste em um grupamento de pelo menos seis fios, em torno de um fio central. Devido este sistema de protensão ser externo, é fundamental a proteção dos cabos contra agentes agressivos do meio ambiente, evitando sua corrosão, desta forma a cordoalha é envolta com graxa e uma capa de polietileno, possibilitando também a movimentação das cordoalhas nas bainhas.

Conforme Ferreira (2007), o cabo é engraxado por meio de processo contínuo, através do qual a cordoalha é coberta com graxa inibidora de corrosão e posteriormente revestida com uma capa de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), a qual constitui a bainha do cabo, conforme a figura 12 (a).

“Quando o cabo é formado por várias cordoalhas as mesmas são agrupadas e envolvidas por um tudo denominado bainha, sendo que após a protensão é injetado nata de cimento na bainha para a proteção das cordoalhas” (NELSEN, 2013, p. 60). A figura 12 (b) ilustra estas cordoalhas agrupadas.

Figura 12 - Desenhos esquemáticos de monocordoalha e cordoalha engraxadas.



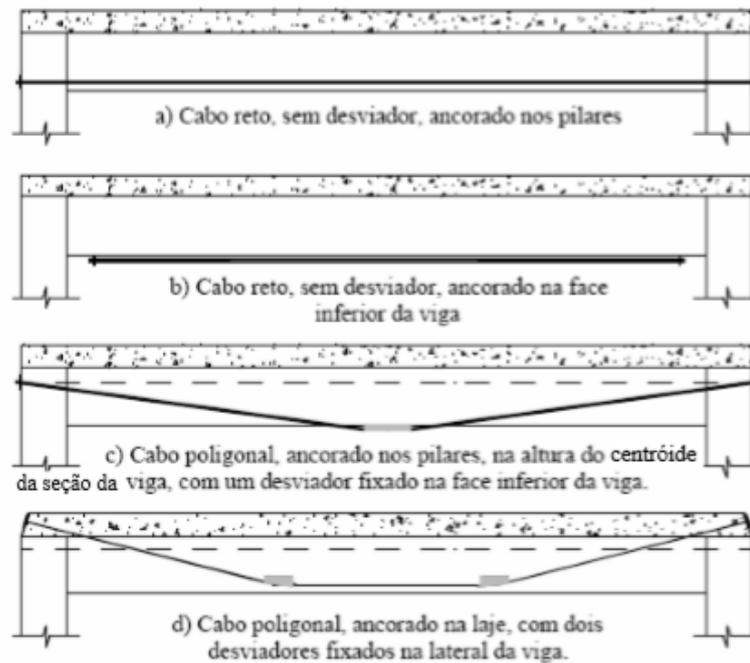
Fonte: Ferreira (2007)

Os fios e cordoalhas utilizados na protensão externa são normatizados pelas normas técnicas ABNT NBR 7482:2008 e ABNT NBR 7483:2008.

2.4.2 Traçado dos Cabos de Protensão

Conforme Romero (2007) os cabos podem ser traçados na forma retilínea ou poligonal; ancorados nos pilares, nas vigas ou nas lajes; com ou sem desviadores, conforme a figura 13.

Figura 13 – Geometria dos cabos de protensão.



Fonte: Almeida (2001)

- **Cabos Retilíneos**

Segundo Yen et al (2004 apud NELSEN, 2013, p. 65) os cabos com traçado retilíneos são usualmente instalados abaixo do eixo neutro da viga com o intuito de maximizar a excentricidade. Esse tipo de traçado é mais utilizado para vãos com momentos uniforme.

- **Cabos Poligonais**

O traçado poligonal caracteriza-se por possuir inflexões ao longo do traçado, gerados a partir da aplicação de desviadores, proporcionando maior excentricidade do cabo em relação ao centro gravitacional da viga.

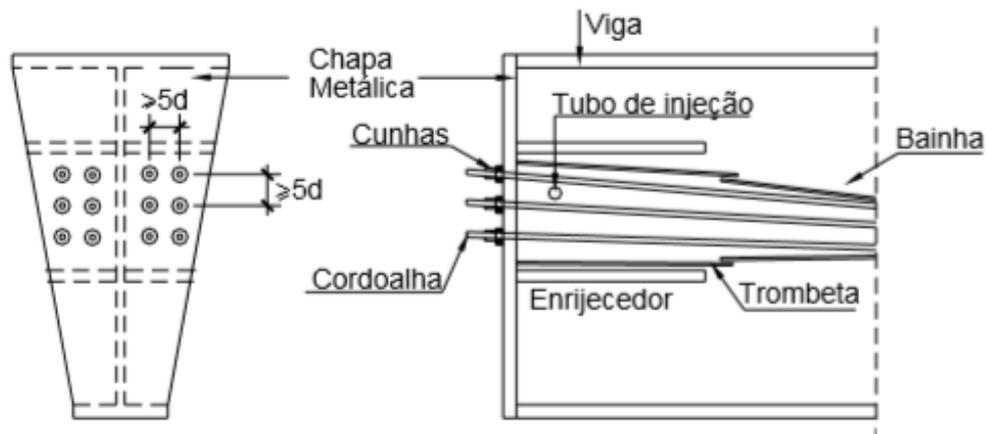
Conforme Nelsen (2013), os traçados poligonais com ancoragem nas extremidades da viga, principalmente em vigas com seções transversais reduzidas nos apoios, garantem maiores vantagens na capacidade de suporte de cargas elevadas e cargas móveis.

2.4.3 Ancoragem

A ancoragem consiste em um dispositivo inserido no local de fixação dos cabos de protensão, e possuem como função não permitir que o cabo perca a capacidade de tensão após instalado, de forma que a força aplicada pelo macaco hidráulico seja mantida. Desta forma, com a ancoragem, os cabos não voltam ao seu estado original após tensionados. Há dois tipos de ancoragem mais utilizadas: tipo cunha metálica e tipo rosca e porca.

Conforme Ferreira (2007) a ancoragem do tipo cunha metálica é formada basicamente por uma chapa metálica aplicada na seção transversal da viga (placa de ancoragem), enrijecedores longitudinais metálicos soldados à alma, cunhas metálicas que irão ancorar cada cordoalha individualmente, trombeta de plástico ou metálica (peça cônica de transição entre a bainha e a placa de ancoragem) e um tubo para injeção final da nata de cimento, conforme figura 14.

Figura 14 - Ancoragem através da utilização de cunhas metálicas.



Fonte: Nuzianta et al (1999 apud FERREIRA, 2007, p. 41)

A ancoragem por rosca e porca é mais utilizada com barras de aço de protensão, porém também podem ser aplicadas com fios e cordoalhas. Nesse caso é necessário fazer uma ligação dos fios com um parafuso ou outra peça com rosca (NELSEN, 2013).

Na ancoragem por porca e rosca podem ser utilizadas barras com rosca em todo o seu comprimento, podendo ser cortadas em qualquer dimensão dependendo da necessidade, ou barras lisas com rosca apenas nas extremidades. Ambas são compostas por aço de alta resistência e baixa relaxação (FERREIRA, 2007). A figura 15 apresenta o sistema de ancoragem por rosca e porca.

Figura 15 - Sistema de ancoragem rosca e porca para barras de protensão.



Fonte: Ferreira (2007)

2.4.4 Desviadores

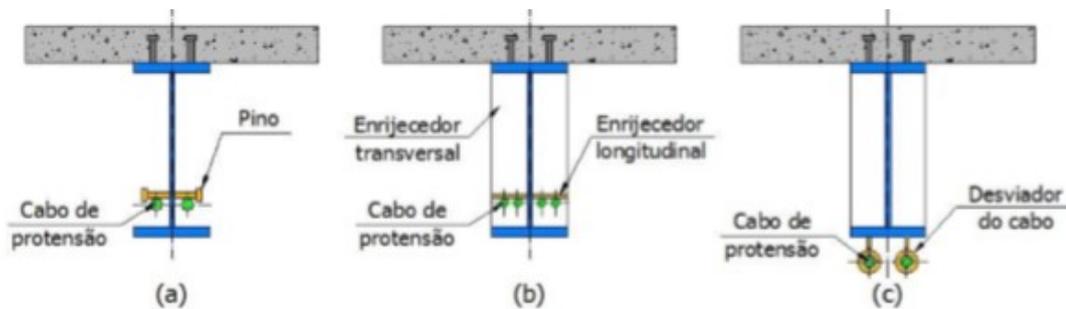
Os desviadores são elementos adicionados à viga com função de conduzir o fio ao traçado que ele está dimensionado, podendo ser retilíneo ou poligonal. Além disso, os desviadores também auxiliam a transmissão das forças de protensão para a estrutura.

Conforme Romero (2007, p. 10)

Os desviadores são elementos adicionados à estrutura com a finalidade de desviar os cabos de protensão em determinados pontos, podendo ser usados mesmo quando o cabo é reto. Neste caso, eles funcionam mais como “fixadores” do que “desviadores”, para manter a excentricidade do cabo de protensão quando a viga se deforma.

Segundo Nelsen (2013), os desviadores podem ser na forma de pino, com uma saliência na cabeça do pino para manter a posição do cabo, soldados à alma; ou chapas metálicas soldadas a alma da viga, com função de desviar e enrijecer a viga. Além disso há a possibilidade de adicionar os desviadores abaixo da mesa inferior da viga, de acordo com cada aplicação de protensão. As figuras 16 e 17 ilustram os tipos de desviadores.

Figura 16 - Tipos de desviadores dos cabos de protensão.



Fonte: Nelsen (2013)

Figura 17 - Desviadores para posicionamento abaixo da viga metálica.



Fonte: Darly & Witarnawan et al (2000 apud NELSEN, 2013, p. 64)

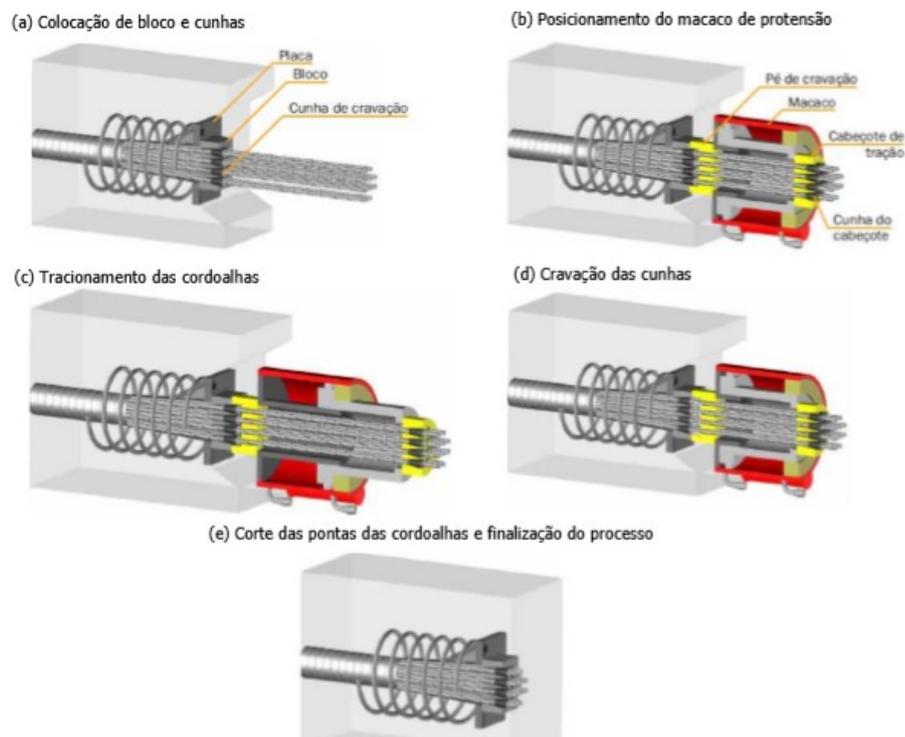
O tipo de traçado influencia diretamente na quantidade de desviadores. O traçado retilíneo exige uma quantidade menor de desviadores, visto que os mesmos apenas garantem que o cabo acompanhe a estrutura. Segundo Almeida (2001), em relação aos traçados poligonais, é importante ressaltar que a mudança de direção nos desviadores deve ser suave para que não haja uma concentração de tensão exageradas nestes pontos que venha a acarretar a ruptura prematura.

2.4.5 Aplicação da Protensão

Para a aplicação da protensão são utilizados macacos hidráulicos e bombas de alta tensão, a fim de produzir altas tensões no cabo a ser protendido.

Conforme Nelsen (2013), o processo de aplicação da protensão geralmente é composto pelas etapas de preparação, colocação do equipamento (macaco hidráulico), protensão nas cordoalhas, cravação das cunhas e acabamento. A etapa de preparação refere-se ao posicionamento dos cabos e sistemas de ancoragem. Em seguida acopla-se o macaco hidráulico aos cabos. Posteriormente executa-se o acionamento do macaco hidráulico para o tracionamento das cordoalhas por meio da bomba de alta pressão. O processo de protensão é finalizado quando é atingida a carga e/ou alongamento indicada no projeto estrutural, então a pressão é aliviada e as cordoalhas são ancoradas, e, por fim, realizam os cortes das pontas das cordoalhas e acabamentos. A figura 18 ilustra este processo.

Figura 18 - Exemplo de processo de protensão.



2.4.6 Perdas de Protensão

De acordo com Ferreira (2007) a força de proteção aplicada na estrutura não é constante ao longo do tempo e do espaço. Diversos fatores podem influenciar nas perdas de protensão como o acionamento dos macacos hidráulicos, a liberação dos cabos, a transferência de força de protensão, entre outros, originando uma série de efeitos que levam a uma redução da força de protensão com o passar do tempo.

As perdas podem ser classificadas como imediatas e progressivas. Segundo Nelsen (2013), as perdas imediatas geralmente são função da forma como se procede a protensão e das propriedades elásticas do aço e do concreto. Essas perdas ocorrem no momento da protensão e seu efeito é sentido imediatamente após a ancoragem do cabo. Podem ser classificadas como:

- Perdas por atrito: ocorrem nos pontos onde estão fixados os desviadores devido à variação angular do cabo no desviador;
- Perdas por progressão sucessiva: esta perda ocorre devido à deformação elástica do cabo já protendido, em razão da deformação elástica da viga;
- Perdas nas ancoragens: ocorre devido ao encunhamento ou acomodação da ancoragem.

As perdas progressivas, conforme Ferreira (2007) são as perdas que ocorrem ao longo da vida útil da estrutura, depois que os cabos já estão protendidos e ancorados. São exemplos de perdas progressiva:

- Deformação lenta do concreto;
- Retração do concreto;
- Relaxação do aço de protensão.

2.5 SOFTWARE ANSYS

O software ANSYS é uma ferramenta computacional que faz análises estruturais em diversos campos da Engenharia, como Civil, Naval, Aeronáutica e Mecânica. Essa ferramenta faz uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), e dentro do software estão disponíveis para análises estruturais os programas: ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Structural e ANSYS/Professional.

Segundo Abreu (2016)

O ANSYS é um sistema comercial que utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para desenvolvimento e estudos de modelos numéricos em diversos campos científicos. Através da utilização desse sistema computacional é possível a modelagem de sistemas estruturais, problemas de escoamento, transmissão de calor, elétricos, bem como problemas dinâmicos modais e transientes. Além disso, o ANSYS possibilita a interação de resultados entre modelos das diversas áreas da

Engenharia. Por exemplo, utilizar os resultados de um problema térmico (dilatações) em um problema estrutural.

Conforme Marinho (2002), o ANSYS possibilita solucionar 7 tipos de análises estruturais

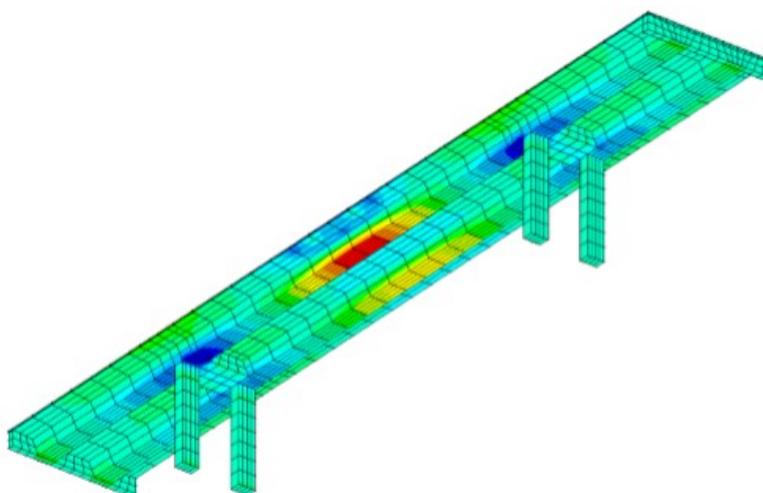
- **Análise estática:** usada para determinar tensões, deslocamentos e deformações, sob condição de carga estática. Esta análise possui dois tipos, linear e não linear, sendo que as não-linearidades podem incluir plasticidade, tensão, grandes deformações, grandes tensões, rigidez, hiperelasticidade, contato e fissuração;
- **Análise de flambagem:** esta análise calcula as cargas de flambagem e determina a forma do modo de flambagem. São possíveis análises de flambagem linear e flambagem não linear.
- **Análise modal:** calcula as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura. Há diferentes métodos disponíveis para extração dos modos de vibração;
- **Análise harmônica:** possibilita determinar a resposta de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo;
- **Análise dinâmica transiente:** possibilita determinar a resposta de uma estrutura às cargas arbitrariamente variáveis no tempo. São permitidas todas as não-linearidades mencionadas na análise estática;
- **Análise espectral:** refere-se a extensão da análise modal, na qual calcula tensões e deformações devidas a um espectro de resposta ou uma contribuição de PSD (vibrações aleatórias).
- **Análise Dinâmica Explícita:** nesta análise o ANSYS provê uma interface ao LD-DYNA, programa de elementos finitos utilizado para calcular soluções rápidas para cargas dinâmicas, grandes deformações e problemas de contato complexos.

Para a análise de uma estrutura, o software ANSYS procede em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. De acordo com Abreu (2016), no pré-processamento é definido todas as características do elemento a ser analisado, tipo de elemento, geometria, carga solicitante, condições de contorno, bem como a malha dos elementos finitos. No processamento, determina-se qual o tipo de solução aplicada, como o carregamento que atua na estrutura e quais as suas restrições. No pós-processamento, é obtido os resultados, podendo ser calculados por nó, por elemento ou por incremento de carga, conforme com o objetivo da análise.

2.5.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser definido como uma análise matemática que realiza a divisão do elemento contínuo em uma quantidade finita de elementos menores, mantendo suas propriedades, possibilitando a resolução de problemas complexos. Os elementos finitos são conectados entre si por pontos denominados nós ou pontos nodais, e o conjunto destes pontos formam a malha de elementos finitos (MARINHO, 2002). A figura 19 ilustra a estrutura subdividida com o MEF.

Figura 19 - Estrutura subdividida em elementos finitos.



Fonte: Azevedo (2003)

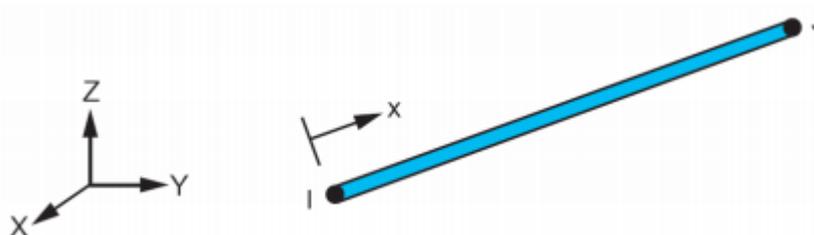
Segundo Azevedo (2003), na Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria aleatória sujeito a ações externas. Com o MEF é possível a realização de análise estrutural dinâmica e estática (linear e não-linear). O MEF baseia-se em variados métodos, como método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio ou métodos híbridos e mistos. Dentre estes métodos, o que apresenta maior simplicidade e versatilidade é o método dos deslocamentos.

2.5.2 Elemento LINK180

Para a simulação de cabos e/ou treliças no software Ansys é necessário configurar os materiais na etapa de pré-processamento com o tipo de elemento específico para tal simulação. Conforme Ayala (2017), quando é necessário simular fibras de reforço sem aderência no interior de um elemento base, o elemento de treliça LINK180 torna-se uma opção adequada pois admite comportamentos lineares, não-lineares e grandes deformações. Este elemento possui funções de interpolação lineares, e há possibilidade de agir apenas como “tensão” ou

apenas como “compressão”. A teoria deste elemento considera apenas dois nós, conforme figura 20, com três graus de liberdade por nó (três translações), um ponto de integração e dispensa os efeitos de corte e flexão.

Figura 20 – Elemento LINK180.



Fonte: Ayala (2017)

De acordo com Ayala (2017) o elemento LINK180 é definido pelo comando ET. São admitidas várias formas de seção transversal para análise, sendo apenas necessário especificar as respectivas áreas pelos comandos SECTYPE e SECDATA. Entretanto, a principal limitação do uso deste elemento deve-se a que os nós do mesmo têm que coincidir com os nós do elemento base na direção adjacente, limitando a discretização da malha de elementos finitos.

2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura. Esta análise possui como objetivo a determinação de esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das correspondentes tensões, assim como a determinação dos deslocamentos e correspondentes deformações da estrutura a ser projetada. A análise estrutural deve ser feita para os possíveis carregamentos e solicitações obrigatoriamente determinados previamente (MARTHA, 2010).

A análise estática é aplicada para determinar tensões, deslocamentos e deformações, sob aplicação de carga estática. Podem ser do tipo linear e não linear. Conforme Fontes (2005):

- **Análise Linear:** Este tipo de análise considera os materiais elástico lineares. A elasticidade do material está relacionada à sua capacidade de voltar à sua configuração inicial após ter sofrido deformações decorrentes de ações externas, com posterior alívio de carregamento. Esse tipo de análise considera ainda uma relação linear entre as componentes de tensão e deformação do material, ou seja, existe uma constante de proporcionalidade responsável por essa relação, e de valor característico para cada material, denominada módulo de elasticidade.

- Análise Não-linear: Um material não linear é aquele que a relação entre tensão e deformação não pode ser definida por uma constante, ou seja, apresenta comportamento não-linear entre as tensão e deformações.

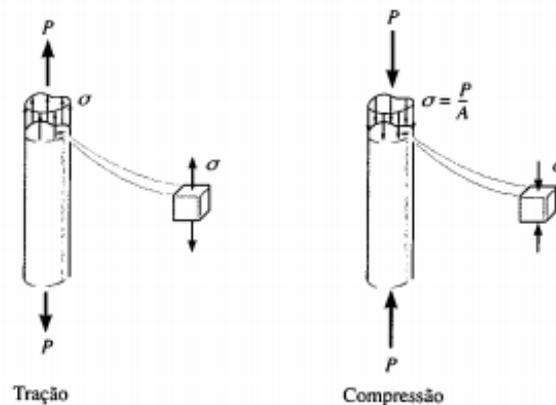
2.6.1 Tensão

O termo tensão consiste em uma relação entre a força exercida em um corpo atuando sobre sua área de contato. As tensões podem ser tensão normal e tensão de cisalhamento, conforme a direção de aplicação desta força em relação a área à que ela está exercida.

Conforme Hibbeler (2004):

- Tensão Normal (σ): A força (ΔF) atua no sentido perpendicular à área (ΔA) do corpo. Se a força normal ou tensão “empurra” o elemento de área é denominado tensão de tração, se a força “puxa” a área é chamada tensão de compressão, conforme figura 21.

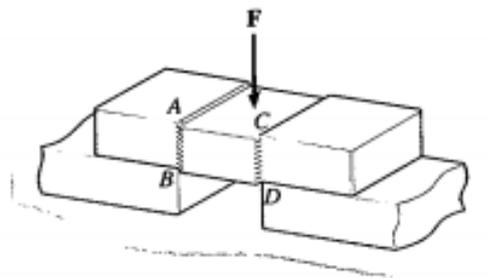
Figura 21 - Tensão normal de tração e compressão.



Fonte: Hibbeler (2004)

- Tensão de Cisalhamento (τ): A força (ΔF) atua no sentido tangente à área (ΔA) do corpo, como ilustra a figura 22.

Figura 22 - Tensão de Cisalhamento.



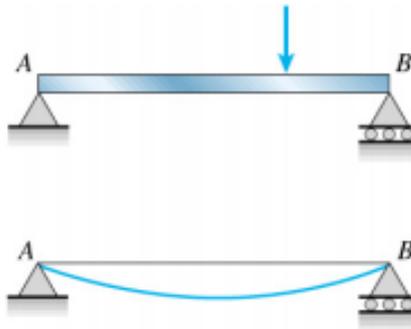
Fonte: Hibbeler (2004)

2.6.2 Deformação

Segundo Hibbeler (2004), deformação denomina-se a mudança de forma e tamanho de um corpo após a aplicação de uma força sobre o mesmo, conforme figura 23. Tais mudanças podem ser perfeitamente visíveis ou imperceptíveis sem o uso de equipamentos que façam medições precisas. De maneira geral, a deformação não é uniforme em todo o seu volume, e desta forma, a mudança na geometria de qualquer segmento da reta do corpo pode variar ao longo do comprimento. Por exemplo, uma parte da reta pode alongar-se, enquanto a outra pode contrair-se. As deformações na estrutura podem ocorrer de duas formas: deformação normal e deformação por cisalhamento:

- Deformação Normal: é a medida do alongamento ou da contração de um pequeno segmento de reta do corpo por unidade de comprimento, portanto, provocam a mudança de volume do elemento;
- Deformação por Cisalhamento: é a mudança de ângulo ocorrida entre dois segmentos de reta originalmente perpendiculares entre si, logo, provocam a mudança no formato do elemento.

Figura 23 – Deformação em viga biapoiada.

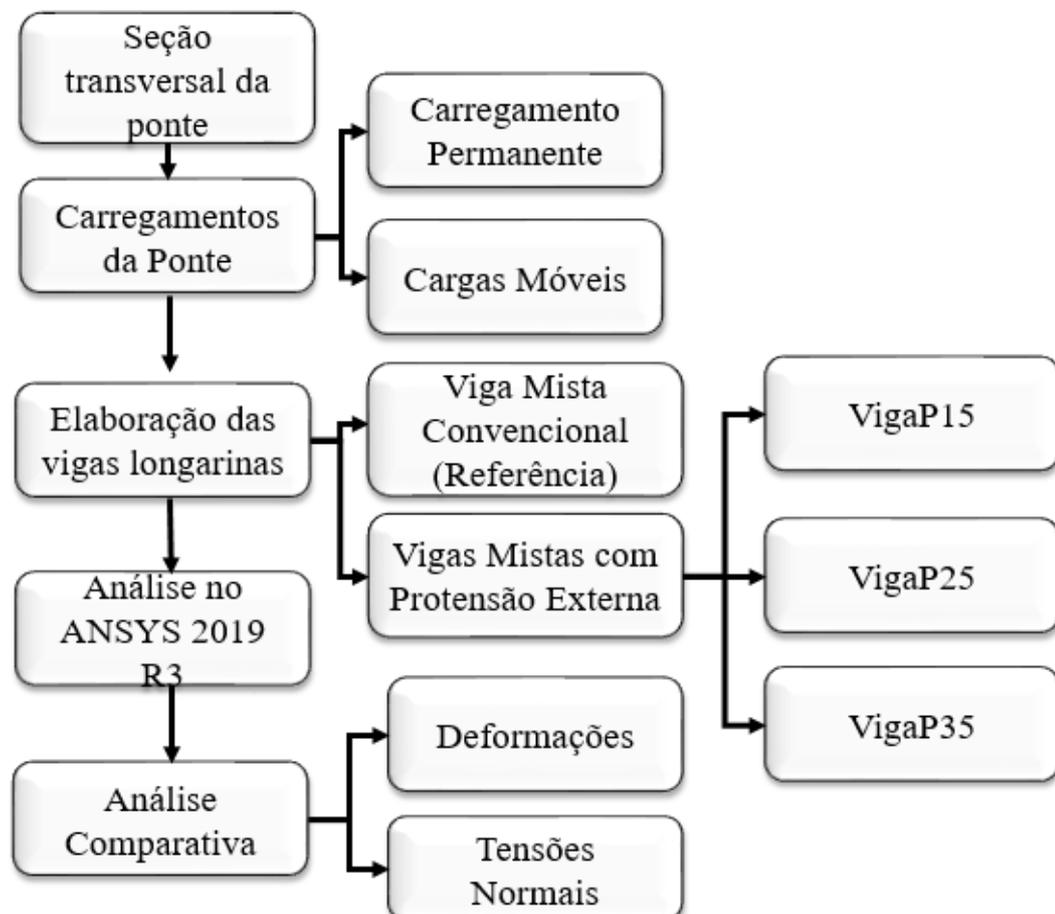


Fonte: Buffoni (2017).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada considerando uma proposta de ponte rodoviária, na qual foram analisados 04 modelos de vigas longarinas: um com uma viga longarina mista de aço e concreto convencional elaborada seguindo os critérios da ABNT NBR 8800:2008, e os seguintes com a mesma longarina mista, porém com 03 diferentes tipos de aplicação de protensão externa. Para a análise foi mantido constante a seção transversal geométrica da viga, bem como seu comprimento, alterando a altura de aplicação dos cabos de protensão externa.

O fluxograma a seguir apresenta as principais etapas para a realização da pesquisa, que serão expostas em detalhes posteriormente.



Fonte: Autor (2020).

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa possui abordagem quantitativa, visto que realizou análise dos resultados numéricos de tensões e deformações obtidos a partir da análise estrutural. Com natureza

exploratória e procedimento experimental, uma vez que foram realizados 04 tipos distintos de análise estrutural na mesma ferramenta computacional.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

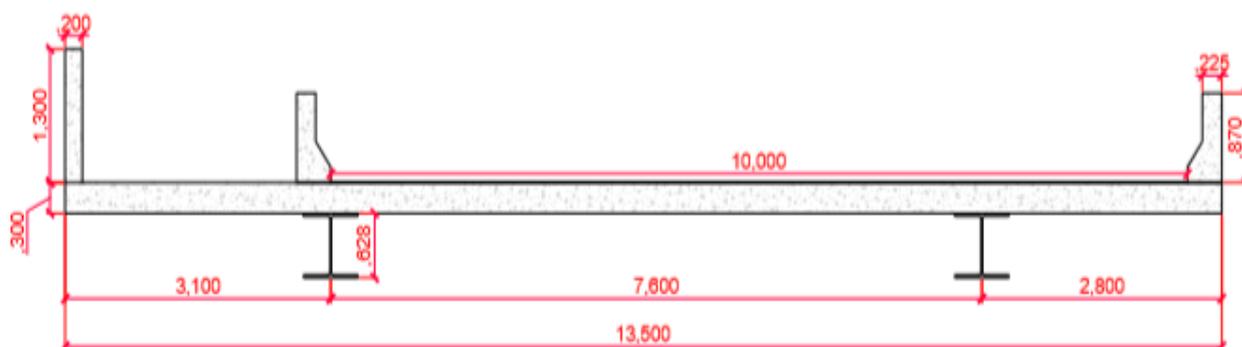
A ponte proposta para o estudo é do tipo Ponte em Viga, com finalidade rodoviária, e possui 12 metros de extensão. A mesma é composta de duas vigas metálicas com seção I biapoiadas, e tabuleiro em concreto armado. Para a determinação na seção transversal e cargas exercidas sobre a estrutura, foi utilizado como referência uma ponte já executada em Palmas – TO, localizada na quadra 203 sul, avenida LO 05, Plano Diretor Sul.

A ponte referência é executada em concreto armado, possui 4 pilares, 2 vigas longarinas, 8 vigas transversinas e tabuleiro. O tabuleiro possui 0,30 m de altura e 13,50 m de largura. Sobre o mesmo está executado 2 guarda-rodas, 1 guarda-corpo com passeio para pedestre de 2,50 m e a pista de rolamento é executada em pavimento flexível, com 2 faixas de rolamento com 5 m de largura cada uma.

Deve-se ressaltar que o trabalho pretende abordar apenas o estudo das vigas e laje da ponte. Desta forma, foram considerados apoios de primeiro e segundo gênero nas extremidades das vigas, sendo, portanto, vigas isostáticas.

A figura 24 ilustra seção transversal da ponte proposta. A mesma foi elaborada considerando as duas vigas metálicas seção I simétricas, com o tabuleiro e cargas distribuídas sobre ele conforme a ponte referência.

Figura 24 – Seção transversal da ponte proposta.



Fonte: Autor (2020).

3.3 CARREGAMENTO DA PONTE PROPOSTA

A análise da viga longarina foi realizada por meio do software ANSYS versão 2019 R3, que faz uso do método dos elementos finitos para melhor precisão dos resultados. Para a análise

estrutural é necessário considerar as cargas que estão exercidas sobre a estrutura, desta forma, foram consideradas as ações permanentes e ações variáveis da ponte.

3.3.1 Ações permanentes

Com relação ao carregamento permanente, foi considerado o seguinte carregamento de utilização:

- Peso próprio da laje de concreto: 25 kN/m³;
- Peso próprio da viga de aço: 78,5 kN/m³;
- Sobrecarga do revestimento da pavimentação: 24 kN/m³;
- Sobrecarga guarda-corpo e guarda-roda: 25 kN/m³.

Os carregamentos referentes aos pesos próprios da viga de aço e laje de concreto armado foram aplicadas dentro do software, na qual são inseridas as propriedades dos materiais, foram adicionadas as densidades dos mesmos, e acionado a força gravitacional. Esta etapa será descrita em detalhes posteriormente.

Quanto ao carregamento de sobrecarga do revestimento de pavimentação, o mesmo foi calculado considerando uma espessura de revestimento de 7 cm, sendo realizado da seguinte maneira:

$$Q_p = A * \lambda$$

Sendo:

Q_p = Carga do revestimento de pavimentação (kN/m);

A = Área da pavimentação considerando faixa de 01 metro de revestimento (m²);

λ = Peso específico do material de pavimentação (kN/m³);

Com relação aos carregamentos do guarda-corpo e guarda-rodas, foram calculadas as cargas pontuais exercidas pelos mesmos na seção transversal da ponte. O cálculo procedeu-se conforme fórmula abaixo:

$$P = A * \lambda$$

Sendo:

P = Força pontual do guarda-corpo ou guarda-rodas (kN);

A = Área da seção transversal do guarda-corpo ou guarda-rodas (m²);

λ = Peso específico do concreto armado (kN/m³).

A tabela 2 apresenta o cálculo da força pontual exercida pelo guarda-rodas, com valor de 6,10 kN.

Tabela 2 – Carregamento dos guarda-rodas da ponte.

GUARDA-RODAS			
A1	0,15	0,4	0,060
A2	0,225	0,25	0,056
A3	0,175	0,25	0,022
A3	0,225	0,47	0,106
Área da Seção Transversal (m²)			0,244
Faixa de 1 metro			1
Peso Específico (kN/m³)			25
Peso (KN)			6,10

Fonte: Autor (2020)

A tabela 3 apresenta o cálculo da força pontual exercida pelo guarda-corpo, com valor de 6,50 kN.

Tabela 3 – Carregamento do guarda-corpo da ponte.

GUARDA-CORPO			
A	0,2	1,3	0,26
Área da seção transversal (m²)			0,260
Faixa de 1 metro			1
Peso específico (kN/m³)			25
Peso (kN)			6,50

Fonte: Autor (2020)

A tabela 4 apresenta o cálculo da carga uniformemente distribuída exercida pela pavimentação, com valor de 1,68 kN/m.

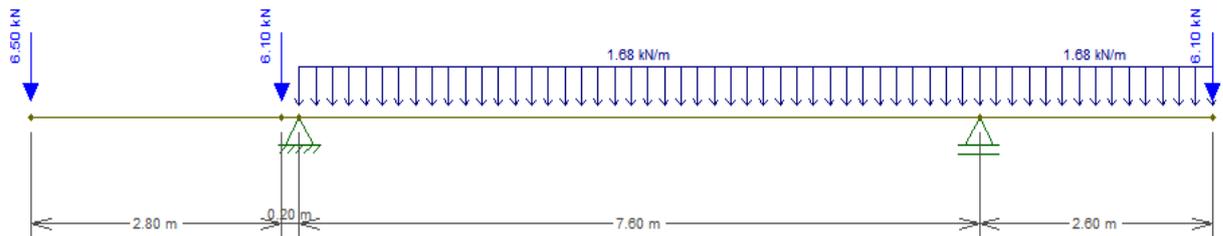
Tabela 4 – Carregamento do revestimento de pavimentação.

PAVIMENTAÇÃO			
A	0,07	1	0,07
Área (m²)			0,070
Peso Específico (kN/m³)			24
Peso (kN/m)			1,68

Fonte: Autor (2020)

Após calculado o carregamento uniformemente distribuído do revestimento de pavimentação e as forças pontuais de guarda-corpo e guarda-rodas, os mesmos foram inseridos no software Ftool, onde foi representada a seção transversal da ponte com as respectivas forças, e obtido o valor de reação que esses carregamentos exercem em cada uma das vigas, conforme figura 25.

Figura 25 – Seção transversal da estrutura no software Ftool.



Fonte: Autor (2020)

Em seguida, foi extraído a maior reação exercida entre as duas vigas, visto que a mesma representa a pior situação, conforme figura 26.

Figura 26 – Reações de apoio nas vigas longarinas.



Fonte: Autor (2020)

Logo, a maior reação exercida foi de 18,88 kN, e essa força foi inserida no software como carga uniformemente distribuída sobre as vigas mistas aço-concreto.

3.3.2 Ações variáveis

Quanto às ações variáveis, foram consideradas cargas móveis, sendo o trem-tipo de tipo TB-450, de 450 kN, com três eixos, seguindo a norma ABNT NBR 7188:2013. Para a análise foram consideradas 03 forças pontuais de 150 kN, conforme orientação da norma técnica. Nesta análise a multidão foi desprezada.

O coeficiente de impacto foi calculado seguindo as orientações da ABNT NBR 7188:2013, conforme apresentado abaixo:

- Coeficiente de Impacto Vertical
 - a) $CIV = 1 + 1,06 * \left(\frac{20}{L_{iv+50}}\right)$ para estruturas com vão entre 10,0 e 200,0m.
- Coeficiente do número de faixas
 - a) $CNF = 1 - 0,05 * (n - 2) > 0,9$

- Coeficiente de Impacto Adicional
 - a) CIA = 1,25 para obras em concreto ou mistas.

A tabela 5 apresenta o resultado do Coeficiente de Impacto calculado conforme citado acima.

Tabela 5 – Cálculo do Coeficiente de Impacto.

COEFICIENTE DE IMPACTO	
Coeficiente de Impacto Vertical	1,34
Coeficiente de Impacto Adicional	1,25
Coeficiente de Número de Faixas	1,00
Coeficiente de Impacto Total	1,68

Fonte: Autor (2020)

Após calculados os coeficientes obteve-se um resultado para o coeficiente de impacto de 1,68, portanto, as forças pontuais do trem-tipo com valor de 150 kN foram acrescidas em 68%, resultando em três forças pontuais 252 kN. As forças pontuais foram aplicadas no centro da viga mista tanto em sentido transversal quanto longitudinal, uma vez que essa posição representa a pior situação na extensão da viga.

3.4 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DAS VIGAS LONGARINAS

A princípio, para a elaboração da viga mista aço e concreto convencional foi escolhido o perfil de aço para análise no catálogo do fabricante. O mesmo possui perfil I, simétrico, com área transversal de 278,4 cm². A tabela 6 apresenta as dimensões extraídas do catálogo.

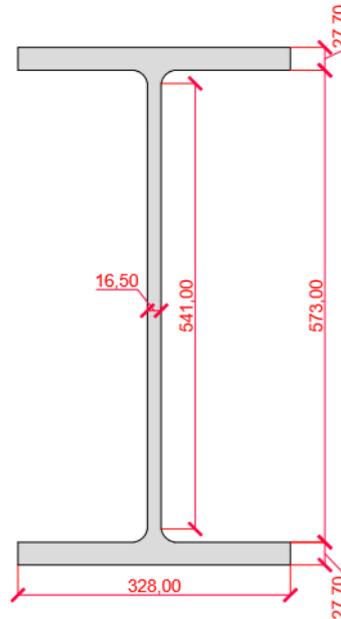
Tabela 6 – Perfil estrutural I da Tabela de Bitolas Gerdau.

Bitola (mm x kg/m)	Massa Linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	Espessura		h (mm)	d' (mm)	Área (cm ²)
				tw (mm)	tf (mm)			
W 610 X 217,0	217,0	628,0	328,0	16,5	27,7	573,0	541,0	278,40

Fonte: Adaptado por Perfis Estruturais Gerdau (2017).

A seção transversal com as respectivas dimensões está ilustrada na figura 27, com medidas em mm.

Figura 27 – Perfil I da viga metálica.



Fonte: Autor (2020).

Em seguida, calculou-se a largura efetiva da laje de concreto, conforme recomendação da ABNT NBR 8800:2008. O cálculo procedeu-se conforme descrito abaixo:

- Vigas mista biapoiada:
 - a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
 - Le = 11,1/8
 - Le = 1,39 m
 - b) Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
 - Le = 7,6/2
 - Le = 3,80 m
 - a) Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.
 - Le = 3,00 m

Portanto, a largura efetiva da laje adotada para a análise dessa viga mista foi de 1,39 m para cada lado da viga. Em seguida, com a viga mista elaborada, a mesma foi desenhada dentro do software ANSYS, na plataforma SpaceClaim, para posteriormente ser analisada no ANSYS/Mechanical.

Posteriormente, a partir da viga mista convencional, foram elaborados 03 novos modelos de viga mista, com a mesma seção, comprimento e características geométricas. A viga mista convencional foi nomeada de “viga referência”, e as demais vigas foram nomeadas de “viga P”. Dentro dos modelos “viga P” no ANSYS/Mechanical foram adicionados 03 tipos de

protensão, seguindo as orientações da ABNT NBR 7483:2008. As vigas possuem as seguintes características:

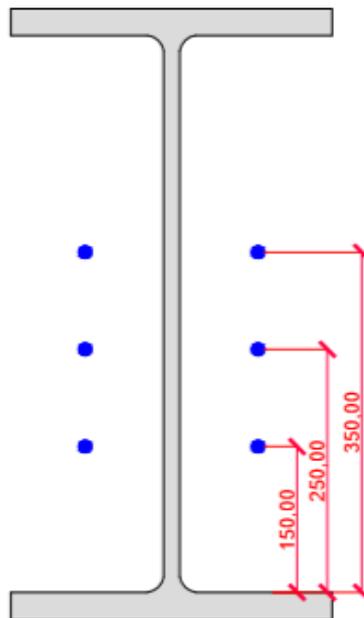
- **Viga Referência**

A viga referência possui seção I simétrica, composta de aço estrutural e laje de concreto armado. A laje e viga foram ligadas por conectores de cisalhamento do tipo “pino com cabeça”, e foram adotadas interação total entre as interfaces aço e concreto, sendo o deslocamento horizontal e vertical da laje sobre a viga igual a zero.

- **Viga P (Viga protendida)**

Os modelos de “viga P” foram compostos pela “viga referência”, adicionando o sistema de protensão com duas cordoalhas de 12,7 mm com 7 fios, aplicadas nas extremidades da alma da viga de aço. O traçado adotado foi o retilíneo, onde foram alteradas as aplicações nas extremidades da viga de aço, em 03 alturas diferentes. A figura 28 ilustra as alturas em que os cabos foram inseridos para as análises, com dimensões em mm.

Figura 28 – Alturas dos cabos de protensão.

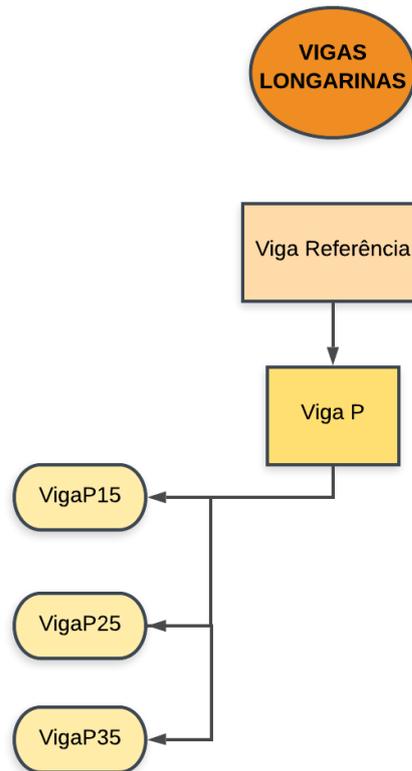


Fonte: Autor (2020).

Desta forma, realizou-se 03 análises na mesma viga, sendo nomeadas para apresentação dos resultados de: vigaP15, vigaP25, vigaP35.

O fluxograma apresentado na figura 29 ilustra a sequência da elaboração das vigas longarinas a serem utilizadas na análise.

Figura 29 - Fluxograma de elaboração das vigas longarinas.



Fonte: Autor (2020)

As vigas mistas com protensão externa foram analisadas sob os critérios de pós tensão, ou seja, a protensão foi considerada sendo aplicada após a concretagem da laje de concreto armado.

Quanto ao procedimento executivo, foi considerado o sistema de protensão por cordoalhas engraxadas, cobertas com proteção de polietileno, afim de garantir sua vida útil de projeto e evitar manifestações patológicas posteriores. As cordoalhas foram consideradas aplicadas por meio de macaco hidráulico com ancoragem do tipo cunha metálica nas extremidades, impedindo assim que os fios percam a capacidade de tensão após instalados. As forças exercidas pelos cabos são transmitidas para a estrutura através dos pontos de ancoragem.

3.5 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE ESTÁTICA NO ANSYS 2019 R3

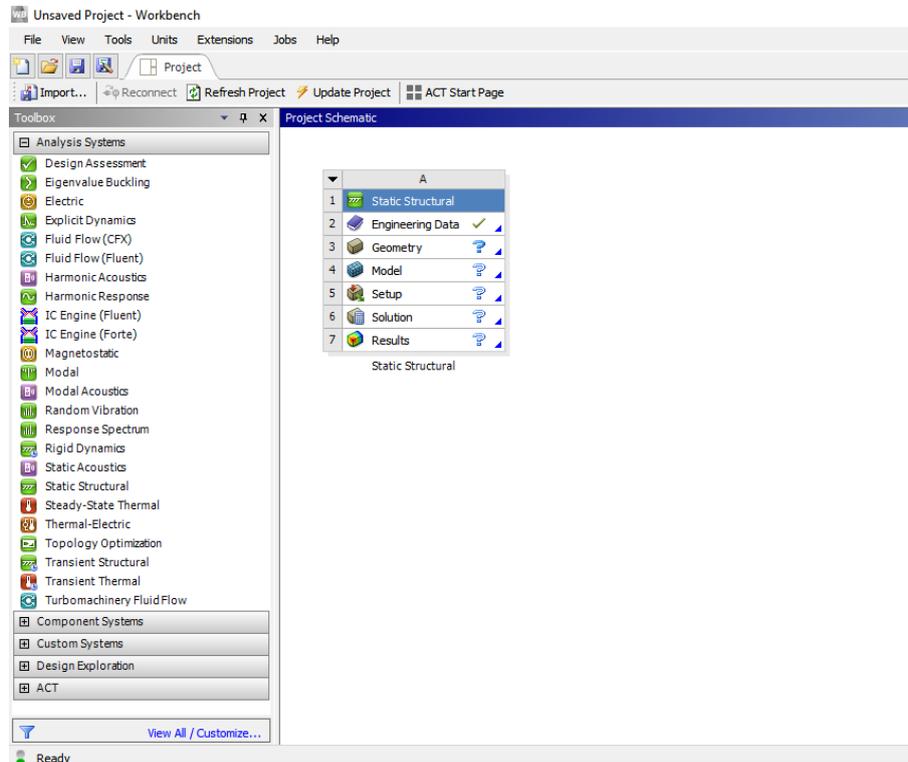
Com a seção das vigas elaboradas, as mesmas foram inseridas no ANSYS 2019 R3, onde realizou-se a análise estática linear. Para a análise estrutural prosseguiu-se com a seguinte sequência no software, a princípio iniciando pela viga referência.

3.5.1 Viga mista aço-concreto convencional

- **Tipo de análise**

Primeiramente, na plataforma Workbench 2019 R3 selecionou-se a análise “Static Struktural”, na qual foi aberta a aba de análise estrutural estática, conforme a figura 30.

Figura 30 - Interface Workbench 2019 R3 para análise estática estrutural.



Fonte: Autor (2020)

- **Materiais da estrutura**

Para iniciar a análise é necessário adicionar os materiais da estrutura. A viga mista aço-concreto analisada é composta pelos materiais: concreto armado e aço ASTM A36, conforme orientação da ABNT NBR 8800:2008. As propriedades mecânicas desses materiais estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos materiais da viga mista aço-concreto convencional.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS			
Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)
Aço ASTM A36	205000	0,3	7850
Concreto	23800	0,2	2500

Fonte: Adaptado por Ferreira (2007) e Eller (2011).

As propriedades acima citadas foram inseridas no Workbench 2019 R3 pela opção “engineering data”, conforme apresentam as figuras 31 e 32.

Figura 31 - Interface Workbench 2019 R3 para selecionar os materiais da estrutura: Concreto.

The screenshot shows the ANSYS Workbench 2019 R3 interface. The 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' window displays a table with the following data:

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source			Description
2	Material				
3	Aço ASTM A36				
4	Concreto				
5	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				

The 'Properties of Outline Row 4: Concreto' window displays the following table:

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2500	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young'...			
6	Young's Modulus	2,38E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,2			
8	Bulk Modulus	1,3222E+10	Pa		
9	Shear Modulus	9,9167E+09	Pa		

Fonte: Autor (2020)

Figura 32 - Interface Workbench 2019 R3 para selecionar os materiais da estrutura: Aço.

The screenshot shows the ANSYS Workbench 2019 R3 interface. The 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' window displays a table with the following data:

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source			Description
2	Material				
3	Aço ASTM A36				
4	Concreto				
5	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				

The 'Properties of Outline Row 3: Aço ASTM A36' window displays the following table:

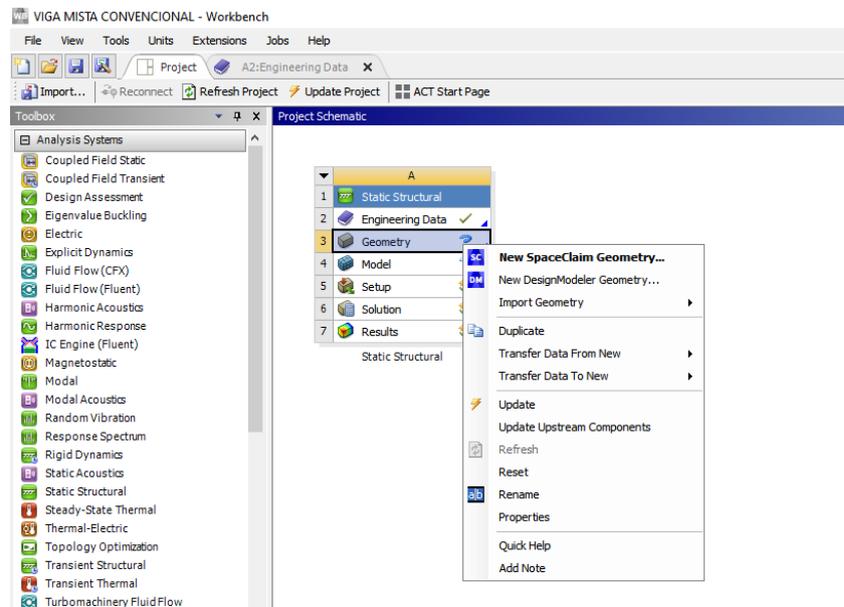
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young'...			
6	Young's Modulus	2,05E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,7083E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,8846E+10	Pa		

Fonte: Autor (2020)

- **Geometria da estrutura**

Em seguida, foi inserido a geometria da viga mista aço-concreto na opção “geometry”, extraindo-a do SpaceClaim e exportando para o Workbench 2019 R3, conforme demonstra a figura 33.

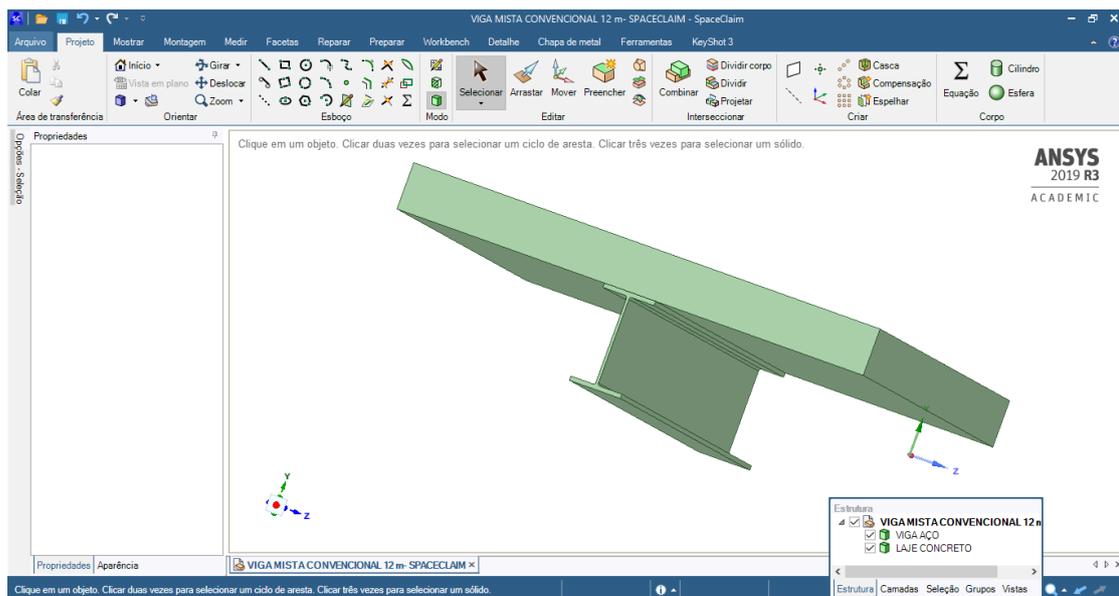
Figura 33 - Interface Workbench 2019 R3 para inserir a geometria da estrutura.



Fonte: Autor (2020)

A figura 34 apresenta a interface do SpaceClaim, na qual foi desenhada a geometria da viga mista.

Figura 34 – Geometria da viga mista no SpaceClaim.

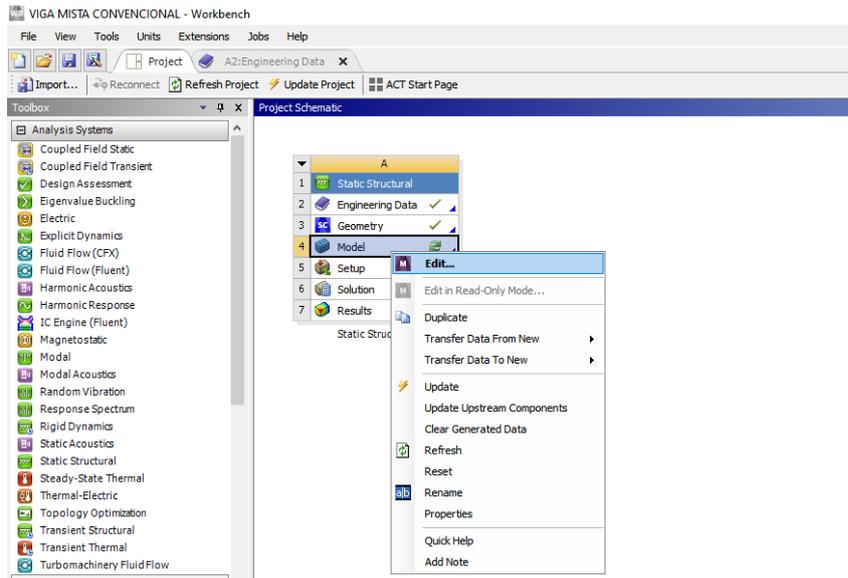


Fonte: Autor (2020).

- **Análise estática no ANSYS/Mechanical**

Após inserida a geometria da estrutura, abriu-se a plataforma ANSYS/Mechanical na opção “model”. Nessa plataforma foram realizadas as análises estruturais estáticas da geometria inserida, conforme ilustra a figura 35.

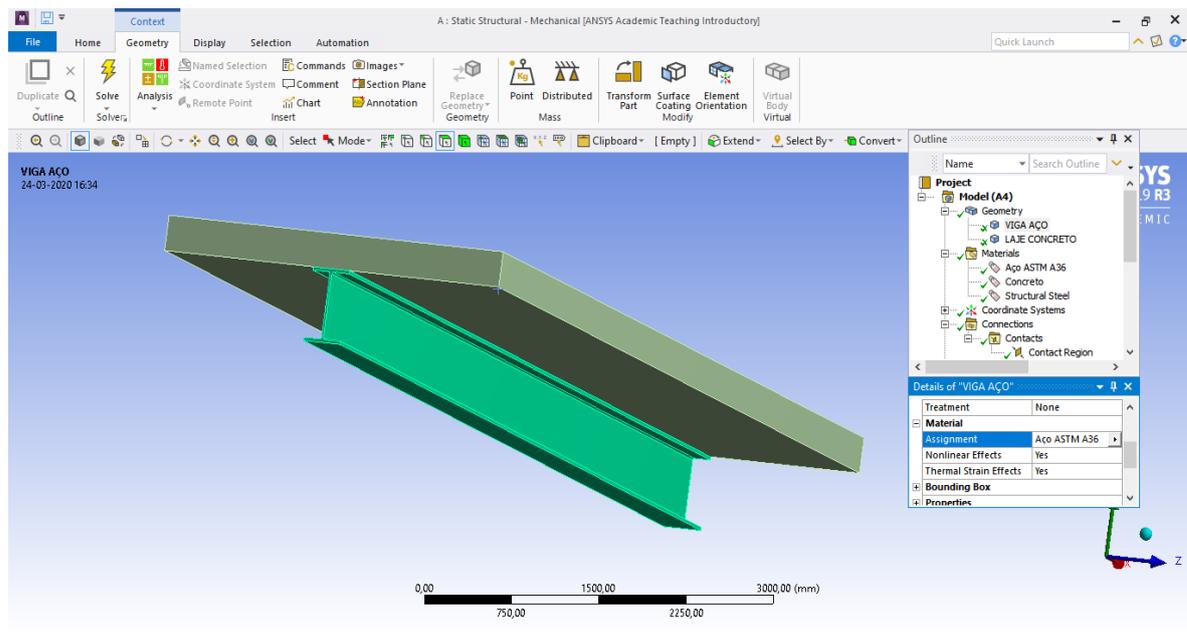
Figura 35 - Interface Workbench 2019 R3 para entrar na plataforma ANSYS/Mechanical.



Fonte: Autor (2020)

Na plataforma ANSYS/Mechanical, inicialmente foram modificados os materiais tanto da viga metálica, quanto da laje de concreto, conforme os inseridos anteriormente. A figura 36 apresenta a interface do ANSYS/Mechanical, exemplificando essa etapa com a seleção do material que compõe a viga.

Figura 36 - Interface da plataforma ANSYS/Mechanical para modificar os materiais da estrutura.

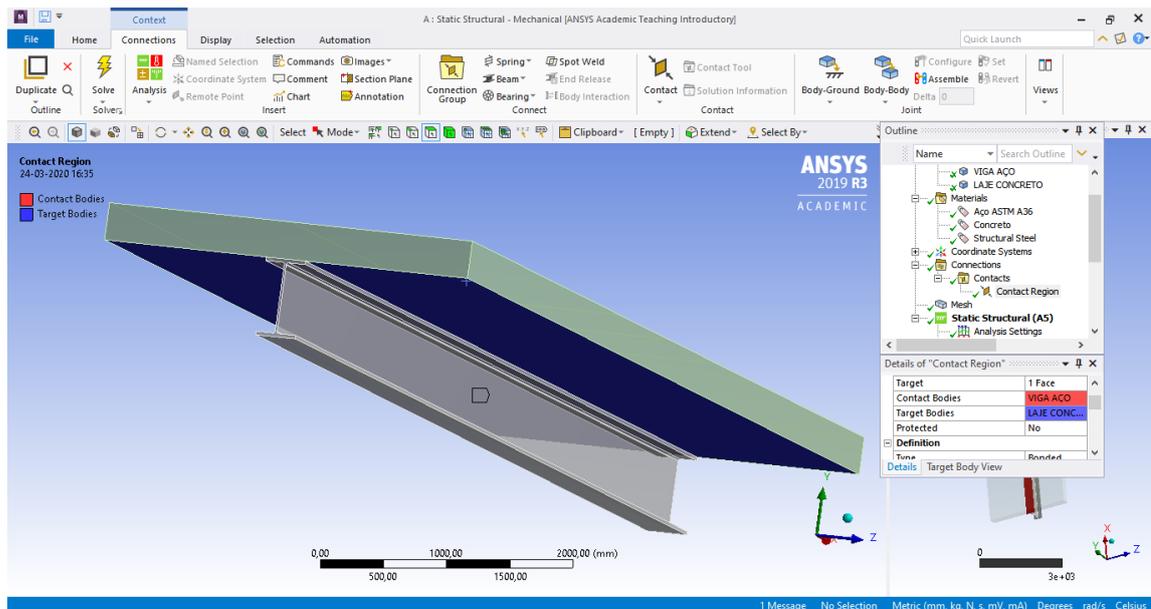


Fonte: Autor (2020)

- **Fixação de contato de laje de concreto e viga de aço**

Logo após selecionar os materiais de cada sólido da estrutura, foi fixado o contato entre viga de aço e laje de concreto. Esse contato equivale à função dos conectores de cisalhamento, impedindo a deslocamento da laje sobre a viga e, conseqüentemente, permitindo que a laje acompanhe a deformação da viga. A figura 37 ilustra essa seleção de contato.

Figura 37 - Interface do ANSYS/Mechanical para seleção de contato.

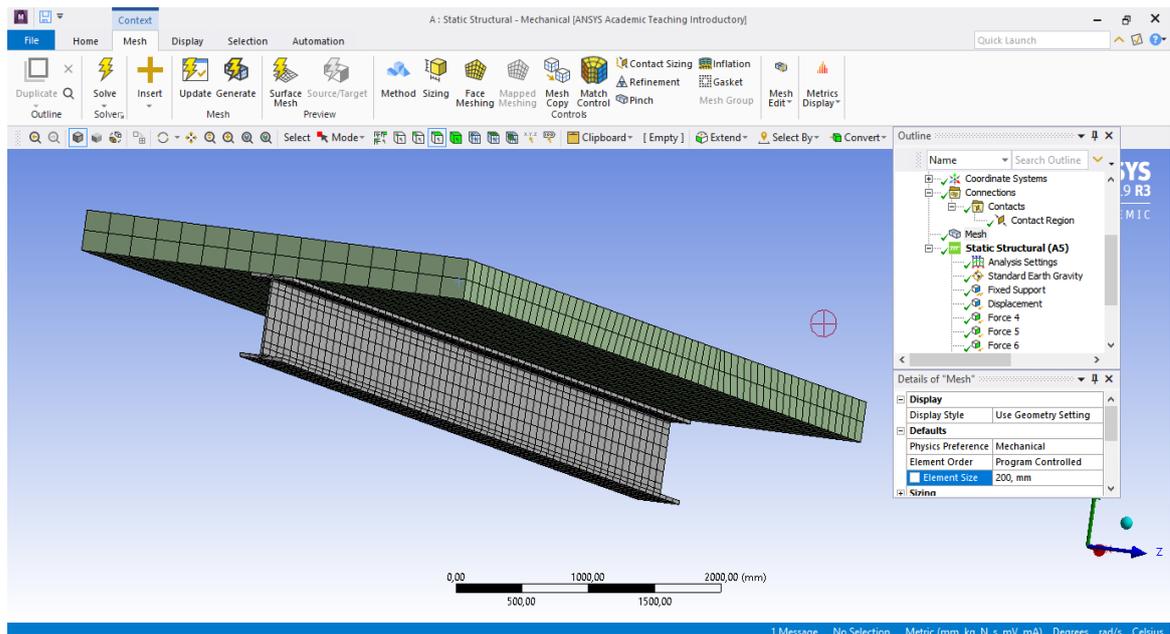


Fonte: Autor (2020)

- **Discretização da malha de elementos finitos**

Em seguida, foi definido a malha de elementos finitos adequada para a pesquisa. Na opção “Mesh”, foram realizados testes com o tamanho dos elementos, de tal forma que foi selecionado o menor tamanho de elementos que não ultrapassasse o limite de 32.000 nós, restringido pelo software, por ser a versão estudantil do mesmo. Desta forma, foi determinado elementos com 200 mm, visto que essa foi a menor dimensão permitida. A figura 38 demonstra essa etapa de discretização de malha.

Figura 38 - Interface do ANSYS/Mechanical para definir a malha de elementos finitos.

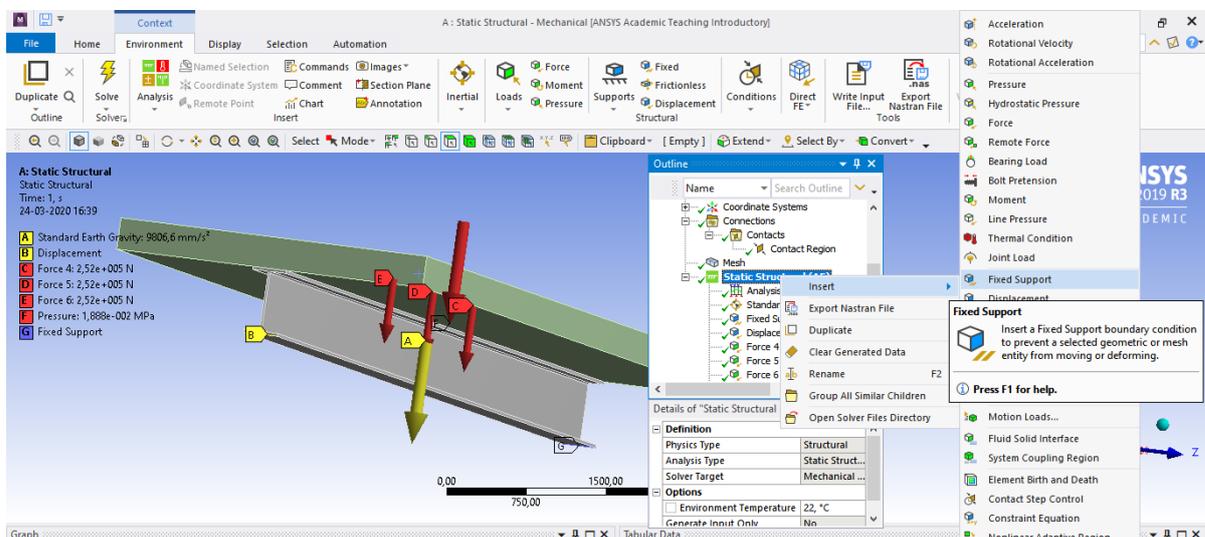


Fonte: Autor (2020)

- **Fixação de apoios e restrições de rotação**

Posteriormente, foram fixados os apoios de acordo com as restrições de rotação, sendo um apoio de 1º gênero no primeiro pilar e o outro apoio de 2º gênero no segundo pilar. Os apoios foram inseridos nas extremidades da mesa inferior. Foi considerado apenas o deslocamento vertical na viga, restringindo o deslocamento horizontal em todos os sentidos. Para o apoio de 1º gênero foi selecionado a opção “Displacement”, visto que com essa opção é possível selecionar quais eixos (X, Y ou Z) são fixos ou livres. O apoio de segundo gênero foi selecionado com a opção “Fixed Support”, uma vez que esse tipo de opção considera o apoio como fixo. A figura 39 demonstra a opção de fixar os apoios no software.

Figura 39 - Interface do ANSYS/Mechanical para fixar os apoios.



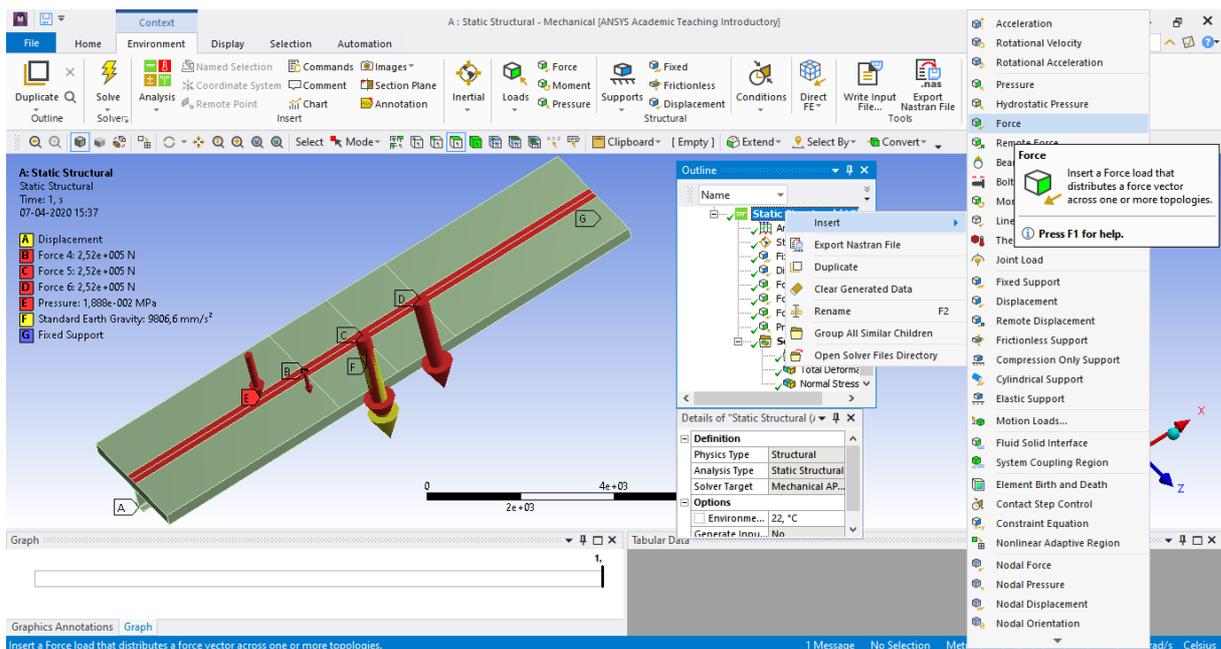
Fonte: Autor (2020)

- **Cargas exercidas na estrutura**

Em seguida, foram inseridas as forças exercidas na estrutura. Quanto ao peso próprio da estrutura, como foram adicionadas as densidades de cada material previamente, foi acionado a ação da gravidade na opção “Standard Earth Gravity”, de forma que as cargas fossem consideradas automaticamente e uniformemente distribuídas na estrutura. Além disso, a carga exercida na viga resultante dos carregamentos de revestimento de pavimentação, guarda-corpo e guarda-rodas, obtidos anteriormente por meio do software Ftool, foram inseridas como carregamento uniformemente distribuídos na opção “Pressure” sobre a laje, na extensão da viga metálica.

Quanto ao carregamento variável, foram aplicadas 03 forças no meio do vão da viga por meio da opção “Force” separadas entre si por 1,5 m, com o valor de 150 kN acrescido do coeficiente de impacto vertical, resultando em 252 kN, conforme permitido pela ABNT NBR 7188:2013. A figura 40 ilustra a aplicação das forças na estrutura.

Figura 40 - Interface do ANSYS/Mechanical para inserir as forças exercidas na estrutura.

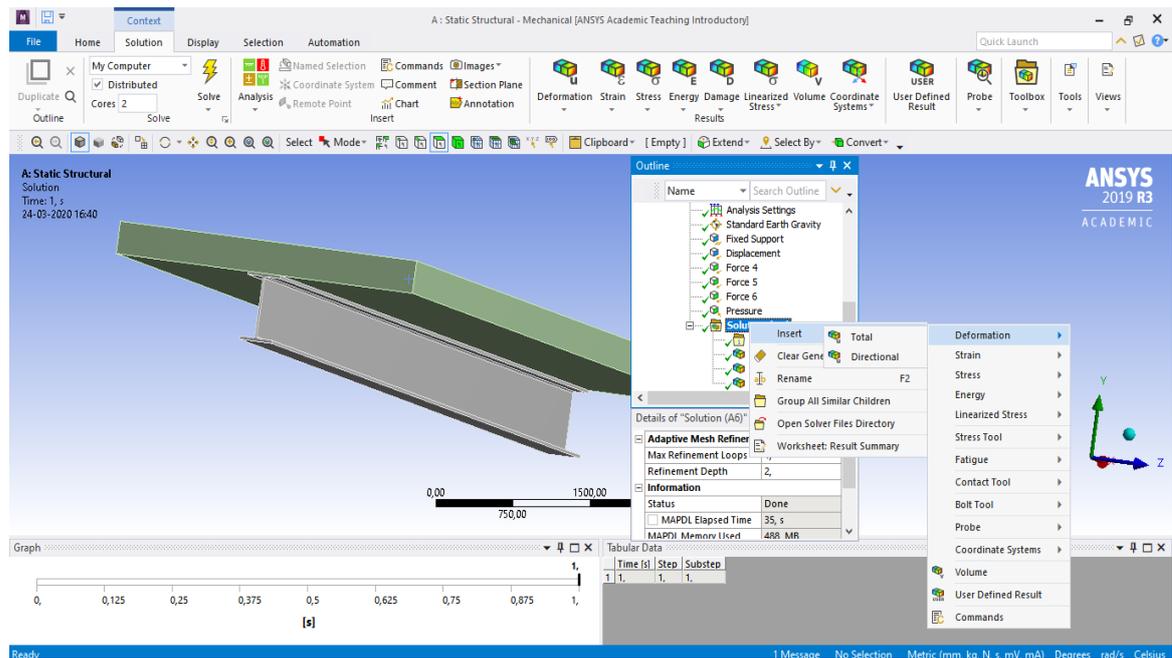


Fonte: Autor (2020)

- **Solução da análise estrutural**

Posteriormente, foram escolhidas as soluções para a análise: tensão normal e deformação total na opção “solution”, conforme ilustra a figura 41.

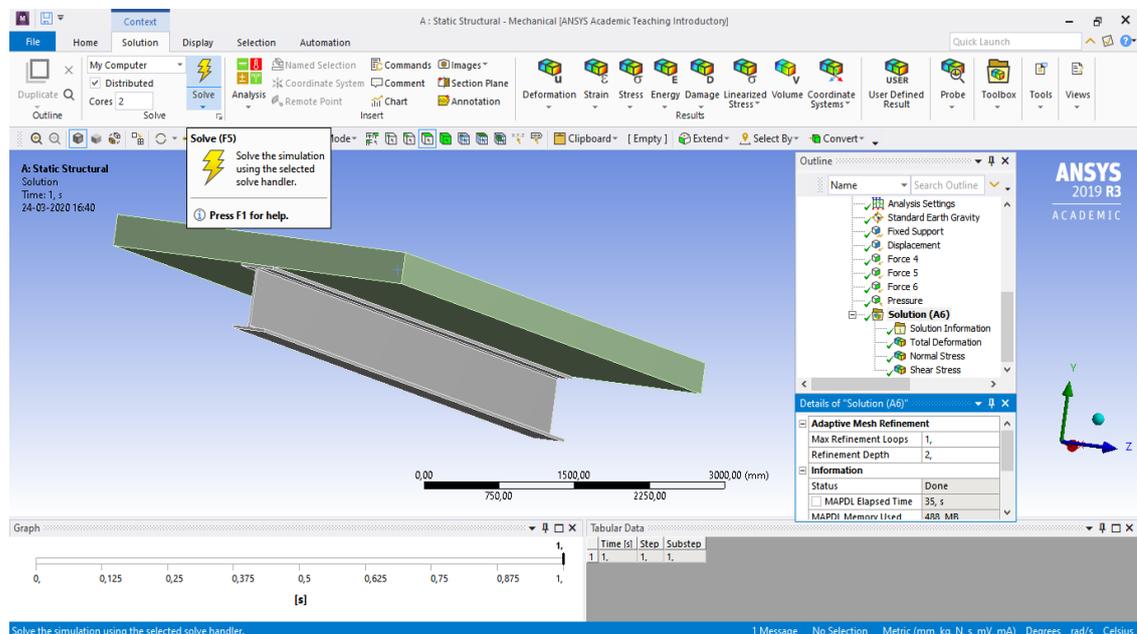
Figura 41 - Interface do ANSYS/Mechanical para selecionar as soluções para análise.



Fonte: Autor (2020)

Por fim a estrutura foi processada na opção “solve”, conforme figura 42, para obter os resultados das soluções escolhidas e gerar os diagramas necessários para a apresentação dos mesmos.

Figura 42 - Interface do ANSYS/Mechanical para processar a estrutura e gerar os resultados.



Fonte: Autor (2020)

Com o procedimento extraiu-se do software os diagramas com valores necessários para a análise. Foram considerados os valores de:

- Tensão normal no meio do vão da mesa inferior da viga de aço;

- Tensão normal no meio do vão da mesa superior da viga de aço;
- Tensão normal no meio do vão da laje de concreto;
- Tensão normal de tração máxima;
- Tensão normal de compressão máxima;
- Deformação máxima na viga de aço;
- Deformação máxima na laje de concreto;
- Deformação total máxima.

3.5.2 Viga mista aço-concreto com protensão externa

O procedimento para análise de viga mista aço-concreto com protensão externa é semelhante ao procedimento para análise da viga mista convencional. A princípio selecionou-se a opção “Static Strutural”, para análise estática. Em seguida, adicionou-se as propriedades mecânicas dos materiais. Os materiais aço e concreto utilizados na análise permaneceram os mesmos, na qual foi acrescentado apenas o aço dos cabos de protensão, conforme apresenta a tabela 8.

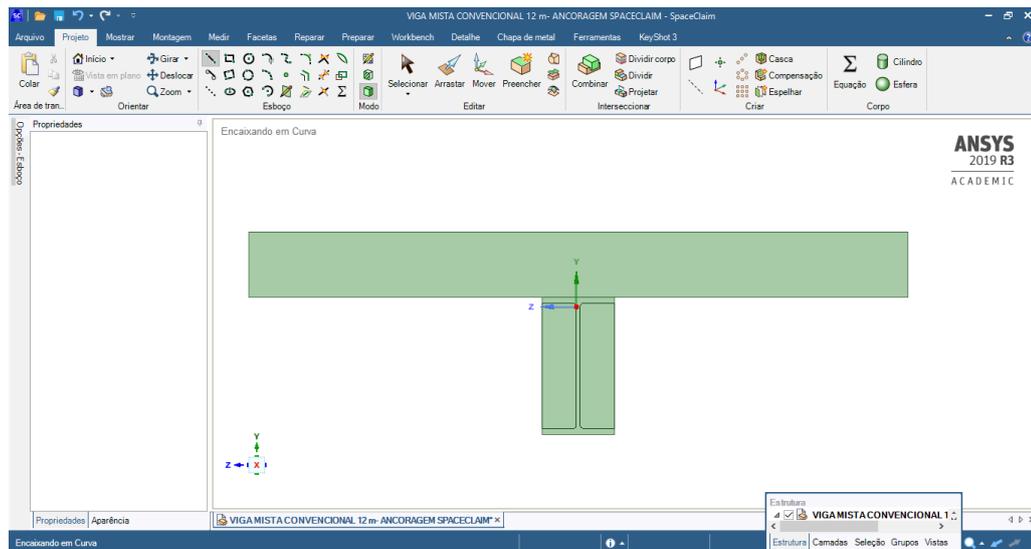
Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos materiais das vigas mistas protendidas.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS			
Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)
Aço ASTM A36	205000	0,3	7850
Concreto	23800	0,2	2500
Cabos de Protensão	200000	0,3	7850

Fonte: Adaptado por Ferreira (2007) e Eller (2011).

Posteriormente, foi inserido a geometria da estrutura. Primeiramente desenhou-se a viga mista na plataforma SpaceClaim, com placas de ancoragem de 36 mm de espessura nas extremidades da viga metálica, para que fossem inseridos os cabos de protensão, conforme figura 43.

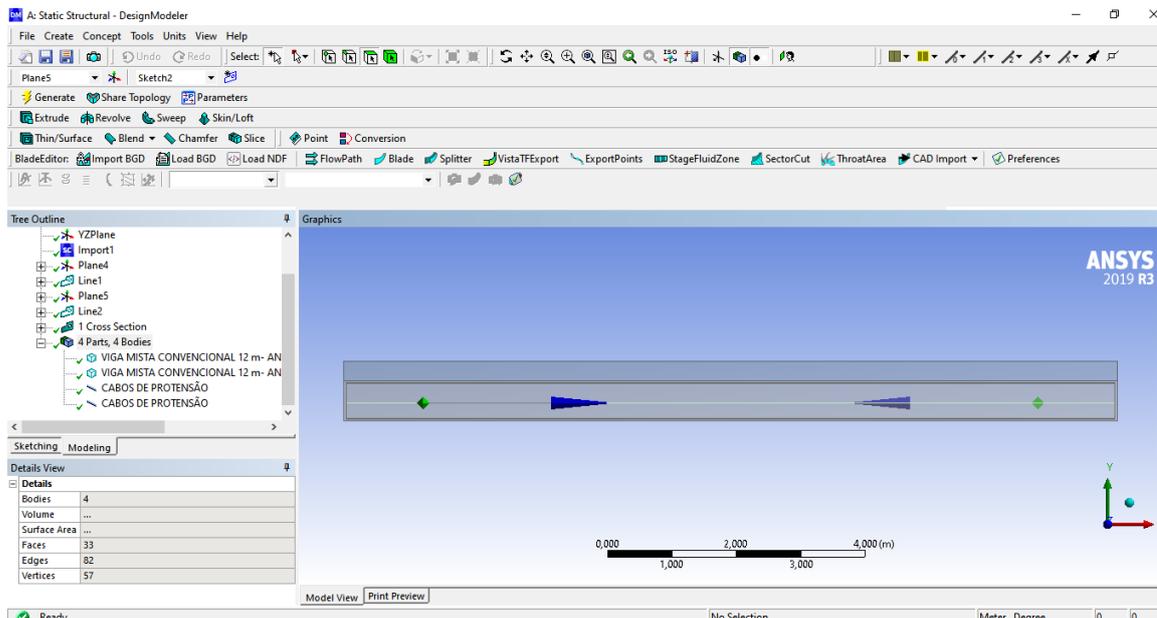
Figura 43 – Geometria da viga mista com ancoragem no SpaceClaim.



Fonte: Autor (2020)

Em seguida, o arquivo da viga foi importado para a plataforma Design Modeler, onde foram desenhados os cabos de protensão com 12,7 mm, como ilustra a figura 44.

Figura 44 – Geometria da viga mista com protensão externa no Design Modeler.



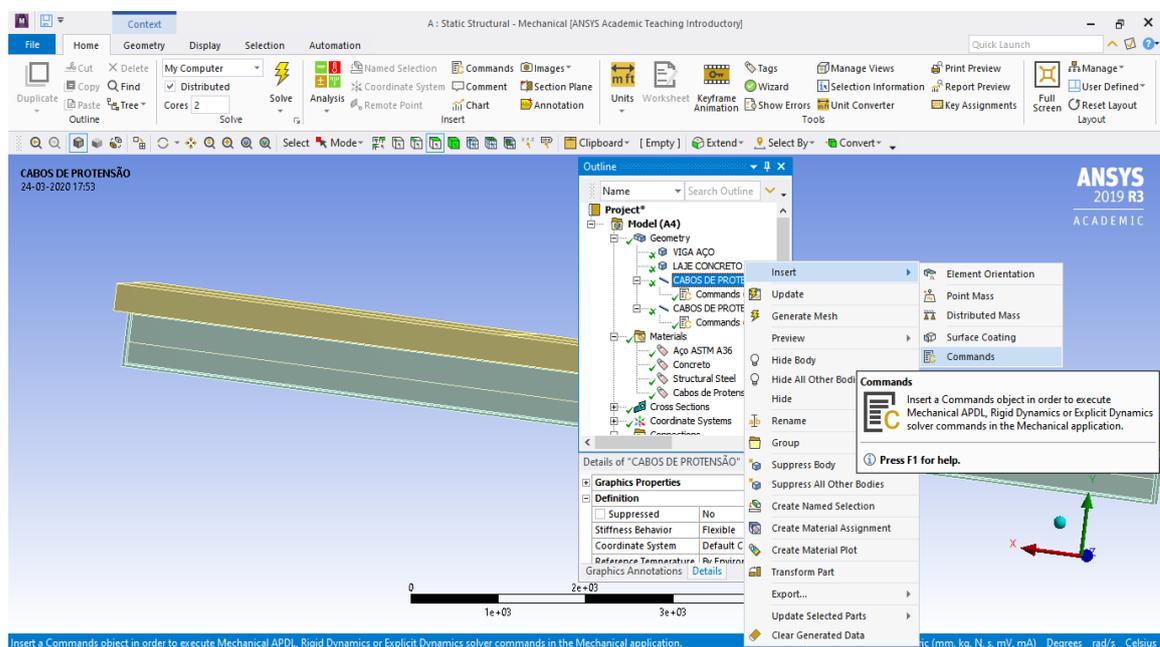
Fonte: Autor (2020)

Após inserida a geometria, abriu-se o ANSYS/Mechanical, para iniciar a análise estática. A princípio foram modificados os materiais tanto da viga metálica quanto da laje de concreto e cabos de protensão, conforme análise anterior.

Em seguida, foram aplicados os comandos que simularam o efeito de protensão nos cabos. Para os cabos, foi utilizado o elemento “LINK 180”, uma vez que esse elemento simula o efeito da armadura ativa, tendo a opção de agir apenas com “compressão” ou apenas com “tensão”. Para a análise foi considerado a opção “tensão” e adicionado a força de 2.340 kN nos

mesmos. Por ser uma análise do comportamento estrutural da estrutura, esse valor de protensão foi obtido conforme dissertação de mestrado intitulada “COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PROTENSÃO EXTERNA”, publicada por Anna Carolina Haiduk Nelsen em 2013, na qual a autora utilizou essa força de protensão em viga semelhante à da presente pesquisa, com comprimento de 12 m. Esse valor de força de protensão foi aplicado considerando a condição final (serviço), portanto, já inclui o incremento devido as perdas imediatas e progressivas. A figura 45 apresenta a aplicação dos comandos no software.

Figura 45 - Interface do ANSYS/Mechanical para aplicar os comandos de protensão.



Fonte: Autor (2020)

A figura 46 apresenta os comandos utilizados, sendo $126,67 \text{ mm}^2$ a área da seção transversal dos cabos de protensão, e $2.340.000 \text{ N}$ o valor de força de protensão aplicado.

Figura 46 – Comandos para protensão externa.

```

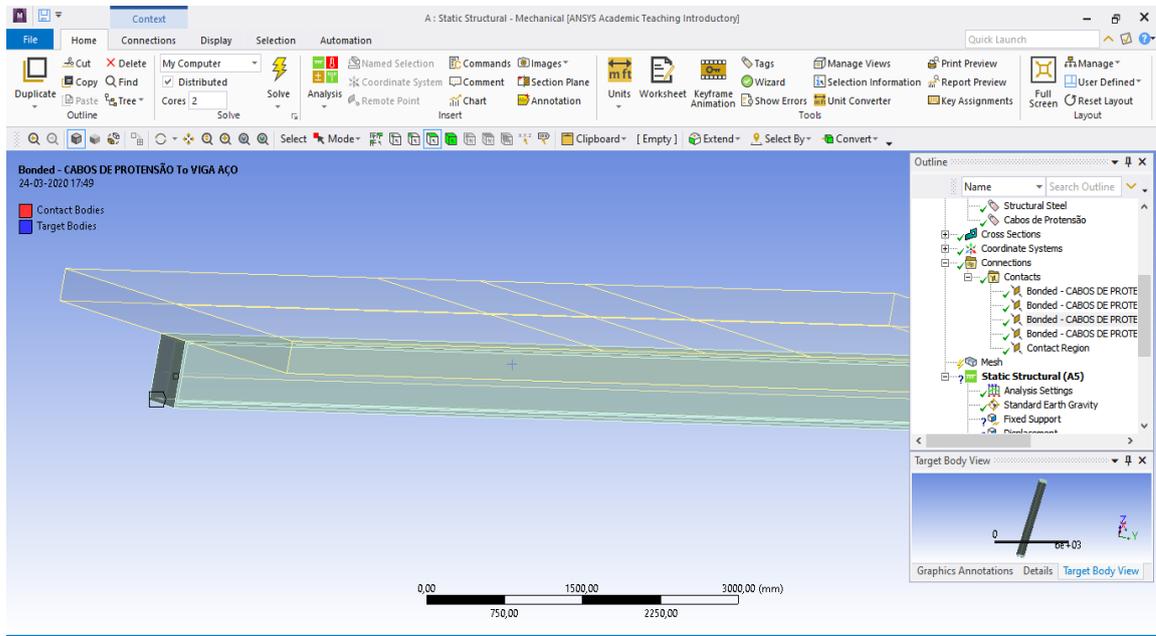
Commands
1  !  Commands inserted into this file will be executed just after material definitions in /PREP7.
2  !  The material number for this body is equal to the parameter "matid" if it's not a part of a Material Assignment.
3  !  The element type numbers for this body can be referenced using the 1-D array parameter "typeids".
4
5  !  Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
6  !  NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
7  !  See Solving Units in the help system for more information.
8
9
10 et, matid, 180
11 *get, area, secp, matid, prop, area
12 sectype, matid, link
13 secdata, 126.67
14 seccontrol, 1 ! Tension only
15 stress=2340000/126.67
16 INISTATE,SET,CSYS,-2 ! LOCAL ELEMENT SYSTEM FOR PRE-STRESS
17 inistate,set,mat,matid ! selects only links with this matid
18 INISTATE,SET,DTYPE,STRE ! PRE STRESS
19 INISTATE,DEFINE,,,,stress !
20

```

Fonte: Autor (2020)

Após isso, foram inseridas as fixações de contato. O contato entre a laje e viga permaneceu restringido. Foram inseridos contatos fixos entre os cabos de protensão e a placa de ancoragem, tornando os mesmos impossibilitados de se afastarem da placa com a aplicação da força de protensão. A figura 47 apresenta essas fixações de contato no software.

Figura 47 - Interface do ANSYS/Mechanical para fixar contatos dos cabos de protensão.



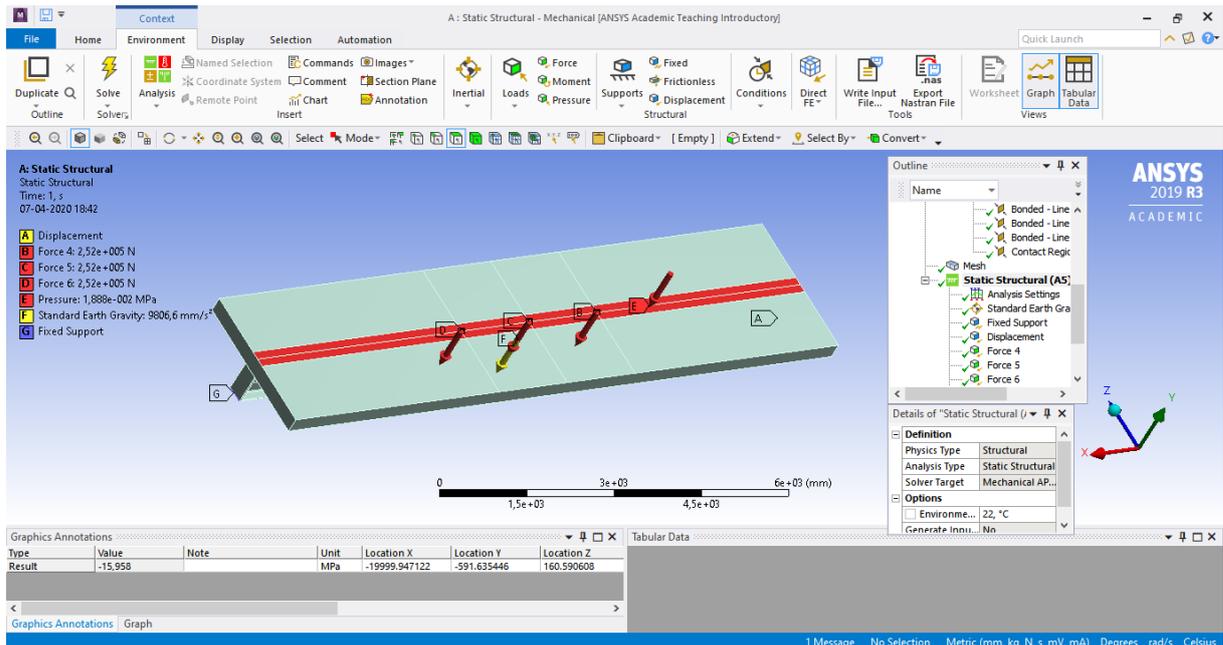
Fonte: Autor (2020)

Em seguida, foi processada a malha de elementos finitos, com elementos de 200 mm, assim como a análise da viga convencional. Entretanto, nas vigas mistas protendidas a malha não permaneceu exatamente com os mesmos elementos da viga mista convencional, já que o elemento dos cabos de protensão limitam que os nós do mesmo obrigatoriamente devem coincidir com os nós do elemento base na direção adjacente, limitando assim a discretização da malha de elementos finitos.

Após isso foram fixadas as restrições de apoio, considerando um apoio de primeiro gênero com a opção “Displacement” e um apoio de segundo gênero com a opção “Fixed Support”.

Foram inseridas as cargas na estrutura conforme análise anterior. Foi considerado o peso próprio da viga mista aço-concreto, acionando a força gravitacional na opção “Standard Earth Gravity”. Além disso, foram adicionadas as sobrecargas de revestimentos de Pavimentação, guarda-corpo e guarda-rodas já calculadas no software Ftool, com a opção “Pressure”; e o trem-tipo com a opção “Force”, sendo aplicadas três forças pontuais de 252 kN, separadas entre si a uma distância de 1,5 m. A figura 48 demonstra a estrutura com todas as cargas e restrições de apoio.

Figura 48 - Interface do ANSYS/Mechanical para aplicar cargas sobre a estrutura.



Fonte: Autor (2020)

Por fim, foram selecionadas as soluções para a análise: tensões normais e deformações na opção “solution” e processada a análise na opção “Solve”. Os valores de tensões e deformações obtidos pelo software nas análises das vigas mistas protendidas foram considerados exatamente nos mesmos locais aos extraídos na análise da viga mista aço-concreto convencional. Em seguida os resultados foram cruzados e comparados para avaliação dos comportamentos estruturais da viga mista convencional e das vigas mistas com protensão externa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

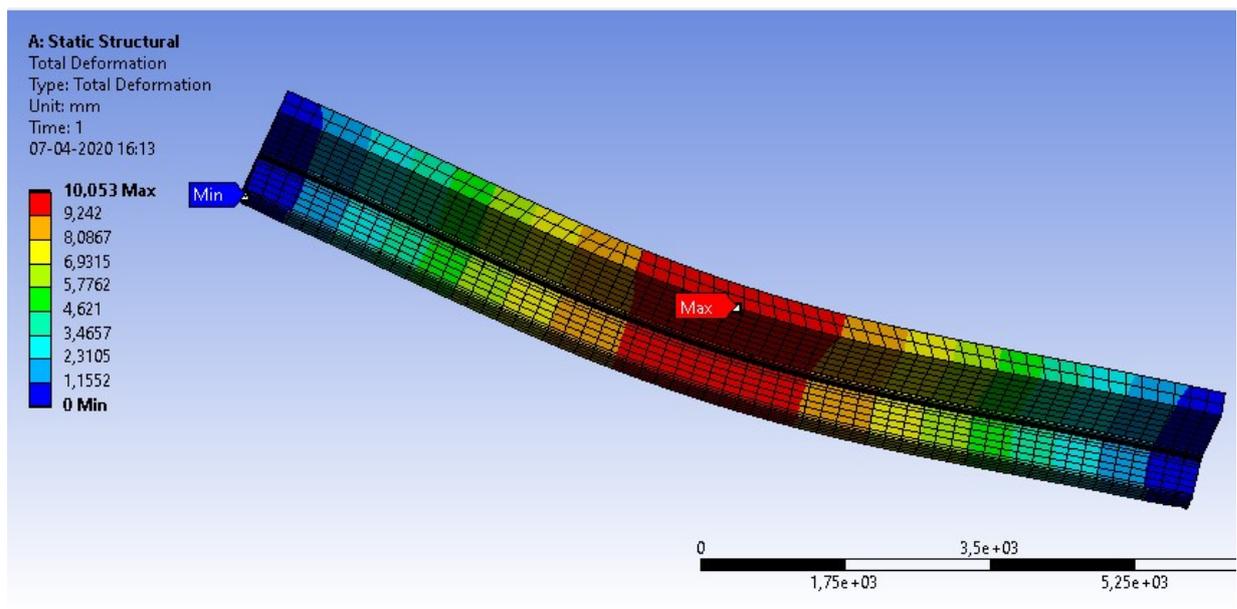
4.1 DIAGRAMAS DE VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO ANALISADAS NO ANSYS 2019 R3

4.1.1 Viga mista aço-concreto convencional (Viga Referência)

- **Deformação Total**

Com a análise da viga mista aço-concreto convencional, a maior deformação apresentou-se na laje de concreto, com valor de 10,053 mm, conforme figura 49. Essa deformação apresentou-se na extremidade da laje, no meio do vão, devido ao carregamento variável ter sido inserido no centro da viga mista, considerando a pior situação. As deformações obtiveram reduções em toda extensão da laje, em direção aos apoios, obtendo valores próximos a 0.

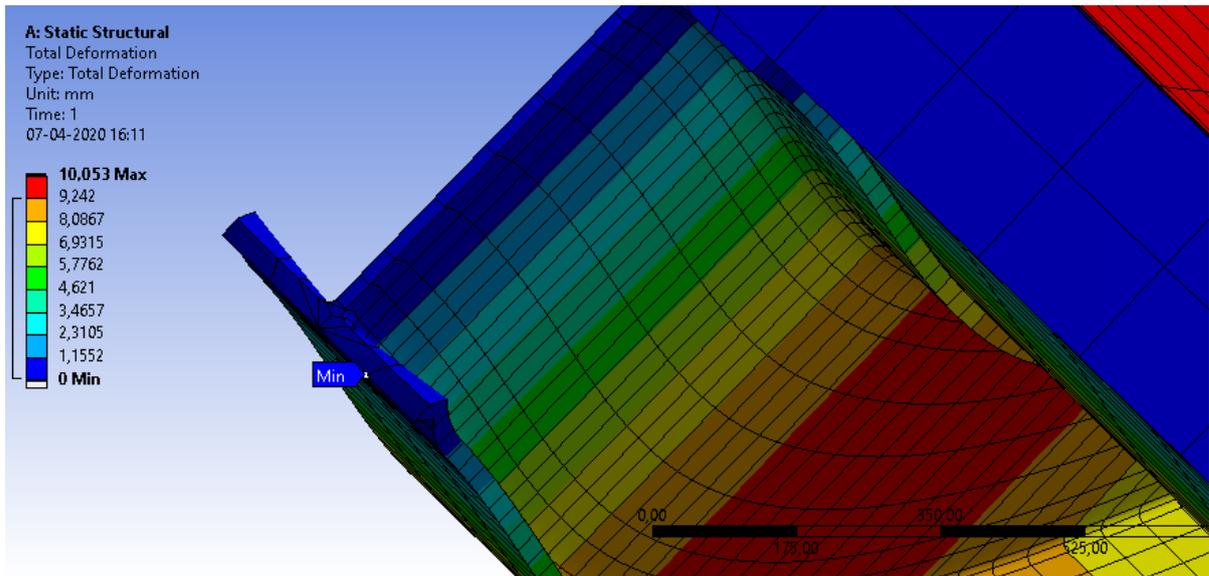
Figura 49 – Deformação na laje de concreto (viga referência).



Fonte: Autor (2020)

A deformação mínima foi igual a 0 no apoio de 2º gênero, uma vez que este apoio mantém a viga fixa, conforma figura 50.

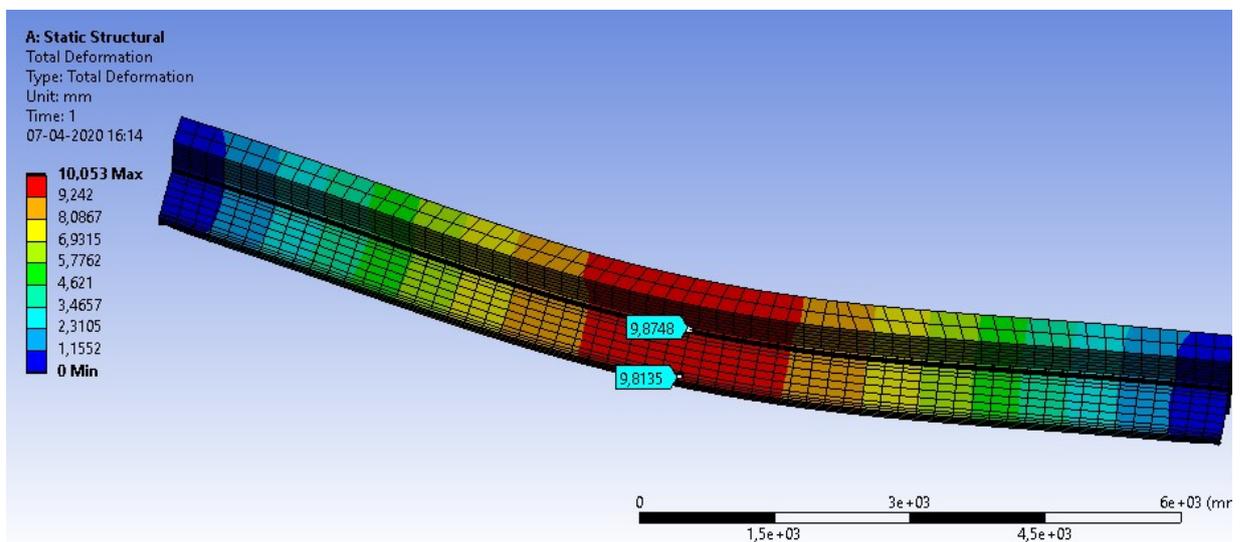
Figura 50 – Deformação mínima (viga referência).



Fonte: Autor (2020)

Analisando isoladamente a viga metálica, a maior deformação apresentada com a análise está presente na mesa superior da viga, com valor de 9,8748 mm, localizada no meio do vão da mesma, conforme figura 51. Na mesa inferior da viga, o maior valor apresentado foi 9,8135 mm. Com a análise percebe-se que os valores de deformações na viga, assim como na laje, reduzem em direção aos apoios, sendo o menor valor igual a 0.

Figura 51 – Deformação na viga de aço (viga referência).



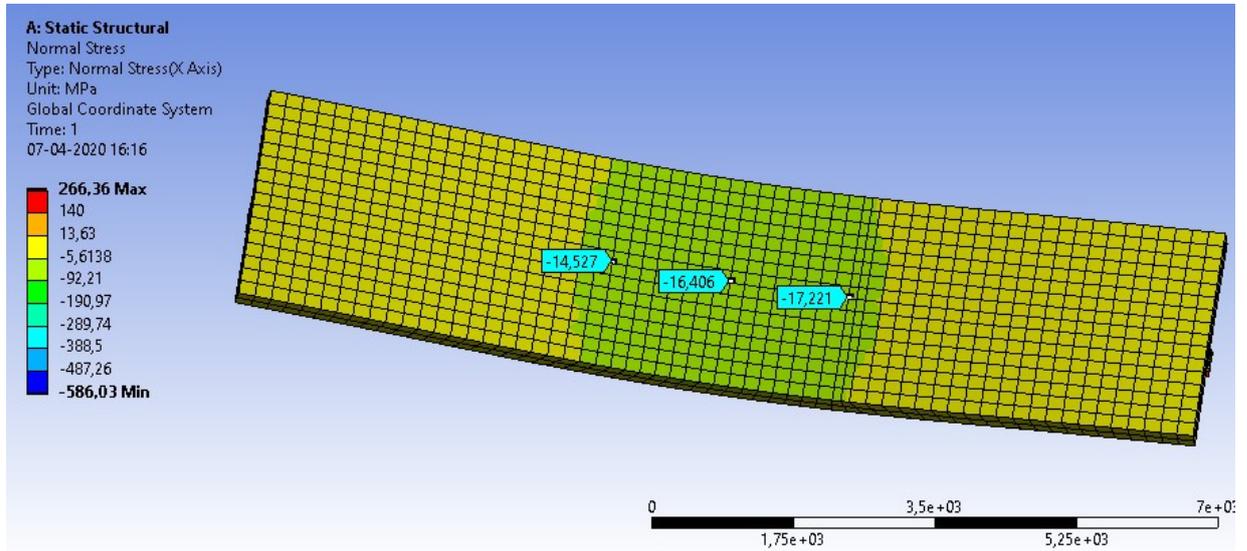
Fonte: Autor (2020)

- **Tensão Normal**

Os resultados de tensões normais na laje de concreto estão ilustrados na figura 52. Os maiores valores obtidos são tensões de compressão de -14,527 MPa, -16,406 MPa e -17,221 MPa. Esses valores são resultantes da aplicação do trem-tipo, uma vez que os mesmos

apresentam-se nos mesmos pontos em que as forças foram inseridas. As tensões atuantes na laje são tensões de compressão em quase toda sua extensão, exceto nas extremidades, sendo o meio do vão da viga o local mais comprimido, conforme ilustra a coloração verde apresentada na análise.

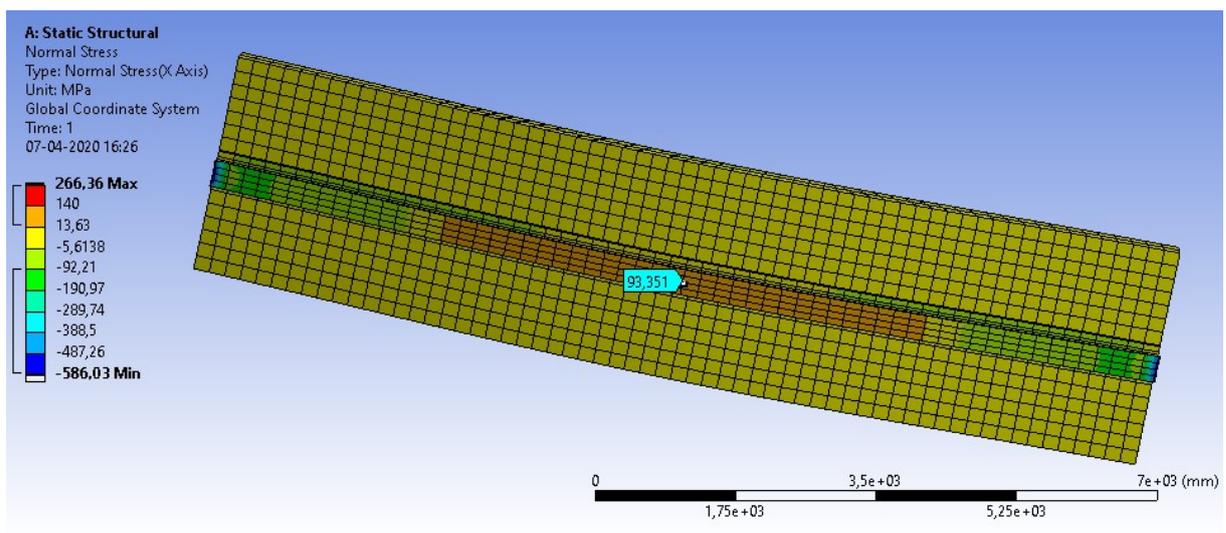
Figura 52 – Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (viga referência).



Fonte: Autor (2020)

Na mesa inferior da viga de aço, o maior valor de tensão apresentado no meio do vão foi de 93,351 MPa, conforme figura 53. Com a análise observou-se que os valores de tensões de tração foram reduzidos na extensão da viga em direção aos apoios, de tal forma que as tensões apresentaram-se de compressão próximo aos apoios.

Figura 53 – Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (viga referência).

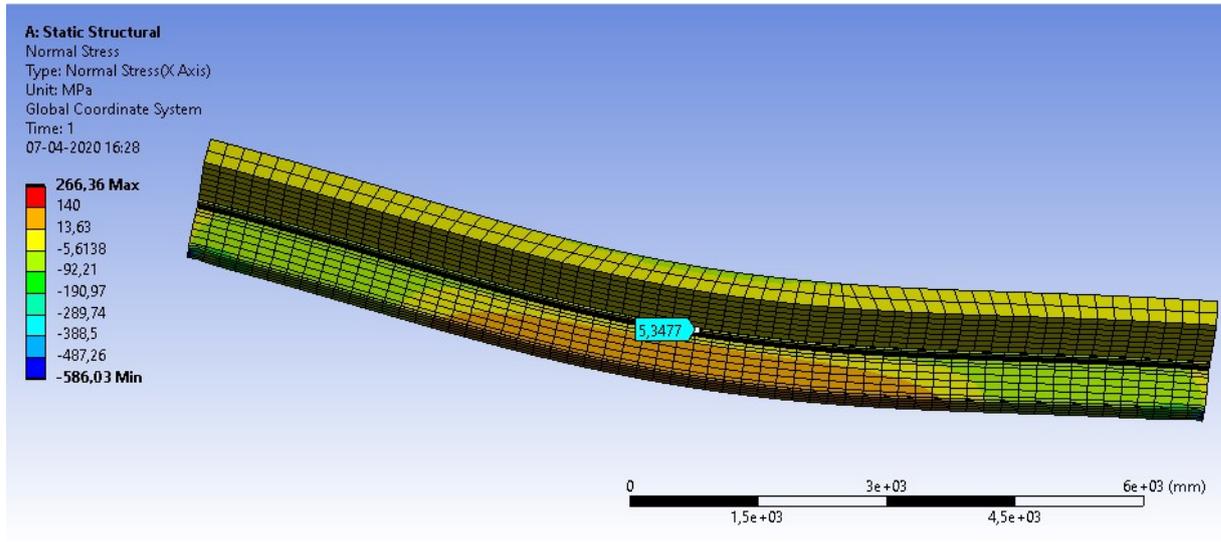


Fonte: Autor (2020)

Na mesa superior da viga de aço, obteve-se tensões variadas na extensão da viga, de forma que a viga apresentou tensão de tração de 5,3477 MPa no meio do vão. A coloração verde

ilustra as regiões com maiores tensões de compressão em sua extensão, comparadas à coloração amarela. Nas extremidades da viga, as tensões apresentaram-se de tração, como ilustra a figura 54.

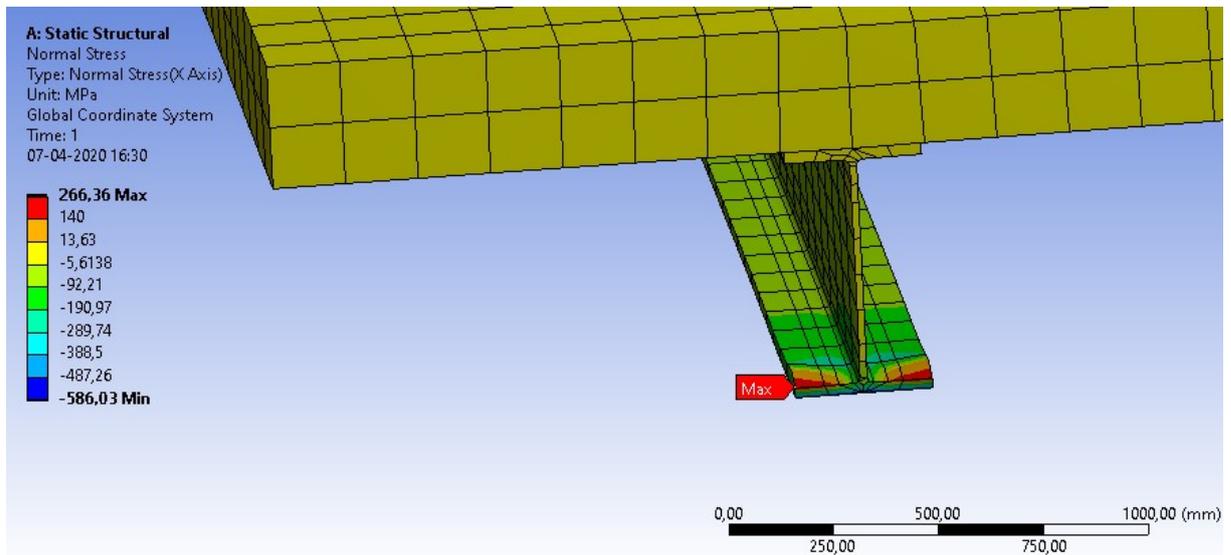
Figura 54 –Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (viga referência).



Fonte: Autor (2020)

A tensão de tração máxima da viga mista aço-concreto com valor de 266,36 MPa apresentou-se na extremidade da viga, localizada acima do apoio de 2º gênero, conforme figura 55.

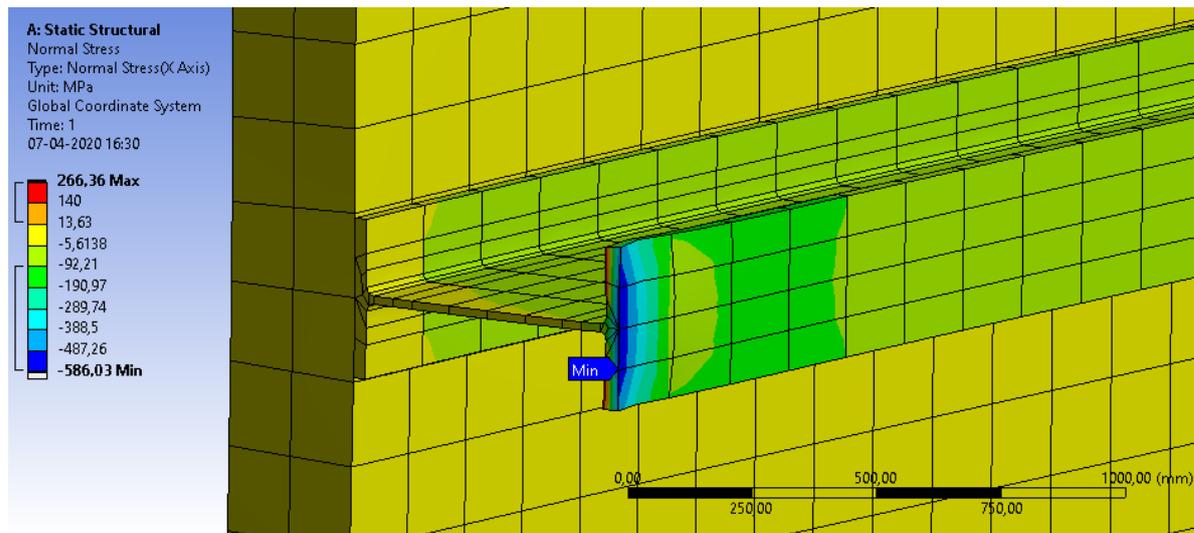
Figura 55 – Tensão normal de tração máxima (viga referência).



Fonte: Autor (2020)

A tensão de compressão máxima da viga mista aço-concreto com valor de -586,03 MPa apresentou-se na extremidade da viga, localizada no apoio de 1º gênero, conforme figura 56.

Figura 56 – Tensão normal de compressão máxima (viga referência).



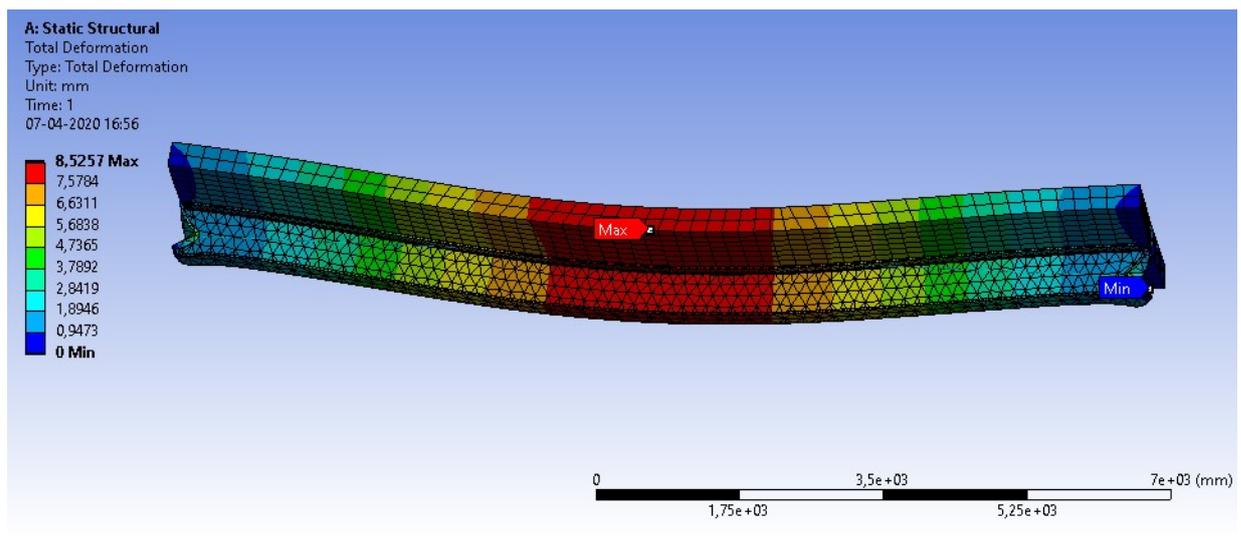
Fonte: Autor (2020)

4.1.2 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP15)

- **Deformação Total**

Com a aplicação da protensão externa a uma distância de 15 cm da mesa inferior, foi possível obter uma deformação total máxima na estrutura de 8,5257 mm. Essa deformação ocorreu na extremidade da laje de concreto, no meio do vão, conforme figura 57. Os valores de deformações na laje de concreto obtiveram reduções em sua extensão, em direção aos apoios, assim como na análise da viga mista aço-concreto convencional

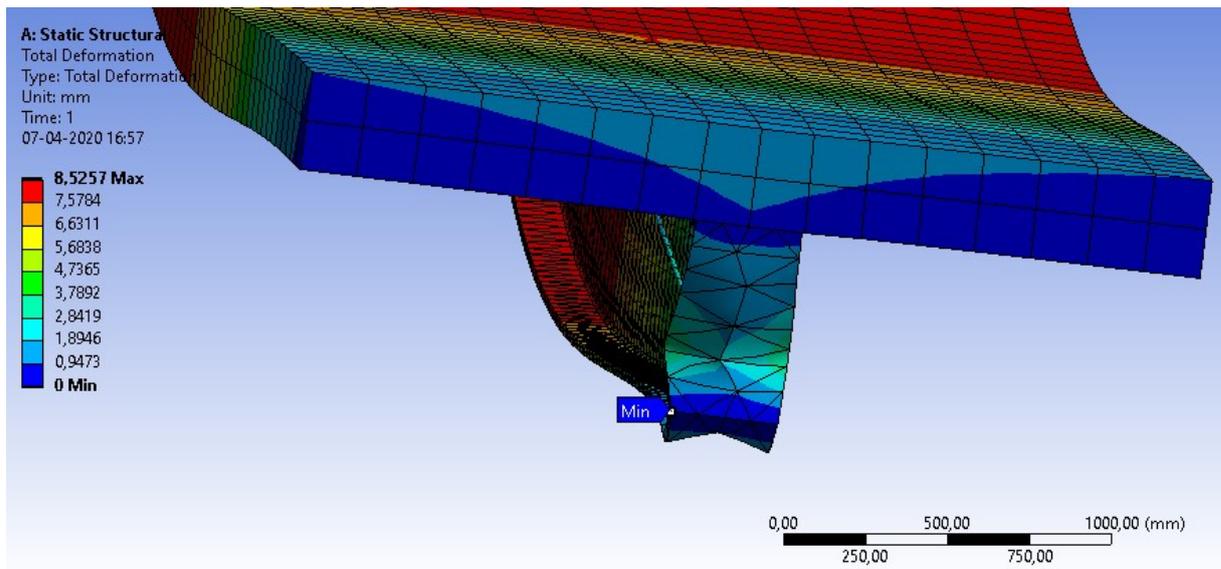
Figura 57 - Deformação na laje de concreto (vigaP15).



Fonte: Autor (2020)

O menor resultado de deformação apresentado foi igual a 0, como ilustra a figura 58. Esta deformação mínima ocorreu no local onde encontra-se o apoio de 2º gênero.

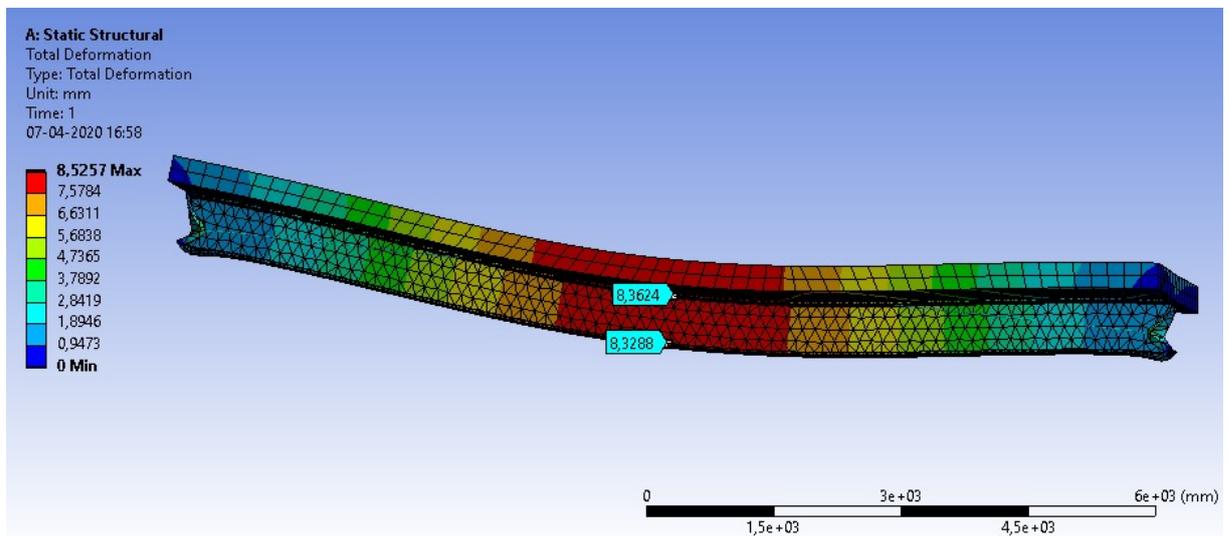
Figura 58 - Deformação mínima (vigaP15).



Fonte: Autor (2020)

Considerando a viga metálica, o maior valor de deformação ocorreu na mesa superior da viga, com 8,3624 mm, conforme figura 59. Na mesa inferior o maior valor de deformação foi igual a 8,3288 mm. Ambos ocorreram no meio do vão na viga, já que o carregamento variável foi considerado em pior situação. Assim como na laje de concreto, os valores foram reduzidos na viga em direção aos apoios, sendo a deformação mínima igual a 0.

Figura 59 - Deformação na viga de aço (vigaP15).



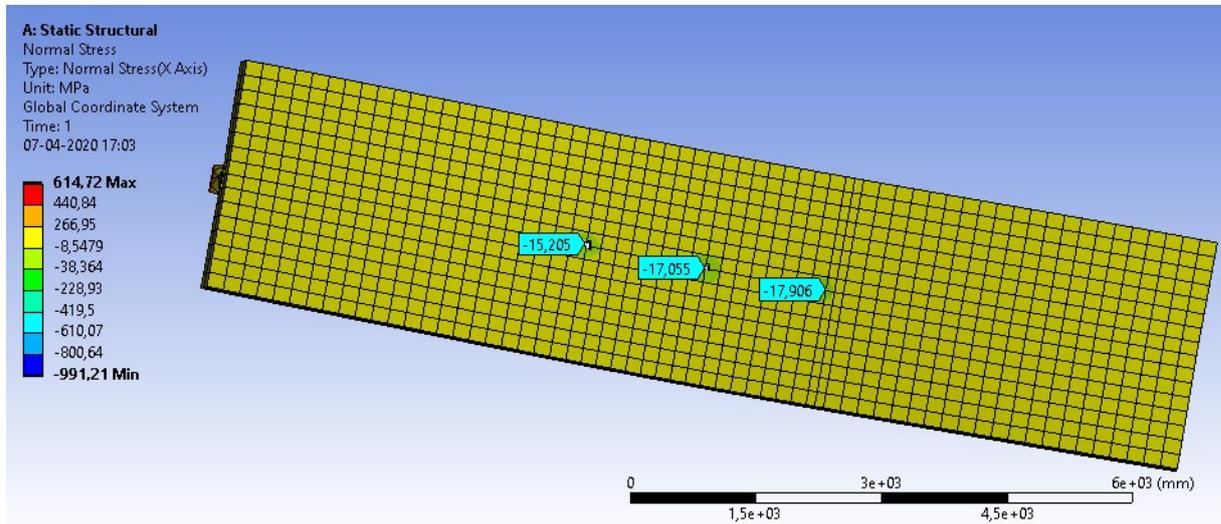
Fonte: Autor (2020)

- **Tensão Normal**

Com relação às tensões normais, os maiores valores obtidos na laje de concreto foram tensões de compressão, de -17,906 MPa, -17,055 MPa e -15,205 MPa, presentes no meio do vão. As máximas tensões obtidas são nos pontos onde o trem-tipo está inserido, uma vez que

nesses locais a carga atuante é maior em comparação ao restante da viga. As tensões normais atuantes na laje são de compressão em quase toda sua extensão, exceto nas extremidades. A figura 60 apresenta as tensões normais máximas na laje de concreto.

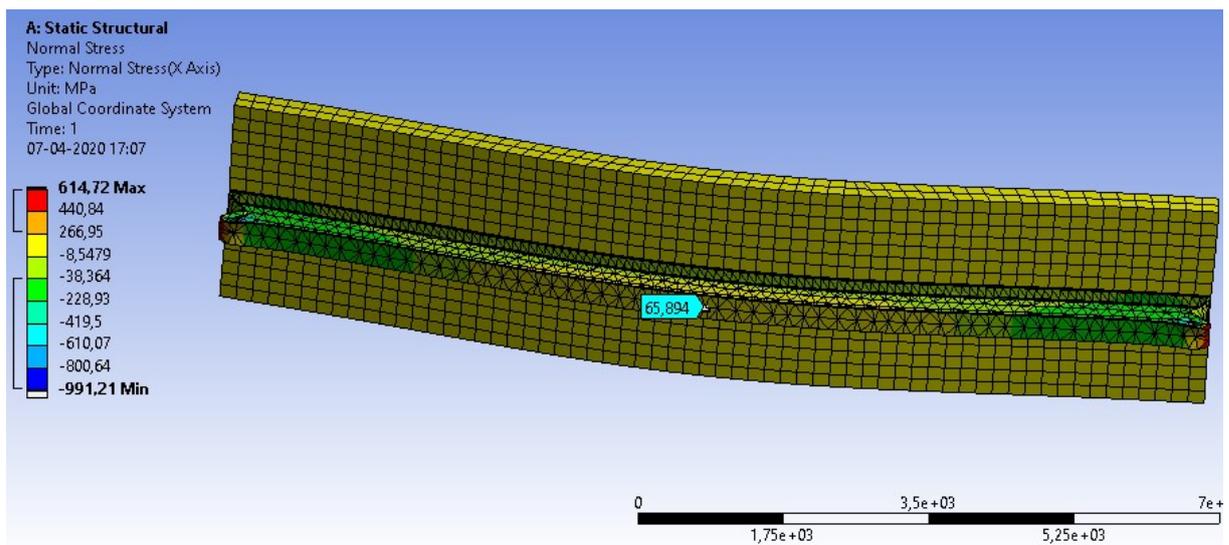
Figura 60 - Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP15).



Fonte: Autor (2020)

Na mesa inferior da viga metálica, o maior valor de tensão normal de tração apresentado foi de 65,894 MPa, presente no meio do vão, na parte inferior da mesa, ilustrado em cor amarela na figura 61. As tensões reduziram na extensão da viga, de tal forma que próximo as extremidades as tensões apresentaram-se de compressão, uma vez que com as cargas atuantes, a parte da viga ilustrada em cor verde apresentou-se comprimida.

Figura 61 - Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP15).

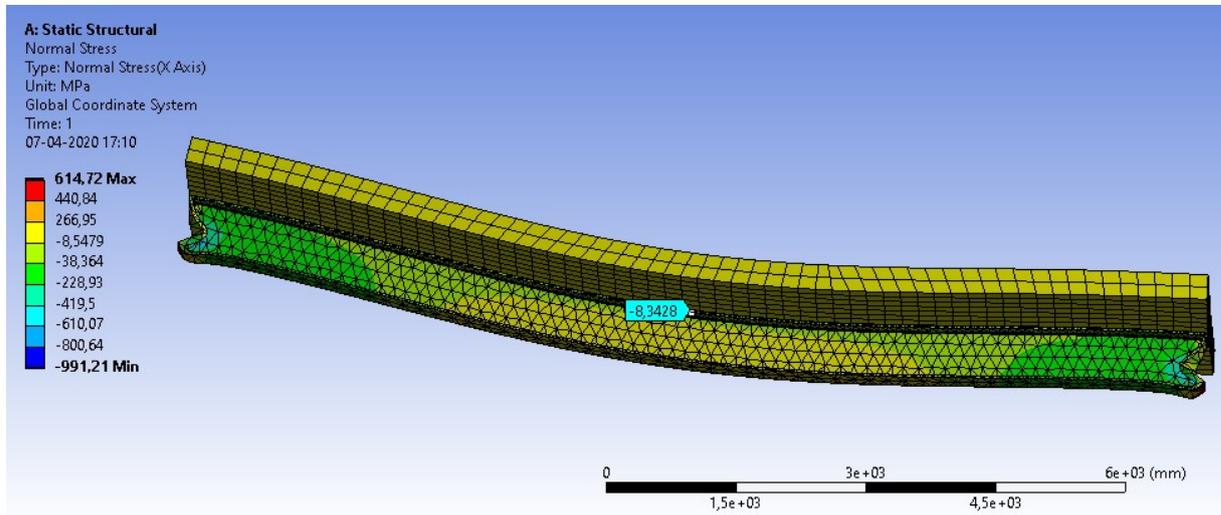


Fonte: Autor (2020)

Quanto à mesa superior da viga metálica, os valores de tensões obtidos foram de compressão. Os resultados na extensão na viga foram variados, onde, no centro da viga, obteve-

se valor de -8,3428 MPa, como ilustra a figura 62. As regiões do diagrama com coloração verde apresentam as maiores tensões de compressão, visto que se aproximam do ponto em que foi aplicada a força de protensão.

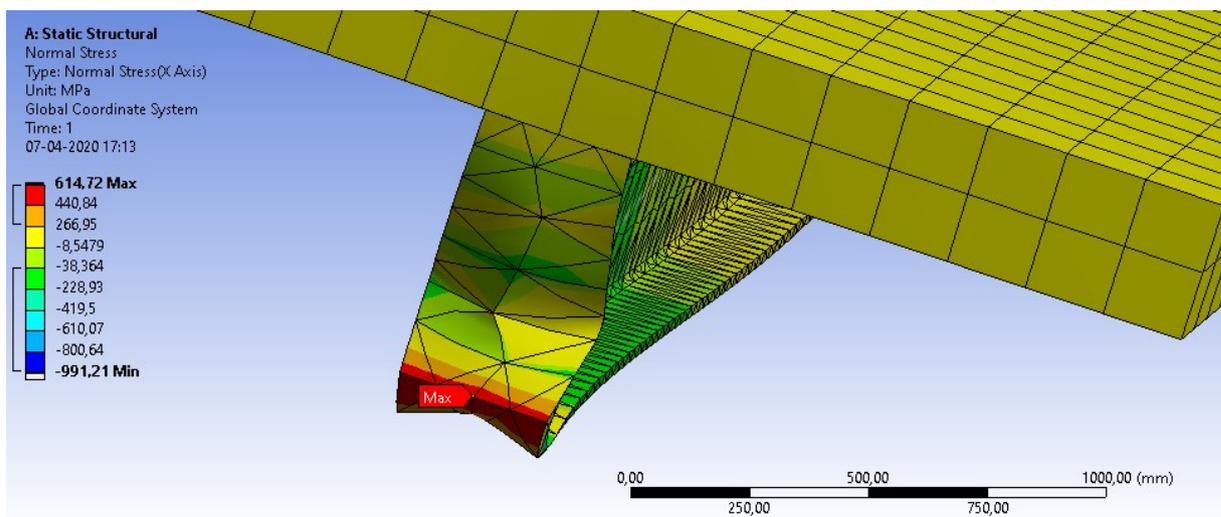
Figura 62 - Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP15).



Fonte: Autor (2020)

Conforme figura 63, o máximo valor de tensão de tração apresentou-se na linha onde há o apoio de 2º gênero, com valor de 614,72 MPa, visto que com a aplicação da protensão, há uma grande concentração de tensões nesse local onde a viga é fixada. Nas extremidades, foi possível analisar que, na placa de ancoragem, apresentou-se tensões de tração no ponto onde a cordoalha está ancorada, pois com a aplicação da força de protensão, a mesma foi tracionada em direção ao centro da viga.

Figura 63 - Tensão normal de tração máxima (vigaP15).

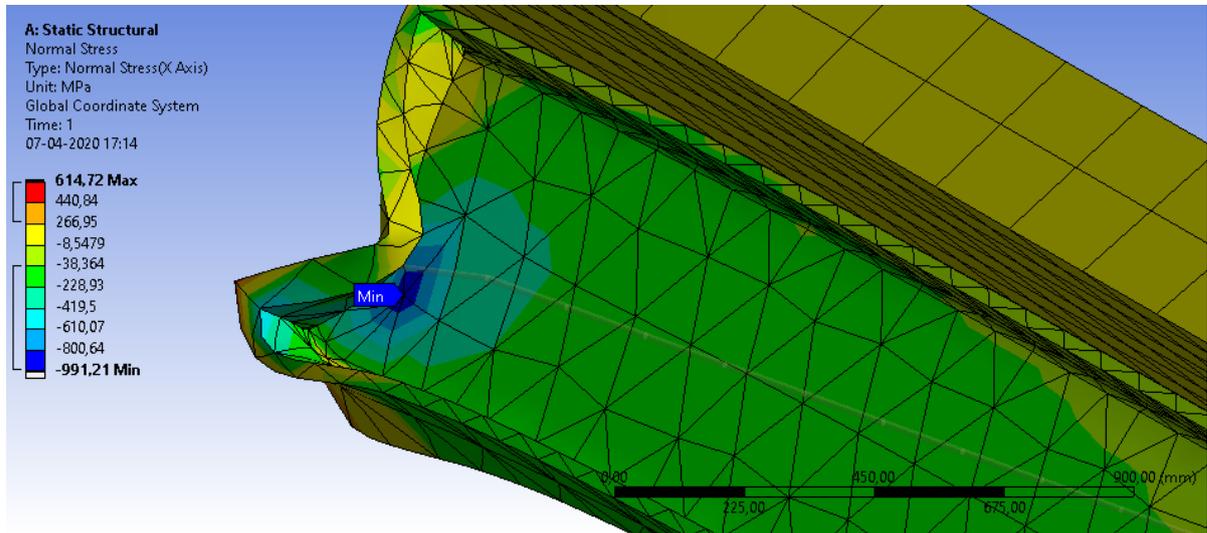


Fonte: Autor (2020)

Com relação à maior tensão de compressão apresentada, a mesma localizou-se na alma da viga, com valor de -991,21 MPa, em direção ao apoio de 1º gênero, visto que essa foi a

região mais comprimida da viga com a aplicação da protensão a 15 cm da mesa inferior. A figura 64 apresenta a tensão normal de compressão máxima na viga mista aço-concreto analisada.

Figura 64 - Tensão normal de compressão máxima (vigaP15).



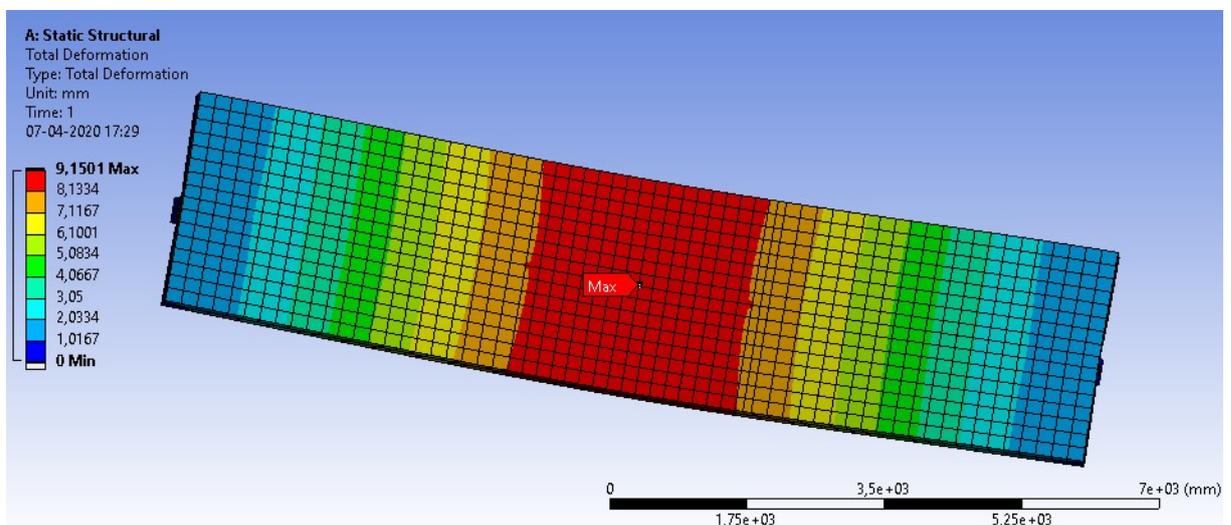
Fonte: Autor (2020)

4.1.3 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP25)

- **Deformação Total**

Com a aplicação da protensão externa a 25 cm na mesa inferior, a deformação máxima apresentou-se no centro da laje de concreto, no meio do vão, com valor de 9,1501 mm, apresentando-se em local diferente da viga mista aço-concreto convencional e vigaP15. As deformações obtiveram reduções da extensão da viga em direção as extremidades, conforme figura 65.

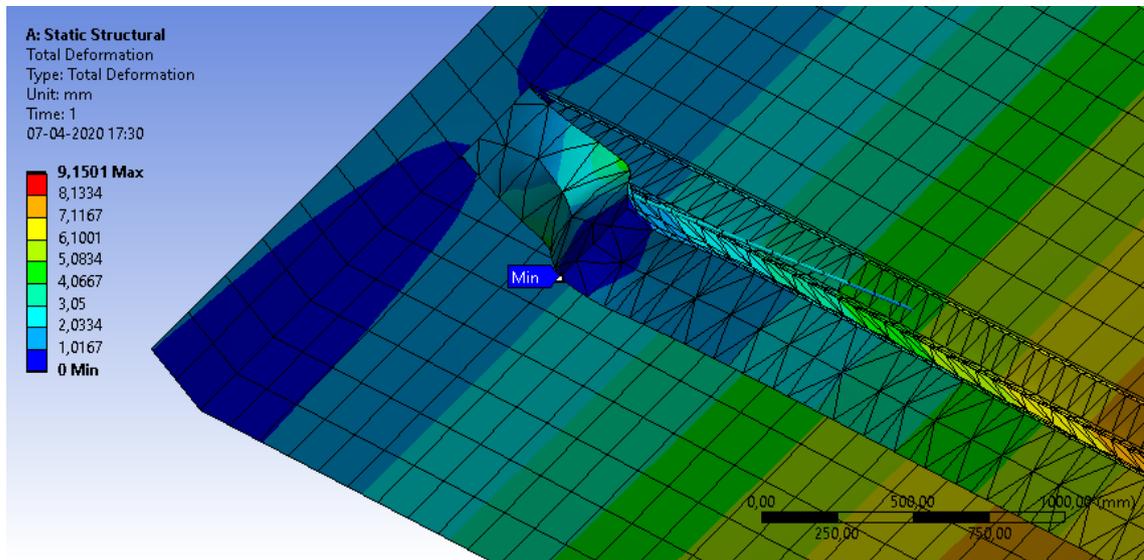
Figura 65 – Deformação na laje de concreto (vigaP25).



Fonte: Autor (2020)

A menor deformação apresentada na análise foi igual a 0, como ilustra a figura 66, presente no local do apoio de 2º gênero.

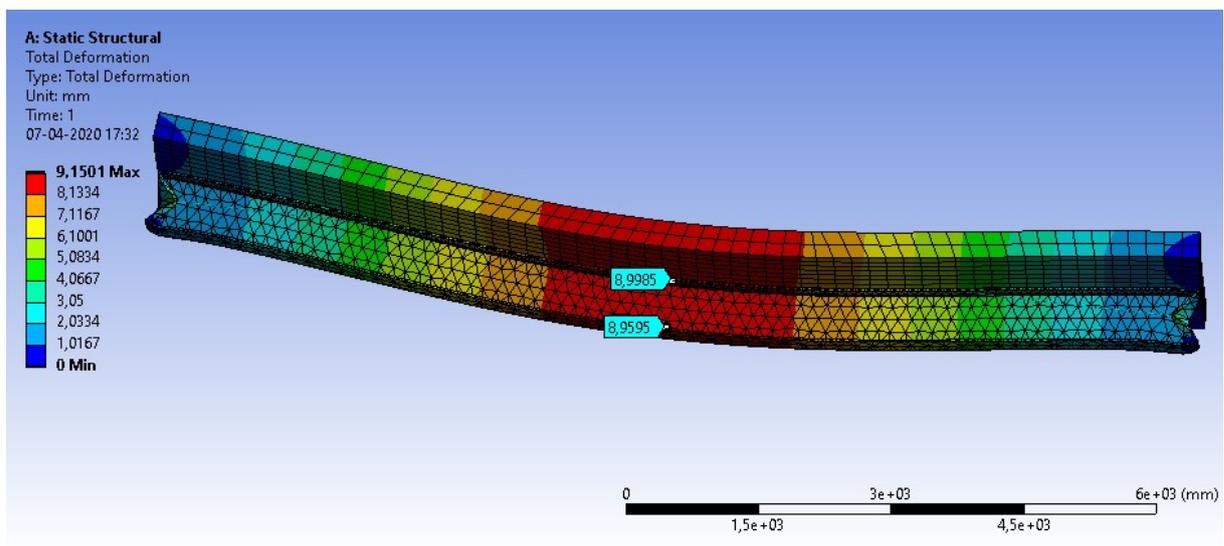
Figura 66 – Deformação mínima (vigaP25).



Fonte: Autor (2020)

Quanto a viga metálica, na vigaP25 a maior deformação ocorreu na mesa superior da viga de aço, com valor de 8,9985 mm, conforme figura 67. Na mesa inferior, o maior valor apresentado foi de 8,9595 mm. Ambos localizados no meio do vão, devido à aplicação do trem-tipo em pior situação, em conformidade com as vigas mistas analisadas anteriormente.

Figura 67 – Deformação na viga de aço (vigaP25).



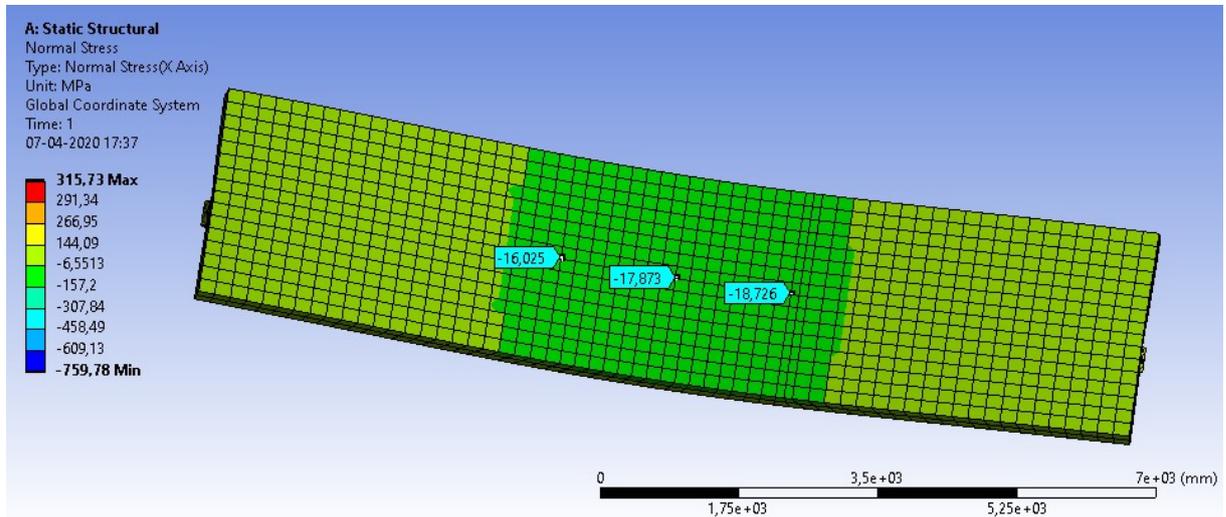
Fonte: Autor (2020)

- **Tensão Normal**

Com relação as tensões normais, os máximos resultados obtidos na laje de concreto da vigaP25 foram tensões de compressão, com valores de -16,025 MPa, -17,873 MPa e -18,726 MPa, localizados nos pontos onde foram aplicadas as cargas pontuais do trem-tipo. Como

demonstra a figura 68, os locais que apresentam coloração verde na laje obtiveram maiores tensões de compressão, no centro da laje, em comparação aos locais com cor amarela que apresentam-se em direção as extremidades.

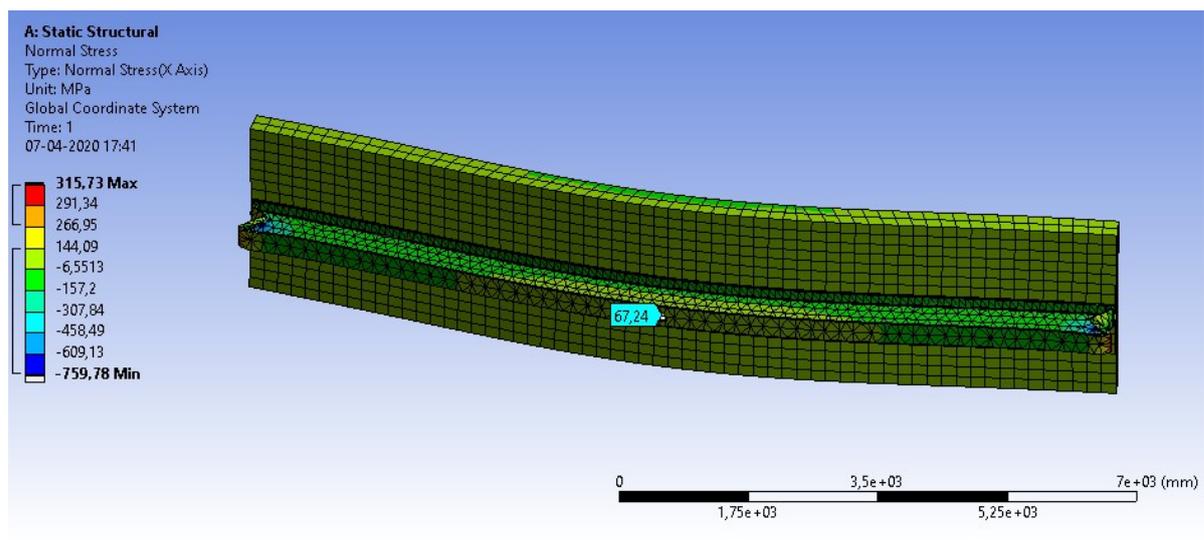
Figura 68 – Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP25).



Fonte: Autor (2020)

Analisando a mesa inferior da viga metálica, o maior valor de tensão apresentado no meio do vão foi 67,240 MPa, sendo esta uma tensão de tração. As tensões de tração apresentaram-se no centro da viga, na qual foram reduzindo em direção aos apoios, de forma que no local ilustrado em cor verde na figura 69, as mesmas demonstraram-se tensões de compressão.

Figura 69 – Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP25).

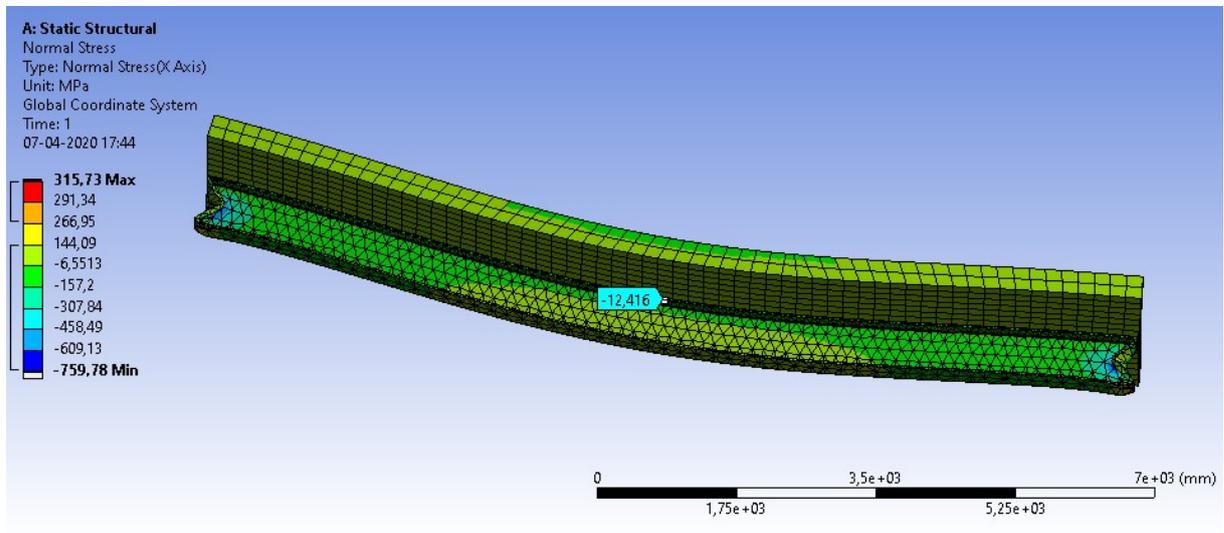


Fonte: Autor (2020)

Quanto à mesa superior da viga metálica, o meio do vão apresentou-se com uma tensão de compressão com valor de -12,416 MPa, conforme figura 70. Os valores de tensões de

compressão obtiveram acréscimos em direção aos apoios, uma vez que com a aplicação da força de protensão, a região próxima aos apoios é mais comprimida em comparação ao meio do vão.

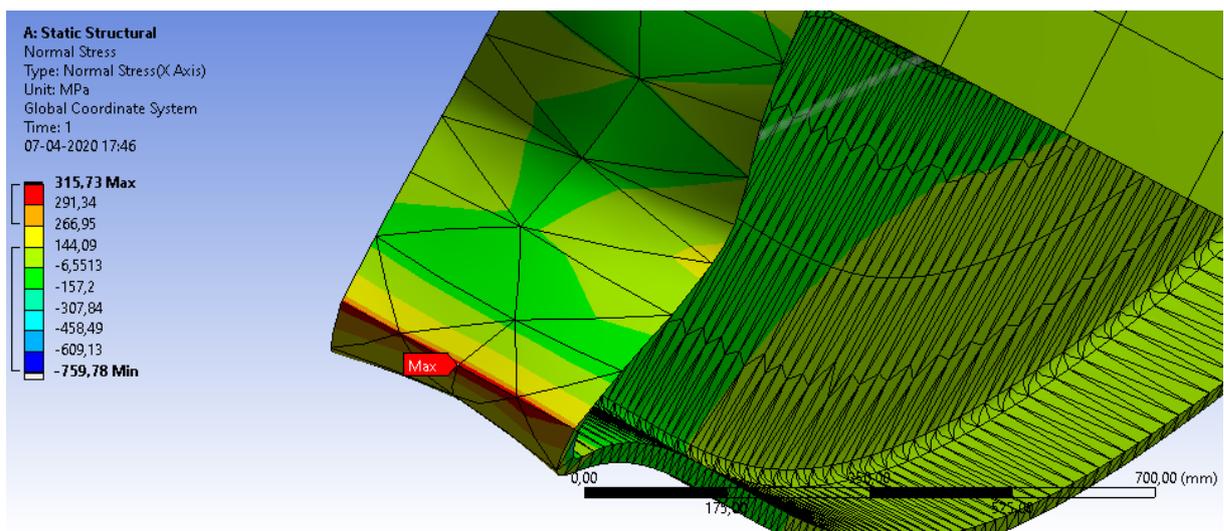
Figura 70 – Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP25).



Fonte: Autor (2020)

Na vigaP25, o máximo valor de tensão de tração apresentado foi de 315,73 MPa, como ilustra a figura 71, localizado na linha em que foi inserido o apoio de 2º gênero, uma vez que com a aplicação da protensão, há uma grande concentração de tensões nesse ponto onde a viga é fixada. Na ancoragem, as tensões variaram-se entre tração e compressão, obtendo uma tensão de tração no local onde a cordoalha foi inserida.

Figura 71 – Tensão normal de tração máxima (vigaP25).

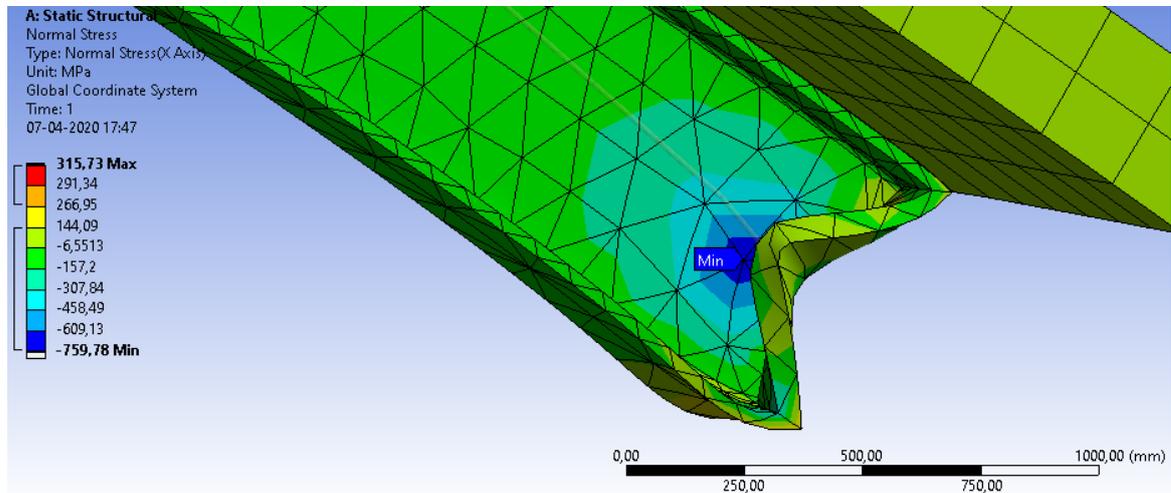


Fonte: Autor (2020)

Conforme figura 72, a maior tensão de compressão apresentada na análise foi de -759,78 MPa. Esta tensão apresentou-se na alma da viga metálica, próximo ao apoio de 2º gênero, pois

com a aplicação na protensão a 25 cm da mesa inferior, essa foi a região mais comprimida da viga mista com protensão.

Figura 72 – Tensão normal de compressão máxima (vigaP25).



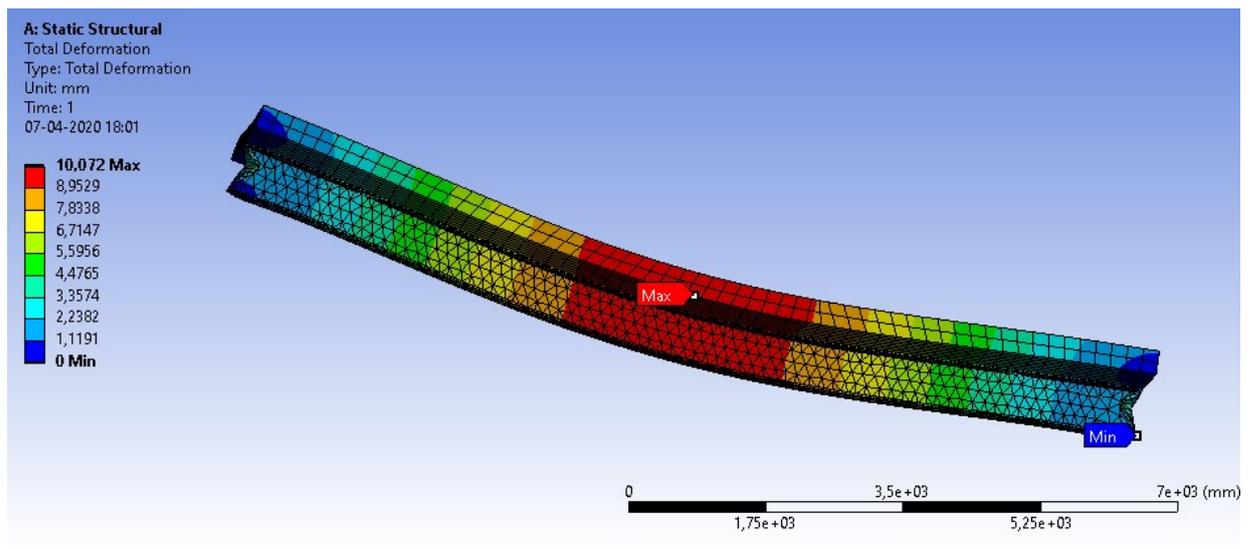
Fonte: Autor (2020)

4.1.4 Viga mista aço-concreto com protensão externa (VigaP35)

- **Deformação Total**

Com a aplicação da protensão externa na viga mista a uma altura de 35 cm da mesa inferior, obteve-se uma deformação máxima da estrutura de 10,072 mm, na extremidade da laje de concreto, localizada no meio do vão, conforme figura 73. Os valores de deformações foram reduzindo na extensão da viga em direção aos apoios, como ocorreu nas análises anteriores.

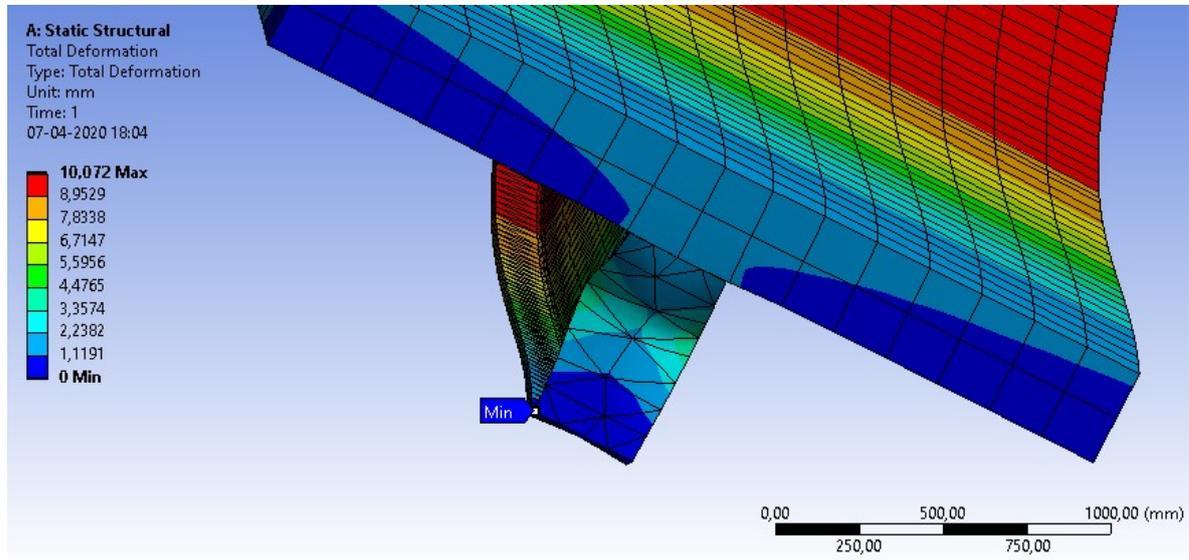
Figura 73 - Deformação na laje de concreto (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

Com a análise estrutural, a deformação mínima da viga P35 apresentou-se, assim como nas vigas já analisadas, na linha em que foi inserido o apoio de segundo gênero com resultado igual a 0 mm, como demonstra a figura 74.

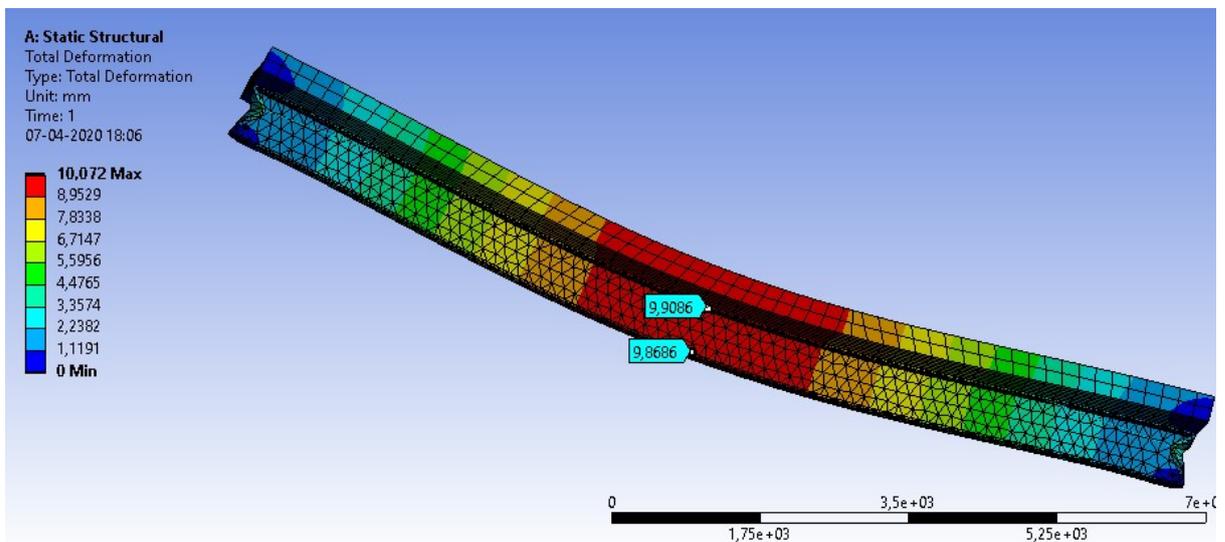
Figura 74 - Deformação mínima (viga P35).



Fonte: Autor (2020)

Na viga de aço, o maior valor de deformação apresentado foi de 9,9086 mm, presente na mesa superior da viga, conforme figura 75. Na mesa inferior a maior deformação foi igual a 9,8686 mm. Ambas as deformações citadas ocorreram no meio do vão, uma vez que carregamento variável foi considerado em pior situação. Assim como na laje de concreto, os valores foram reduzidos na viga em direção aos apoios, sendo a deformação mínima igual a 0, presente no apoio de 2º gênero.

Figura 75 - Deformação na viga de aço (viga P35).

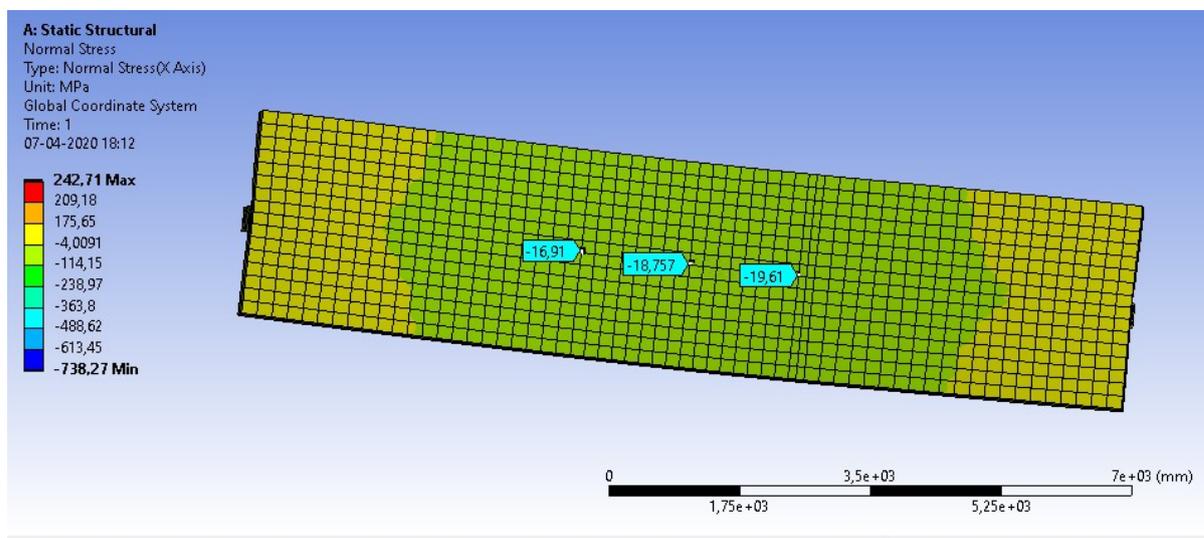


Fonte: Autor (2020)

- **Tensão Normal**

Na VigaP35, as máximas tensões normais atuantes na laje de concreto foram tensões de compressão com valores de -16,910 MPa, -18,757 MPa e -19,610 MPa, conforme figura 76. Estas tensões apresentaram-se nos pontos onde foram inseridas as forças pontuais do Trem-tipo, visto que este é o ponto de maior carregamento sobre a viga. A região ilustrada com coloração verde apresenta a concentração de maiores tensões de compressão, comparada a região com cor amarela. A laje apresenta tensões de compressão em quase toda sua extensão, exceto nas extremidades em direção aos apoios.

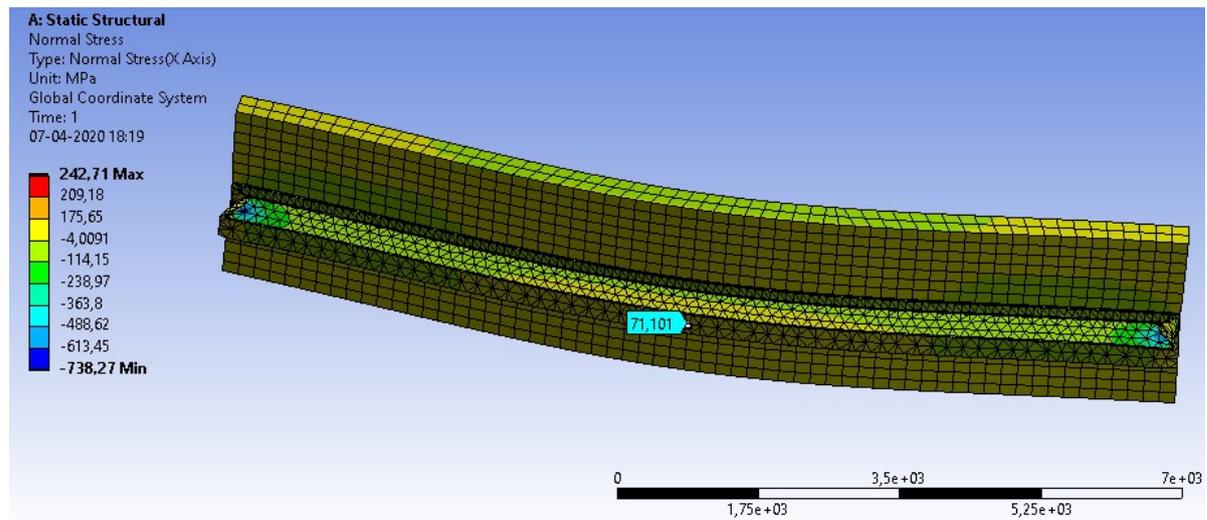
Figura 76 – Tensões normais no meio do vão da laje de concreto (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

Analisando a mesa inferior da viga metálica, no meio do vão o maior valor de tensão apresentado foi de 71,101 MPa, sendo esta uma tensão de tração. Conforme ilustra a figura 77, as tensões de tração apresentaram-se no centro da viga, na qual foram reduzindo em direção aos apoios, de modo que próximo às extremidades, como ilustra a cor verde, apresentaram-se tensões de compressão, visto que com a aplicação da protensão essa região apresentou-se comprimida.

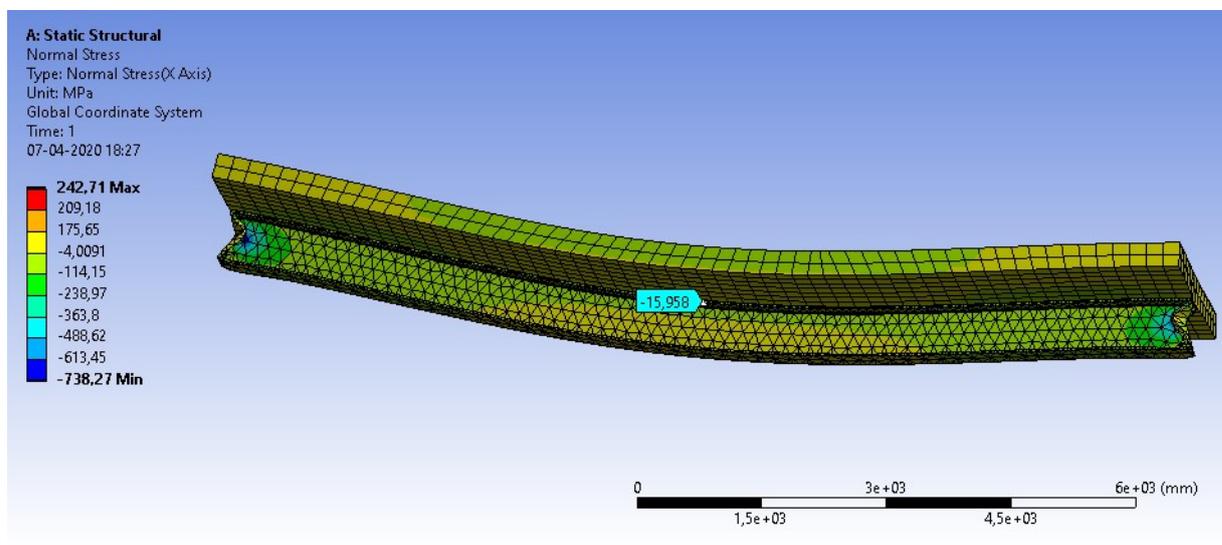
Figura 77 – Tensões normais no meio do vão da mesa inferior da viga de aço (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

Quanto à mesa superior da viga metálica, o meio do vão apresentou-se com uma tensão de compressão com valor de -15,958 MPa, conforme figura 78. Os valores de tensões de compressão obtiveram acréscimos em direção aos apoios, uma vez que com a aplicação da força de protensão, a região próxima aos apoios é mais comprimida em comparação ao meio do vão.

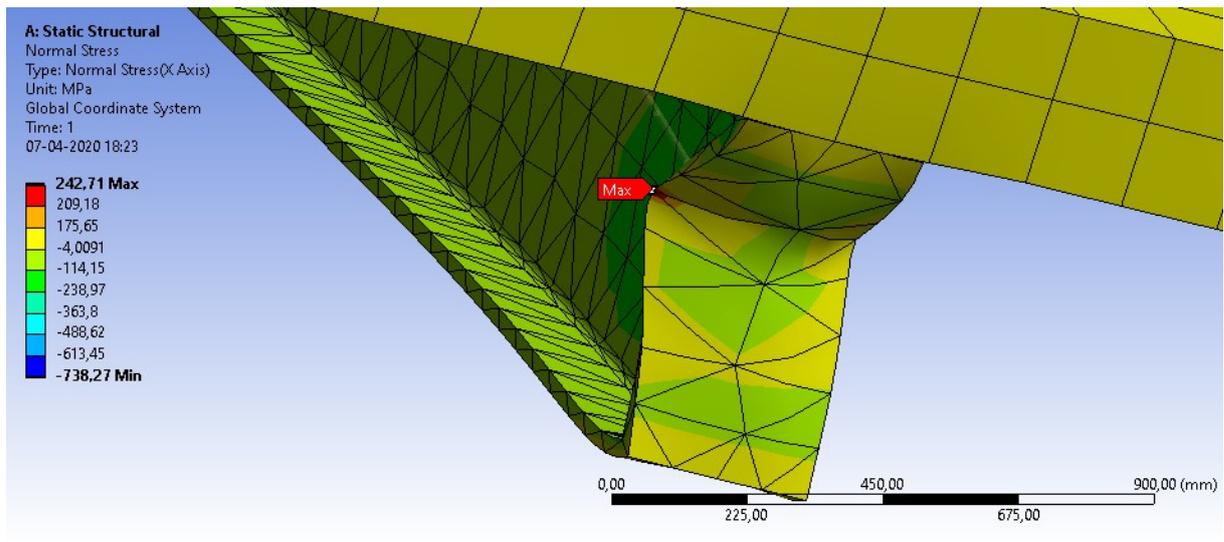
Figura 78 – Tensões normais no meio do vão da mesa superior na viga de aço (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

Na vigaP35, o máximo valor de tensão de tração apresentado foi de 242,71 MPa, localizado na extremidade da placa de ancoragem, como ilustra a figura 79. Com a aplicação da protensão a 35 cm da mesa inferior, esta foi a região que apresentou-se mais tracionada. Na ancoragem, as tensões variaram-se entre tração e compressão, obtendo uma tensão de tração no local do apoio de 2º gênero.

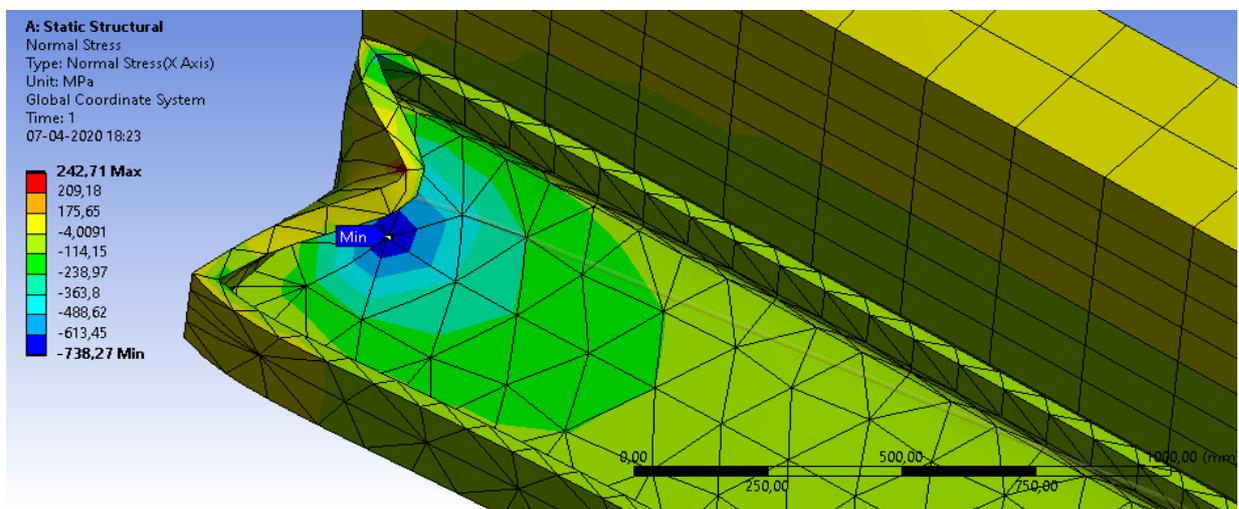
Figura 79 – Tensão normal de tração máxima (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

Conforme figura 80, a maior tensão de compressão apresentada na análise foi de -738,27 MPa. Esta tensão apresentou-se a alma da viga metálica, próximo ao apoio de 1º gênero, pois com a aplicação na protensão a 35 cm da mesa inferior, essa foi a região mais comprimida da viga mista protendida.

Figura 80 – Tensão normal de compressão máxima (vigaP35).



Fonte: Autor (2020)

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS VIGAS LONGARINAS MISTAS AÇO-CONCRETO

4.2.1 Análise comparativa de deformações das vigas mistas aço-concreto

A tabela 9 expõe um resumo das máximas deformações apresentadas na viga metálica e na laje de concreto das vigas mistas aço-concreto analisadas, bem como o local que ocorreram essas máximas deformações.

Com os dados obtidos pela análise estrutural, considerando isoladamente a viga metálica, é possível analisar que com a aplicação da protensão externa a uma altura de 15 cm da mesa inferior da viga mista, a maior deformação apresentada na viga metálica foi de 8,3624 mm tendo uma redução de 1,5124 mm comparada à viga mista aço-concreto convencional (viga referência), que apresentou deformação de 9,8748 mm. Essa redução resulta em aproximadamente 15,32% de diferença nas deformações máximas na viga metálica entre a vigaP15 e a viga referência.

Os resultados apresentados pela viga mista com protensão a 25 cm da mesa inferior, demonstraram que a mesma obteve uma deformação na viga metálica de 8,9985 mm, com uma redução de 0,8763 mm em comparação a viga mista convencional. Portanto, a vigaP25 apresentou-se com uma deformação aproximadamente 8,87% menor que a viga referência.

Entretanto, a viga mista com protensão a 35 cm da mesa inferior, obteve resultado oposto ao das demais vigas mistas protendidas analisadas, com uma deformação na viga metálica de 9,9086 mm, um aumento de 0,0338 mm comparada a viga mista convencional. Esse acréscimo justifica-se pela aplicação da protensão estar inserida na região comprimida da estrutura. Dessa forma, há um incremento da força de compressão exercida sobre a viga, o que resultou em uma maior deformação. Logo, a vigaP35 apresentou-se com uma deformação aproximadamente 0,34 % maior que a viga referência.

Ressalta-se que todas as deformações máximas apresentadas nas vigas metálicas ocorreram na mesa superior da viga, sendo essa a região mais deformada da estrutura considerando a condição final (serviço) da ponte.

Considerando isoladamente a laje de concreto, observou-se que a vigaP15 apresentou-se com uma deformação de 8,5257 mm, uma redução de 1,5273 mm em comparação a viga referência, com deformação de 10,053 mm. Desta forma, verifica-se que a viga mista com protensão a 15 cm da mesa inferior obteve uma deformação na laje de concreto aproximadamente 15,19% menor que a viga mista convencional.

Na laje de concreto da vigaP25, observou-se uma deformação de 9,1501 mm. Comparando com a viga referência, a mesma obteve-se uma redução de 0,9029 mm. Sendo assim, a viga mista com protensão a 25 cm da mesa inferior apresentou-se com uma deformação na laje de concreto, aproximadamente, 8,98% menor em comparação a viga mista convencional.

Conforme apresentado na viga metálica, na laje de concreto da vigaP35 a deformação máxima também apresentou comportamento estrutural oposto ao das demais lajes de concreto das vigas mistas protendidas. Houve uma deformação de 10,072 mm que, comparada à viga referência, obteve acréscimo de 0,019 mm, ou seja, aproximadamente 0,19%. Esse

comportamento justifica-se devido ao cabo estar inserido da região comprimida da viga mista, o que acrescentou na força de compressão sobre a viga mista, acarretando em uma maior deformação.

Quanto aos locais de deformações máximas nas lajes de concreto, observa-se que na viga referência, vigaP15 e vigaP35 apresentou-se na extremidade da laje, no meio do vão, enquanto a vigaP25 apresentou uma deformação máxima no centro da laje.

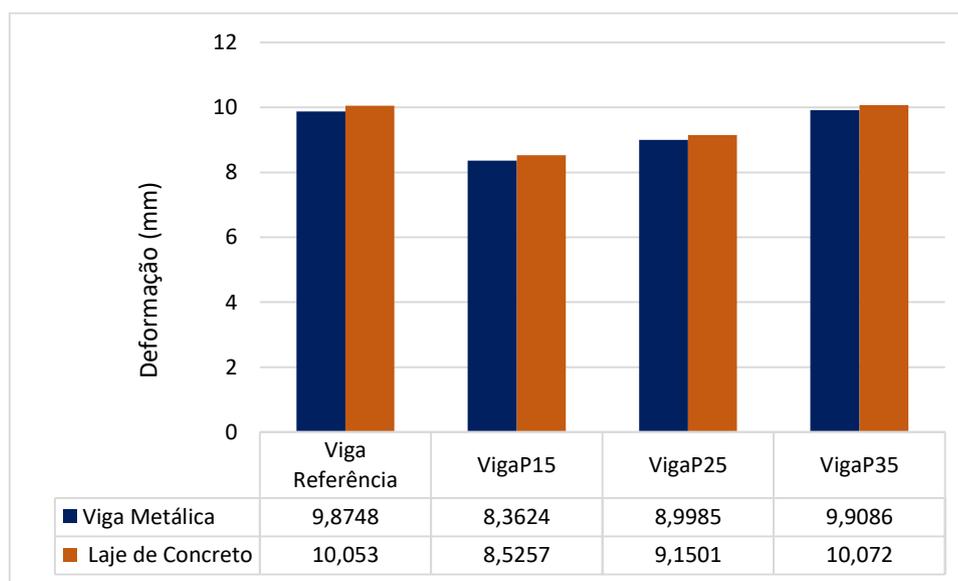
Tabela 9 – Deformações máximas.

Deformações Máximas				
Viga Metálica			Laje de Concreto	
Viga	Resultado (mm)	Local Apresentado	Resultado (mm)	Local Apresentado
Viga Referência	9,8748	Mesa Superior	10,053	Extremidade da Laje
VigaP15	8,3624	Mesa Superior	8,5257	Extremidade da Laje
VigaP25	8,9985	Mesa Superior	9,1501	Centro da Laje
VigaP35	9,9086	Mesa Superior	10,072	Extremidade da Laje

Fonte: Autor (2020)

A figura 81 apresenta o gráfico de deformações máximas tanto na viga metálica quanto na laje de concreto, ilustrando os distintos valores apresentados na análise estrutural. No gráfico é possível analisar as reduções nos valores de deformação ocasionados nas vigaP15 e vigaP25, e o acréscimo da vigaP35, comparados à viga referência.

Figura 81 – Deformações máximas.



Fonte: Autor (2020)

A tabela 10 apresenta as deformações máximas totais das vigas mistas aço-concreto analisadas. Observa-se que em todas as vigas tais deformações apresentaram-se nas lajes de

concreto. Os principais motivos para esses locais apresentados são: o material da estrutura, uma vez que o concreto possui um menor módulo de elasticidade comparado ao aço; os apoios, já que os apoios da estrutura se encontram nas vigas, tornando as lajes mais livres para se deformarem.

Tabela 10 – Deformação total máxima.

Deformação Total Máxima		
Viga	Resultado (mm)	Local Apresentado
Viga Referência	10,053	Laje de Concreto
VigaP15	8,5257	Laje de Concreto
VigaP25	9,1501	Laje de Concreto
VigaP35	10,072	Laje de Concreto

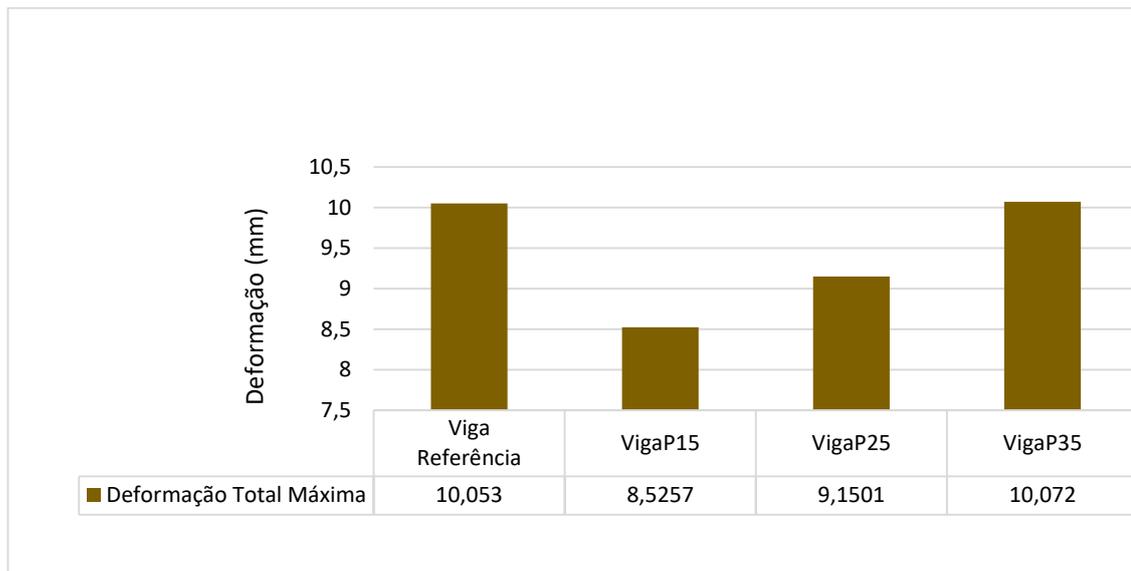
Fonte: Autor (2020)

A figura 82 ilustra o gráfico de deformações totais máximas, demonstrando o comportamento estrutural das vigas analisadas.

Conforme apresentado na presente pesquisa, o sistema de protensão tem a função de gerar na estrutura tensões opostas à que a mesma está submetida pela carga, e o local de aplicação influencia diretamente no desempenho da protensão. Logo, observa-se que, quando a protensão é aplicada mais próximo à mesa inferior da viga metálica, há uma maior redução de deformações, ou seja, um melhor comportamento estrutural. Essa região é a mais tracionada quando está na condição final (serviço), e torna-se o local mais adequado para inserir as cordoalhas, que geram na estrutura o efeito de compressão, ou seja, um efeito oposto ao que está sendo solicitada pela carga na região inferior.

Entretanto, se a protensão for aplicada próxima à mesa superior da viga metálica, há um aumento da deformação, uma vez que essa região já sofre efeitos de compressão, e os cabos de protensão aumentam esses efeitos.

Figura 82 – Deformação total máxima.



Fonte: Autor (2020)

4.2.2 Análise comparativa de tensões normais das vigas mistas aço-concreto

Na análise estrutural de tensões normais nas vigas mistas aço-concreto foram consideradas as tensões máximas de tração, tensões máximas de compressão e as tensões normais no meio do vão, visto que com essa análise foi possível obter o efeito que a protensão exercia na extensão das vigas.

Conforme apresenta a tabela 11, na laje de concreto a vigaP15 apresentou uma máxima tensão de compressão de -17,906 MPa. Comparada à viga referência, com tensão de compressão de -17,221 MPa, houve um acréscimo de 0,685 Mpa, ou seja, aproximadamente 3,98%.

A vigaP25 com a análise apresentou na laje de concreto uma máxima tensão de compressão de -18,726 MPa, com um aumento de 1,505 MPa comparada a viga referência. Logo, a viga protendida a 25 cm da mesa inferior, gera um acréscimo de tensão de compressão de, aproximadamente, 8,74% em relação a viga mista convencional.

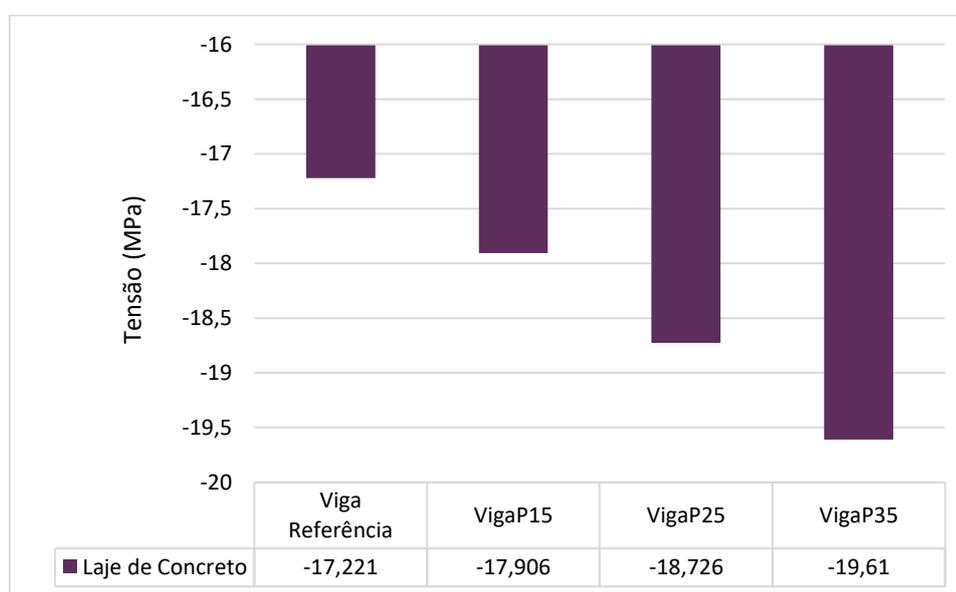
Na laje de concreto da vigaP35, observou-se uma máxima tensão de compressão de -19,610 MPa. Comparada a viga referência, apresentou um aumento de 2,389 MPa, na tensão de compressão. Sendo assim, com a protensão aplicada a 35 cm da mesa inferior da viga mista, há um acréscimo de, aproximadamente 13,87% em comparação a viga mista convencional.

Tabela 11 – Tensão normal na laje de concreto (meio do vão).

Tensão Normal na Laje de Concreto - Meio do Vão		
Viga	Resultado (MPa)	Tipo de Tensão
Viga Referência	-17,221	Compressão
VigaP15	-17,906	Compressão
VigaP25	-18,726	Compressão
VigaP35	-19,61	Compressão

A figura 83 ilustra o gráfico de Tensões Normais na laje de concreto (meio do vão), conforme explicitado nas discussões. Com a análise, percebe-se que com a aplicação da força de protensão há um acréscimo nas tensões de compressão nas lajes de concreto de todas as vigas mistas analisadas, uma vez que a protensão aplicada na viga metálica gera um efeito de compressão na mesma. Analisa-se também que, quanto mais próximo à laje a aplicação da protensão, maior o aumento na tensão de compressão da mesma, já que a força está mais próxima e o efeito produzido tende a ser maior. Entretanto, o concreto possui melhor capacidade de resistência à compressão, portanto, o aumento de tensões foi solicitado conforme a maior resistência do material.

Figura 83 – Tensão normal na laje de concreto (meio do vão).



Fonte: Autor (2020)

Conforme a tabela 12, analisando a mesa superior da viga metálica, no meio do vão a vigaP15 apresentou uma tensão de compressão de -8,3428 MPa. Comparada à viga referência, com uma tensão de tração de 5,3477 MPa, percebe-se que houve uma mudança de tensões de tração para compressão com a aplicação da protensão externa.

A mesa superior da vigaP25, no meio do vão, apresentou uma tensão de compressão de -12,416 MPa, ou seja, assim como na vigaP15 a força de protensão gerou na estrutura uma tensão oposta comparada a viga referência, sem protensão. Em relação à vigaP15 que também apresentou tensão de compressão, a vigaP25 ocasionou um acréscimo de 4,0732 MPa, ou seja, aproximadamente 48,82%.

Na vigaP35 o resultado apresentado na mesa superior da viga metálica, no meio do vão, foi uma tensão de compressão de -15,958 MPa, de forma que, assim como nas vigas protendidas analisadas anteriormente, a força de protensão gerou uma tensão oposta a viga mista sem protensão. Comparando com as demais vigas mistas protendidas que obtiveram o mesmo comportamento estrutural, na vigaP35 houve um aumento de 7,6152 MPa, ou seja, aproximadamente 91,28% em relação a vigaP15; e 3,542 MPa, aproximadamente 28,53% comparada à vigaP25.

Tabela 12 – Tensão normal na mesa superior da viga (meio do vão).

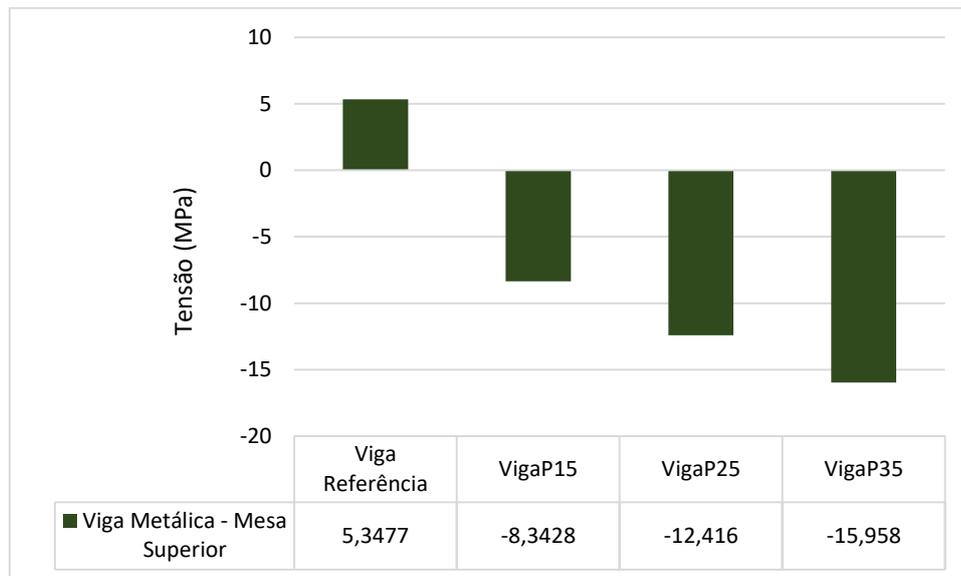
Tensão Normal na Mesa Superior da Viga - Meio do Vão

Viga	Resultado (MPa)	Tipo de Tensão
Viga Referência	5,3477	Tração
VigaP15	-8,3428	Compressão
VigaP25	-12,416	Compressão
VigaP35	-15,958	Compressão

Fonte: Autor (2020)

Conforme figura 84, o gráfico de tensões normais na mesa superior das vigas ilustra as tensões normais apresentadas na análise. Logo, verifica-se que a aplicação da força de protensão ocasionou na mesa superior das vigas longarinas uma mudança de tensões, de tração para compressão, gerando tensões opostas. Além disso, analisa-se que, quanto mais próximo da mesa superior os cabos estão inseridos, maior a tensão de compressão gerada. Conseqüentemente, quando mais próximo da mesa inferior, menor a tensão de compressão presente no meio do vão da longarina.

Figura 84 – Tensão normal na mesa superior da viga (meio do vão).



Fonte: Autor (2020)

Em conformidade com a tabela 13, analisando a mesa inferior da viga metálica, no meio do vão a vigaP15 apresentou uma tensão de tração de 65,894 MPa, uma redução de 27,457 MPa comparada a viga referência, com 93,351 MPa. Portanto, a viga com protensão a 15 cm da mesa inferior apresentou uma tensão de tração no meio do vão, aproximadamente 29,41% menor que a viga mista convencional.

Na vigaP25, a aplicação da protensão gerou no meio do vão da mesa inferior uma tensão de tração de 67,240 MPa. Comparando com a viga referência houve uma redução de 26,111 MPa, ou seja, aproximadamente 27,97%.

A mesa inferior da vigaP35, no meio do vão, resultou em uma tensão de tração de 71,101 MPa. Comparando à viga referência, houve redução de 22,250 MPa no valor de tensão. Desta forma, com a aplicação da protensão a 35 cm da mesa inferior, ocasionou uma redução de, aproximadamente, 23,83% em relação a viga mista convencional.

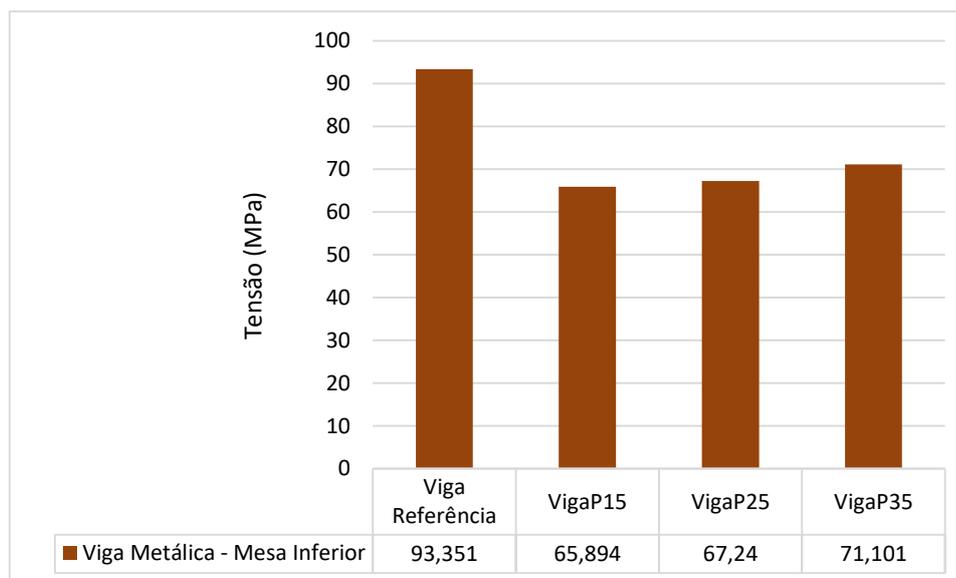
Tabela 13 – Tensão normal na mesa inferior da viga (meio do vão).

Tensão Normal na Mesa Inferior da Viga - Meio do Vão		
Viga	Resultado (MPa)	Tipo de Tensão
Viga Referência	93,351	Tração
VigaP15	65,894	Tração
VigaP25	67,24	Tração
VigaP35	71,101	Tração

Fonte: Autor (2020)

A figura 85 apresenta o gráfico de Tensões Normais na mesa inferior das vigas longarinas, no meio do vão, ilustrando os resultados obtidos. Conforme explicitado, todas as vigas analisadas apresentaram na mesa inferior tensões de tração, uma vez que com a análise da ponte na condição final (serviço), essa região apresenta-se sempre tracionada. Observa-se que a aplicação da protensão externa proporciona uma redução nas tensões normais e, quanto mais próximo na mesa inferior da viga os cabos forem ancorados, menor a tensão apresentada.

Figura 85 – Tensão normal na mesa inferior da viga (meio do vão).



Fonte: Autor (2020)

A tabela 14 apresenta as tensões normais máximas de tração, considerando toda a extensão das vigas mistas aço-concreto analisadas.

A viga referência apresentou uma tensão de tração total máxima de 266,36 MPa. Este elevado valor de tensão justifica-se pelo fato de que, na análise, os apoios não foram considerados em tamanho real em escala, sendo apenas a linha da extremidade da viga metálica fixada como apoio, de forma que a mesma permanecesse isostática. Dessa forma, houve uma concentração de tensão de tração acima do apoio de 2º gênero.

Nas longarinas vigaP15 e vigaP25 as máximas tensões de tração foram de 614,72 MPa e 315,73 MPa, respectivamente. Ambas se situaram no apoio de 2º gênero, devido à alta força de protensão aplicada próxima ao apoio. Percebe-se que na vigaP15 a tensão foi superior a vigaP25, visto que os cabos de protensão foram ancorados mais próximos ao apoio.

Conforme Nelsen (2013), o cabo de protensão com traçado ao longo de todo o comprimento da viga e ancorado nas extremidades provoca tensões adicionais nos apoios da viga. Diante disso, nos apoios, recomenda-se ancorar o cabo afastado das extremidades da viga. Caso não seja possível, o cabo deve ser ancorado o mais próximo possível da linha neutra da

seção mista para se reduzir ao máximo ou eliminar por completo a excentricidade do cabo nos apoios e, conseqüentemente, essa tensão indesejada provocada pela força de protensão.

Na vigaP35 a máxima tensão normal de tração foi de 242,71 MPa. Essa máxima tensão foi localizada na placa de ancoragem, por ser o local onde foi acionada a força de protensão, e em uma maior distância do apoio, gerando uma grande concentração localizada de tensão.

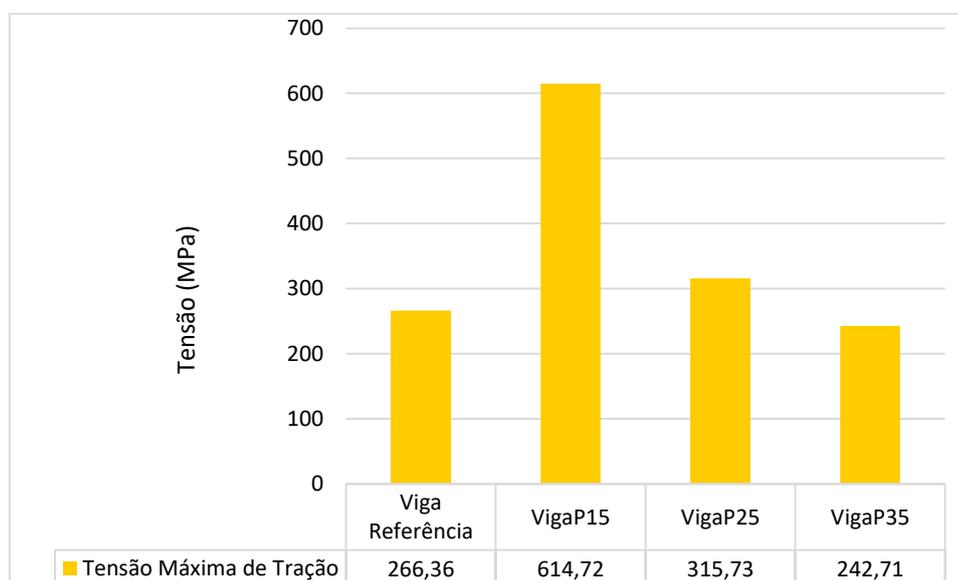
Tabela 14 – Tensão normal máxima de tração.

Tensão Normal Máxima de Tração		
Viga	Resultado (MPa)	Local Apresentado
Viga Referência	266,36	Acima do Apoio 2º gênero
VigaP15	614,72	Apoio de 2º gênero
VigaP25	315,73	Apoio de 2º gênero
VigaP35	242,71	Placa de Ancoragem

Fonte: Autor (2020)

A figura 86 apresenta o gráfico de tensões normais máximas de tração, ilustrando os diferentes resultados apresentados nas análises. Cada longarina apresentou sua particularidade, de forma que, conforme demonstra o gráfico, a vigaP15 apresentou tensão normal de tração máxima superior as outras vigas analisadas.

Figura 86 – Tensão normal máxima de tração.



Fonte: Autor (2020)

A tabela 15 apresenta os resultados das tensões normais máximas de compressão das vigas mistas aço-concreto analisadas.

Observa-se que na viga referência, o máximo valor de tensão de compressão foi de -586,03 MPa, localizado no apoio de 1º gênero. Com a análise realizada em condição final

(serviço) da ponte, a linha de apoio de 1º gênero foi a região mais comprimida da viga mista sem protensão.

Nas longarinas vigaP15, vigaP25 e vigaP35 os máximos valores de tensões de compressão apresentados foram de -991,21 MPa, -759,78 MPa e -738,27 MPa, respectivamente. Todos os valores localizaram-se na alma da viga metálica, gerando o fenômeno de flambagem local nas vigas de aço. Percebe-se que a vigaP15 obteve tensão de compressão maior que as demais vigas, tendo valor aproximadamente 23,35% superior à vigaP25, e 25,52% superior a vigaP35.

Tabela 15 – Tensão normal máxima de compressão.

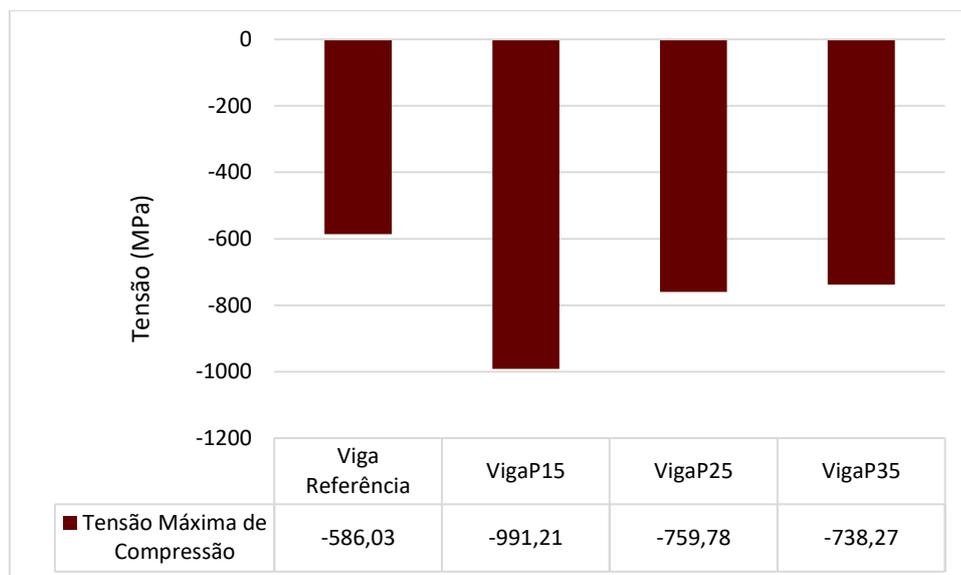
Tensão Normal Máxima de Compressão

Viga	Resultado (MPa)	Local Apresentado
Viga Referência	-586,03	Apoio de 1º gênero
VigaP15	-991,21	Alma da viga metálica
VigaP25	-759,78	Alma da viga metálica
VigaP35	-738,27	Alma da viga metálica

Fonte: Autor (2020)

A figura 87 ilustra o gráfico de tensões normais máximas de compressão das vigas mistas aço-concreto, com as representações dos valores citados. Ressalta-se que, todas as vigas protendidas obtiveram maior tensão de compressão na alma da viga e, conforme demonstra o gráfico, quanto mais próxima da mesa inferior os cabos forem ancorados, maior a deformação na alma da viga.

Figura 87 – Tensão normal máxima de compressão.



Fonte: Autor (2020)

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar e comparar o comportamento estrutural de vigas longarinas mistas aço-concreto convencionais e com aplicação de protensão externa em pontes rodoviárias. Para isso, foram analisadas 04 modelos de vigas mistas aço-concreto, sendo uma viga mista convencional e as demais com aplicação de protensão externa com ancoragem em diferentes alturas em relação à mesa inferior das vigas longarinas.

Com a análise de deformações máximas foi possível concluir que, a aplicação de protensão externa próxima à mesa inferior da viga metálica proporcionou às vigas mistas protendidas um melhor comportamento estrutural comparada a viga mista convencional. Com a aplicação a 15 cm da mesa inferior, na viga metálica houve uma redução nas deformações de 15,32% e na laje de concreto uma redução de 15,19%. Com a aplicação a 25 cm da mesa inferior houve uma redução nas deformações na viga metálica de 8,87%, e na laje de concreto de 8,98%, comparadas à deformação apresentada pela viga mista aço-concreto convencional.

Entretanto, se a aplicação da protensão for próxima à laje de concreto, ocasiona um aumento da deformação decorrente do acréscimo de força de compressão gerado pela protensão. A análise da protensão externa aplicada 35 cm acima da mesa inferior, resultou em um acréscimo de deformações da viga metálica de 0,34 % e na laje de concreto de 0,19%, em relação à viga mista convencional.

Quanto a análise de tensões normais conclui-se que, a aplicação da protensão externa proporciona à laje de concreto um aumento de tensões de compressão, visto que a força de protensão ocasiona efeito de compressão à estrutura. Conforme apresentando na pesquisa, quanto mais próxima à mesa inferior da viga metálica a protensão for aplicada, menor este aumento das tensões de compressões, já que se localiza a uma maior distância da laje. Nas longarinas com protensão a 15 cm, 25 cm e 35 cm acima da mesa inferior houveram acréscimos de 3,98%, 8,74% e 13,87% respectivamente, comparadas a viga mista aço-concreto convencional.

Na análise isolada das vigas metálicas, na mesa superior a força de protensão gerou uma mudança nas tensões. A viga mista convencional apresentou uma tensão de tração de 5,3577 MPa, porém as vigas com protensão a 15 cm, 25 cm e 35 cm acima da mesa inferior, resultaram em tensões de compressão de -8,3428 MPa, -12,461 MPa e -15,958 MPa, respectivamente. Portanto, percebe-se que a força de protensão ocasionou tensões opostas à apresentada pela viga mista sem protensão. Ademais, ressalta-se que nessa análise a viga com protensão mais próxima à mesa inferior, a uma distância de 15 cm, apresentou menor tensão de compressão, tendo uma

diferença de 48,82% comparada a viga com protensão 25 cm acima da mesa inferior, e 91,28%, comparada a viga protendida 35 cm acima da mesa inferior.

Com relação às análises da mesa inferior das vigas metálicas, conclui-se que, a aplicação da protensão propiciou melhor comportamento estrutural em todas vigas mistas analisadas, comparada a viga mista convencional. Com a aplicação da protensão 15 cm, 25 cm e 35 cm acima da mesa inferior, obtiveram reduções de 29,41%, 27,97% e 23,83%, respectivamente, em relação a viga mista sem protensão. Logo, observa-se que a aplicação da protensão mais próxima à mesa inferior promove uma maior redução nas tensões de tração, uma vez que provoca na estrutura tensões opostas à que a mesma está sendo solicitada.

Quanto às máximas tensões normais de tração, conclui-se que elas ocorreram nas extremidades das vigas mistas, nos apoios e no ponto de ancoragem. As máximas tensões nos apoios geradas pela viga mista convencional, vigaP15 e vigaP25 ocorreram devido ao apoio não ter sido considerado em dimensões reais em escala. Além disso, conforme exposto nas discussões, recomenda-se ancorar os cabos de protensão afastados das extremidades da viga, ou o mais próximo possível da linha neutra da viga, eliminando essa excentricidade do cabo nos apoios e, conseqüentemente, essa tensão indesejada. Quanto a tensão localizada na placa de ancoragem, justifica-se devido ao elevado valor de força de protensão aplicado sobre a área da cordoalha.

Com a análise das máximas tensões normais de compressão, observa-se que as mesmas ocorreram no apoio de 1º gênero na viga mista convencional, e na alma da viga metálica nas vigas mistas protendidas, originando flambagem local. Além disso, nota-se que a viga protendida próxima à mesa inferior, obteve maior tensão de compressão, visto que a vigaP15 apresentou valor aproximadamente 23,35% superior à vigaP25, e 25,52% superior a vigaP35.

Diante do exposto, conclui-se que a protensão externa proporciona à viga mista aço-concreto um melhor comportamento estrutural em sua extensão, tanto em deformações quanto em tensões normais. Entretanto, ressalta-se que a protensão aplicada próxima à mesa inferior propicia uma maior redução de deformações e tensões normais no meio do vão da viga, sendo este o local mais solicitado considerando a condição final (serviço) da ponte rodoviária.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar análise de vigas mistas aço-concreto protendidas com outro tipo de perfil metálico, como por exemplo o perfil U;

- Abranger estudo das vigas mistas aço-concreto protendidas dando ênfase aos apoios, uma vez que os mesmos apresentaram uma maior concentração de tensões;
- Realizar pesquisa com vigas mistas aço-concreto protendidas contínuas, para obter comportamento estrutural nos locais de momentos negativos;
- Avaliar o comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto protendidas com traçado poligonal.

REFERÊNCIAS

- ABREU, João Felipe Araújo Carneiro de. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- ALMEIDA, Tatiana Gesteira Martins de. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 7482**: Fios de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 7483**: Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- AYALA, Igor Carlos Alarcón. **Customização do software ansys para análise de lajes de concreto protendido pelo método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. 1.ed. **Método dos elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto - Portugal, 2003. 248 p.
- BERNARDO, Glauco. **Pontes**. 3.ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1980, 60 p.
- BUFFONI, Salete Souza de Oliveira. **Deflexão de Vigas**. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2017.
- DESIR, Jean Marie. **Análise não-linear do comportamento até a ruptura de vigas contínuas de concreto com protensão externa**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.
- ELLER, Pâmela Renon. **Pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto para pontes de pequeno porte**. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FERREIRA, Aline Caires. **Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia- Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FONTES, Fernando Fernandes. **Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HIBBELER, Russell C. 5.ed. **Resistência dos Materiais.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 670 p.

KLINSKY, Gelafito eduardo rené gutiérrez. **Uma contribuição ao estudo das pontes em vigas mistas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LEONHARDT, Fritz. **Construções de Concreto: Princípios Básicos da Construção de Pontes de Concreto.** Rio de Janeiro: Interciência, v. 6, 1979. 242 p.

MARINHO, Ivy Jeann Pinto. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MARTHA, Luiz Fernando. **Método básico da análise de estruturas.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010, 328 p.

MASCIA, Nilson Tadeu. **Energia de deformação e teoremas da energia.** Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MATTOS, Tales Simões. **Programa para análise de superestruturas de pontes de concreto armado e protendido.** Tese de Mestrado (Pós-graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

NELSEN, Anna Carolina Haiduk. **Comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com proteção externa.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

NETO, Henrique Lindenberg. **Introdução à mecânica das estruturas.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996, 333 p.

PFEIL, Walter. **Pontes em Concreto Armado.** Rio de Janeiro: LTC, 1979, 363 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. 7.ed. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** Rio de Janeiro: LTC, 2000. 356 p.

PINHO, Fernando Ottoboni; BELLEI, Ildony Hélio. **Pontes e viadutos em vigas mistas.** Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2007, 138 p.

REIS, Francisco José Costa. **Influência do nível de protensão na deformação de estruturas executadas com protensão externa.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ROMERO, Diana Valeria Schwenk. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

TAKEYA Toshiaki; DEBS, Mounir Khalil El. **Introdução às pontes de concreto.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007, 221 p.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão.** Recife: CREA-PE, 2002, 83 p.

RELATÓRIO ANTIPLÁGIO- COPYSPIDER

scholar.copyspider.net/view/showStudyInCS3.php?&cfa=2254256700d6d341775cac4aea86cf5a10216384&changelang=pt_br

Aplicações Google Entrada (8) - imperi... nota fiscal. - imperi... Consultar CNPJ na... Erro de privacidade Erro de privacidade Apostila Hidraulica... Prefeitura Mun de... Login

Português

Anúncio fechado por Google

Gerador de Referência Bibliográfica (ABNT, Vancouver)

Visualizar

Exportar relatório PDF

Exportar relatório

TCC II- Josllanda Thaynara Leite Schussler- 2020-1.docx (02/06/2020):

Documentos candidatos

esss.co/blog/quarta-... [0,13%]
 esss.co/blog/confira... [0,11%]
 social.stoa.usp.br/a... [0,04%]
 datfont.com/pt/ferro-... [0%]
 studentcommunity.ans... [0%]

Arquivo de entrada: TCC II- Josllanda Thaynara Leite Schussler- 2020-1.docx (14000 termos)

Arquivo encontrado	Total de termos comuns	Termos comuns (%)	Similaridade (%)
esss.co/blog/quarta-...	Visualizar 1109	21	0,13
esss.co/blog/confira...	Visualizar 1192	17	0,11
social.stoa.usp.br/a...	Visualizar 873	6	0,04

monografias.poli.ufr...
 Parece que o documento foi removido do site ou nunca existiu. HTTP response code: 404
 Conversão

lume.ufras.br/hist...

0 Digite aqui para pesquisar

07:32 02-06-2020