



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ISABELLE ALVES DA SILVA

**ANÁLISE DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
ATRAVÉS DO ANSYS**

**RUSSAS
2021**

ISABELLE ALVES DA SILVA

**ANÁLISE DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
ATRAVÉS DO ANSYS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Cândido Jorge de Sousa Lobo

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58a Silva, Isabelle Alves da.

Análise de reforços estruturais em vigas de concreto armado através do ANSYS /
Isabelle Alves da Silva. – 2021.
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus
de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

1. Reforço estrutural. 2. Modelagem numérica. 3. Concreto armado. I. Título.

CDD 620

ISABELLE ALVES DA SILVA

ANÁLISE DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
ATRAVÉS DO ANSYS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do grau de Bacharel Engenheiro
Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otávio Rangel Cavalcante (Avaliador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Andriele Nascimento de Souza (Avaliador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Ao meu avô José Antônio e amigos.

“A ciência é sobre saber, a engenharia é sobre fazer.” (Henry Petroski).

RESUMO

A identificação precoce de manifestações patológicas e a definição do processo de reabilitação em estruturas de concreto armado é essencial para garantir a segurança e a integridade, tanto dos usuários como da estrutura. Essa necessidade não acomete apenas construções antigas, estruturas recentes apresentam manifestações patológicas principalmente devido à erros de execução ou de projeto e uso indevido, como aplicação de sobrecargas não previstas em projeto. Este trabalho analisa o comportamento de vigas em concreto armado após a reabilitação com três métodos distintos: a colagem de chapas metálicas com resinas epóxicas, o uso de perfis metálicos e a imprimação das fibras de carbono. Foram realizadas oito modelagens no software ANSYS, com auxílio do Eberick, para estabelecer as cargas atuantes na estrutura, obtendo como resultado as distribuições de deformações e de tensões ao longo da estrutura. Ademais são utilizadas as deformações como critério, para determinar que o reforço estrutural com fibras de carbono obteve mais êxito em recuperar a estrutura.

Palavras-chave: Reforço estrutural; modelagem numérica; concreto armado.

ABSTRACT

The early identification of pathological manifestations and the definition of the rehabilitation process in reinforced concrete structures is essential to guarantee the safety and integrity of both users and the structure. This need does not only affect old constructions, recent structures present pathological manifestations mainly due to execution or design errors and misuse, such as the application of overloads not foreseen in the project. This work analyzes the behavior of reinforced concrete beams after rehabilitation with three different methods: the bonding of metal sheets with epoxy resins, the use of metal profiles and the priming of carbon fibers. Eight modelings were performed in ANSYS software, with the help of Eberick, to establish the loads acting on the structure, obtaining as a result the strain and stress distributions along the structure. Furthermore, deformations are used as a criterion to determine which structural reinforcement with carbon fibers was more successful in recovering the structure.

Keywords: Structural reinforcement; numerical modeling; reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga em balanço (RODRIGUES E SOUZA, 2008).	18
Figura 2 – Viga apoiada (RODRIGUES E SOUZA, 2008).	18
Figura 3 - Viga Geber (RODRIGUES E SOUZA, 2008).	18
Figura 4 – Estádio de deformação (BASTOS, 2006).	19
Figura 5 - Fissuras por flexão (THOMAZ, 2003).	20
Figura 6 - Fissuras por compressão (MARCELLI, 2007).	20
Figura 7 - Processo de corrosão da armadura (POSSAN, 2010).	21
Figura 8 – Esquema de reforço com chapas metálicas (SOUZA E RIPPER, 1998).	23
Figura 9 – Disposição das fibras de carbono (MACHADO, 2010).	25
Figura 10 – Corte do corpo (HIBBELER, 2010).	27
Figura 11 – Componentes atuam nas faces do elemento (HIBBELER, 2010).	28
Figura 12 – Elipse do critério de von Mises (HIBBELER, 2010).	29
Figura 13 – Divisão da área em elementos menores (SOUTA FILHO, 2002).	30
Figura 14 - Estrutura analisada (AUTOR, 2021).	34
Figura 15 – Viga escolhida para análise (AUTOR, 2021).	35
Figura 16 - Roteiro de dimensionamento (SILVA, 2017).	36
Figura 17 – Geometria da viga analisada (AUTOR, 2021).	37
Figura 18 – Perfil T (GERDAU, 2020)	38
Figura 19 -Perfil I (GERDAU, 2020).	39
Figura 20 - Perfil U (GERDAU, 2020).	40
Figura 21 – Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).	41
Figura 22 - Distribuição das tensões principais máximas na estrutura (AUTOR, 2021).	42
Figura 23 – Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	42
Figura 24 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	43
Figura 25 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).	44
Figura 26 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	45
Figura 27 – Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	45

Figura 28 - Distribuição das tensões de von Mises (AUTOR, 2021).....	46
Figura 29 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	47
Figura 30 - Distribuição das tensões principais máximas na estrutura (AUTOR, 2021).	48
Figura 31 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	48
Figura 32 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	49
Figura 33 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	50
Figura 34 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	50
Figura 35 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	51
Figura 36 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	52
Figura 37 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	53
Figura 38 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	53
Figura 39 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).	53
Figura 40 - Distribuição das tensões principais mínima na estrutura (AUTOR, 2021).	54
Figura 41 - Distribuição das tensões principais mínima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).	54
Figura 42 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	55
Figura 43 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	55
Figura 44 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	56
Figura 45 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	56
Figura 46 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).	57
Figura 47 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	57

Figura 48 - Distribuição das tensões principais mínima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	57
Figura 49 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	58
Figura 50 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	58
Figura 51 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	59
Figura 52 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	59
Figura 53 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	60
Figura 54 - Distribuição das tensões principais mínima na estrutura (AUTOR, 2021).	60
Figura 55 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	61
Figura 56 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	61
Figura 57 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).....	62
Figura 58 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).	63
Figura 59 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	63
Figura 60 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).	64
Figura 61 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).	65
Figura 62 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas aplicadas na estrutura analisada (AUTOR, 2021).	34
Tabela 2 – Propriedades do concreto armado, da fibra de carbono, dos perfis e chapas metálicas (BIBLIOTECA ANSYS, 2021).....	37
Tabela 3 – Resumo das simulações analisadas neste trabalho (AUTOR, 2021).....	38
Tabela 4 – Dimensões do perfil em T (GERDAU, 2020).	38
Tabela 5 – Dimensões do perfil em I (GERDAU, 2020).....	39
Tabela 6 – Dimensões do perfil em U (GERDAU, 2020).	40
Tabela 7 – Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	42
Tabela 8 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	43
Tabela 9 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	43
Tabela 10 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	46
Tabela 11 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	46
Tabela 12 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	46
Tabela 13 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	48
Tabela 14 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	49
Tabela 15 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	49
Tabela 16 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	51
Tabela 17 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	51
Tabela 18 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	52

Tabela 19 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	54
Tabela 20 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	54
Tabela 21 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	55
Tabela 22 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	57
Tabela 23 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	58
Tabela 24 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	58
Tabela 25 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).....	60
Tabela 26 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	61
Tabela 27 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	62
Tabela 28 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima.....	63
Tabela 29 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).....	64
Tabela 30 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).....	65
Tabela 31 – Resumo das deformações no centro da viga nas simulações (AUTOR, 2021).....	66
Tabela 32 - Deformações nas extremidades da viga em diferentes simulações (AUTOR, 2021).....	66
Tabela 33 – Deformações com reforço de chapas metálicas (AUTOR, 2021).....	66
Tabela 34 - Deformações com reforço de fibras de carbono (AUTOR, 2021).	66

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Contextualização.....	14
1.2.	Justificativa.....	15
1.3.	Objetivos	16
1.3.1.	Objetivo geral	16
1.3.2.	Objetivos específicos	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1.	Concreto armado e suas manifestações patológicas.....	16
2.2.	Sistemas de vigas de concreto armado.....	17
2.2.1.	Estádios de deformação.....	18
2.3.	Principais manifestações patológicas	19
2.4.	Reabilitação de vigas de concreto armado	21
2.4.1.	Reforço com chapas metálicas.....	23
2.4.2.	Reforço com perfis metálicos	23
2.4.3.	Reforço com fibras de carbono.....	24
2.5.	RESISTÊNCIAS DO MATERIAIS.....	25
2.5.1.	Módulo de Elasticidade	25
2.5.2.	Coeficiente de Poisson.....	26
2.5.3.	Tensões principais	26
2.5.3.1.	Tensão normal	26
2.5.3.2.	Tensão de cisalhamento	27
2.5.4.	Estado de tensão	27
2.5.5.	Critério de von Mises.....	28
2.5.6.	Deformação.....	29
2.5.7.	Método dos elementos finitos	30

2.5.8.	Análise não-linear.....	31
2.5.9.	Análise estrutural estática	31
2.5.10.	Etapas do método dos elementos finitos	32
2.6.	ANSYS Workbench	32
2.7.	Eberick	33
3.	METODOS E MATERIAIS.....	33
3.1.	Estrutura analisada	33
3.2.	Definição da análise	36
3.2.1.	Dimensões do perfil metálico T	38
3.2.2.	Dimensões do perfil metálico I	39
3.2.3.	Dimensões do perfil metálico U	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1.	Análise da estrutura sem reforços	41
4.2.	Análise da estrutura com reforço com perfil metálico T	44
4.3.	Análise da estrutura com reforço com perfil metálico I	47
4.4.	Análise da estrutura com reforço com perfil metálico U	50
4.5.	Análise da estrutura com reforço de chapa metálicas	52
4.6.	Análise da estrutura com reforço de fibra de carbono	55
4.7.	Análise da estrutura com reforço de chapas metálicas em viga bi apoiada	59
4.8.	Análise da estrutura com reforço de fibras de carbono em viga bi apoiada	62
4.9.	Resumo dos resultados das análises	66
5.	CONCLUSÃO	67
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A identificação precoce de patologias ou a necessidade de reabilitação em estruturas de concreto armado é essencial para garantir a segurança e a integridade, tanto dos usuários como da estrutura. Da mesma forma que essas patologias se apresentam em construções antigas, estruturas que são projetadas e construídas recentemente são frequentemente acometidas com problemas estruturais.

Conforme Reis (1998), esses problemas são originados devido a erros de execução ou de projeto, uso indevido, como aplicação de sobrecargas não previstas inicialmente. Também podem ocorrer situações climáticas que não eram levadas em consideração na concepção de projetos antigos, como por exemplo o efeito de gelo e degelo que geram problemas de corrosão das armaduras.

Segundo Souto Filho (2002), o desenvolvimento de tecnologias influenciou no crescimento das cidades e evidenciou novas técnicas de construção. Essas técnicas, principalmente voltadas para a modificação das propriedades físicas e mecânicas das estruturas são denominadas reforço estrutural. Ainda segundo o autor, o reforço estrutural objetivo aumentar a capacidade dos elementos estruturais, realizando o menor número de intervenções possível.

Helene (1992) define a terapia das estruturas como responsável por pequenos reparos como também por uma recuperação generalizada das estruturas. Destaca-se que a utilização do reforço não é restrita apenas quando é identificado deterioração na edificação, do mesmo modo é utilizado quando há alteração do uso da edificação elevando a sobrecarga ou necessidade de ampliação aliado com a inviabilidade de demolição.

O método de reforço utilizando chapas metálicas, de acordo com Souza e Ripper (1998), é utilizado quando deseja-se adicionar capacidade resistente sem executar grandes mudanças geométricas na estrutura. O reforço utilizando fibras de carbono, segundo Machado (2010), absorve os esforços de tensões provenientes dos momentos fletores e por tensões de cisalhamento.

De acordo com Souto Filho (2002), com o desenvolvimento dessas tecnologias de reforço, surgiu a necessidade de estabelecer modelos matemáticos que descrevessem o comportamento do elemento estrutural antes e depois da execução do reforço estrutural.

Segundo Reis (1998), apesar do avanço dessas tecnologias e pesquisas na área, os problemas encontrados possuem divergências entre si, transformando cada caso em particular, dificultando a escolha do método e aumentando a incerteza do desempenho do material aplicado.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é promover a construção e análise de um modelo onde será realizado o estudo de vigas reforçadas mediante as técnicas de reforço citadas anteriormente, a partir de parâmetros característicos do projeto estrutural de uma edificação. Desta forma, procurar obter maior precisão e segurança para a realização das técnicas de reforço.

1.2. Justificativa

Com o desenvolvimento de pequenas cidades o perfil comercial local é alterado, e conseqüentemente ocorre a expansão urbana. Na tentativa de se adequar ao avanço, os proprietários alteram a forma de utilização das construções, alterando a combinação de cargas que a estrutura passa a resistir. Essa alteração poderá gerar esforços não estimados no dimensionamento da estrutura e acarretar na manifestações de anomalias.

Tendo em mente esse contexto, é realizado nesse trabalho um estudo de caso onde serão realizadas análises das deformações, das tensões principais e das tensões de von Mises de uma estrutura, que passou por essa mudança na combinação das cargas, e como os reforços escolhidos alteram essas propriedades.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de diferentes métodos de reforço estrutural em vigas de concreto armado, através do software ANSYS, a fim de determinar as especificidades de cada método e determinar, dentro do contexto, o método que apresentou melhores resultados.

1.3.2. Objetivos específicos

- Apresentar técnicas de reforço estrutural usualmente empregadas na construção civil e seu pré-dimensionamento.
- Analisar o comportamento entre o reforço e as tensões aplicadas.
- Obter resultados confiáveis e usuais para direcionar a escolha do método de reforço.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Concreto armado e suas manifestações patológicas

Segundo Couto et al (2013), o concreto é um material composto, constituído por cimento, agregado miúdo (areia) e graúdo (brita ou pedra), ar e água. Podendo, também, conter aditivos, com a finalidade de melhorar ou modificar algumas de suas propriedades.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento Portland, criado na Inglaterra em 1824, é um pó fino com propriedades aglomerantes, que endurecem sob ação da água. O cimento é constituído principalmente de clínquer, obtido da mistura de rocha calcária moída e argila submetida a um calor intenso seguido do resfriamento, formando pelotas.

Os agregados são materiais inertes, que constituem cerca de 70 a 80% do concreto e influenciam nas suas características (BAUER, 2000). Podem ser graúdos, cujo grãos passam pela peneira com abertura de malha de 152 mm e ficam retidos na

peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou miúdos, onde os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm (ROSSIGNOLO, E AGNESINI, 2011).

O concreto armado surgiu na Europa, no século XIX, resolvendo o problema da fraca resistência à tração do concreto. É o material mais utilizado, na atualidade, na construção das estruturas de edifícios e de grandes obras, como pontes e viadutos (BOTELHO, 2006).

De acordo com Bastos (2006), as principais vantagens do concreto armado são sua economia, a adaptabilidade de modelagem, a rapidez de construção, a resistência à compressão e choques mecânicos e a segurança contra o fogo. E as desvantagens relacionadas ao seu uso são o elevado peso próprio, a transmissão de calor e som e a difícil execução de reformas.

2.2. Sistemas de vigas de concreto armado

Segundo Rodrigues e Souza (2008), os sistemas estruturais são formados por meio da locação adequada e lógica dos diversos elementos estruturais. Esses sistemas são organizados em três grupos: os lineares, como as vigas, treliças e pilares e pórticos, os de superfície, como as lajes e tabuleiros, e os em bloco, como as fundações.

As vigas, objeto de estudo, neste trabalho, pode ser dispostas horizontalmente ou inclinadas, com um ou mais apoios (RODRIGUES E SOUZA, 2008). Os principais tipos de vigas são explicados nos tópicos a seguir.

- Balanço

Possui apoio único, que obrigatoriamente deve ser um engaste fixo, como demonstrado na figura 1.

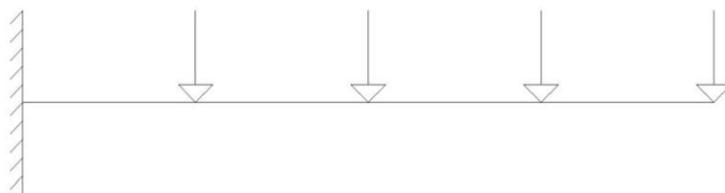


Figura 1 – Viga em balanço (Autor,2021).

- Apoiada

Viga com apoio fixo e um apoio móvel. Nomeada, também, de bi apoiada. De acordo com a figura 2.

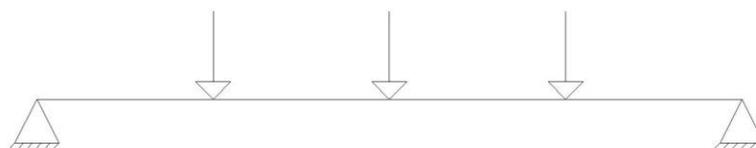


Figura 2 – Viga apoiada (Autor, 2021).

- Viga Gerber

Viga articulada e isostática, sobre mais de dois apoios. De acordo com a figura 3.

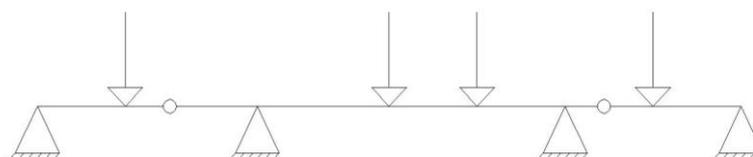


Figura 3 - Viga Geber (Autor,2021).

2.2.1. Estádios de deformação

De acordo com Bastos (2006) os estádios de deformação são os estágios de tensão que os elementos fletidos passam, desde o carregamento inicial até a ruptura.

A figura 4 demonstra o comportamento de uma viga bi apoiada submetida a um carregamento crescente.

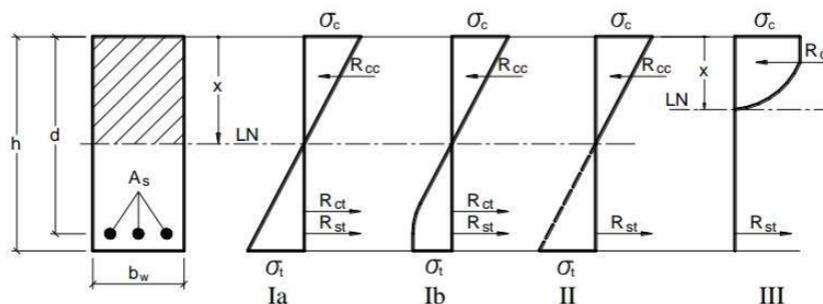


Figura 4 – Estádio de deformação (BASTOS, 2006).

Os estádios são classificados em quatro: no estágio Ia, o carregamento aplicado é pequeno, as tensões de compressão se distribuem de maneira linear e o concreto resiste à tração com diagrama triangular. No estágio Ib, as tensões de tração superam a resistência do concreto à tração, é nesse estágio que ocorre a primeira fissuração do concreto. No estágio II, as fissuras deslocam-se em direção à zona comprimida, a armadura tracionada pode superar a tensão de início de escoamento e o concreto está na iminência da ruptura. No estágio III, inicia-se a plastificação do concreto à compressão (BASTOS, 2006).

2.3. Principais manifestações patológicas

Segundo Souza e Ripper (1998), patologias das estruturas podem ser definidas como o campo da engenharia das construções que estuda a origem, as formas de manifestação, as consequências e os mecanismos de ocorrência de falhas das estruturas.

Contudo, o estudo das manifestações patológicas não deve ser limitado à identificação das anomalias, mas também aos estudos de prevenção durante a concepção e a execução do projeto.

Souza e Ripper (1998) classificam as causas responsáveis pelo surgimento dos processos de deterioração do concreto em dois grupos, as causas intrínsecas e as causas extrínsecas. As causas intrínsecas são inerentes às próprias estruturas, ou seja, tem origem nos materiais e peças estruturais durante as fases de execução ou

utilização. As causas extrínsecas são aquelas que independem da estrutura, podem ser compreendidas como agentes que afetam a estrutura.

- Fissuras por flexão

Segundo Pitelli e Marco (s/d), uma das causas para o surgimento de fissuras nas estruturas de concreto armado é a sobrecarga. Nas vigas submetidas a flexão, a fissuras aparecem, praticamente, verticais no centro do vão e inclinadas nas extremidades, na parte inferior da estrutura, como demonstrado na figura 5.

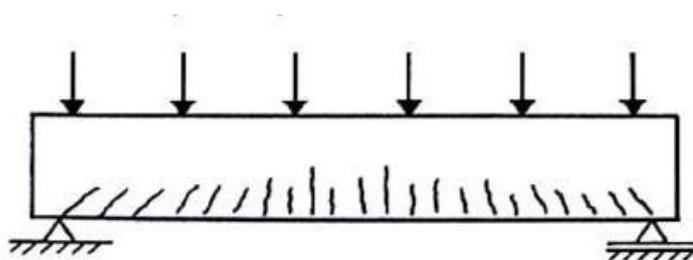


Figura 5 - Fissuras por flexão (THOMAZ, 2003).

- Fissuras por compressão

De acordo com Marcelli (2007), as fissuras por compressão são bastante preocupantes, já que o concreto é o material responsável por absorver os esforços a compressão, podem significar, quando surgem essas fissuras, que a estrutura está na iminência de ruptura. É possível observar o esquema dessas fissuras na figura 6.

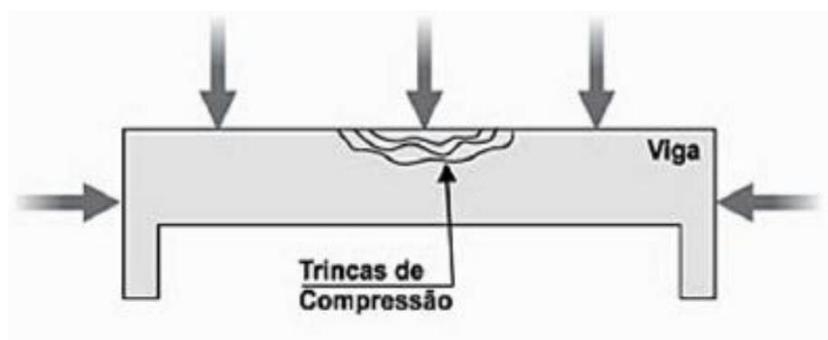


Figura 6 - Fissuras por compressão (MARCELLI, 2007).

- Corrosão da armadura

Segundo Helene (1993), o processo de corrosão, ilustrado na figura 7, é a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química ou eletroquímica.

No caso da deterioração do aço, os processos mais comuns são o de corrosão eletroquímica e o de oxidação direta. Na corrosão eletroquímica, ocorre a formação de pilhas ou células de corrosão das armaduras devido a presença de umidade, provocando a dissolução do aço nas regiões anódicas. Na oxidação direta, os átomos do aço reagem diretamente com o oxigênio, esse processo é lento à temperatura ambiente e provoca uma corrosão uniforme (HELENE, 1993).

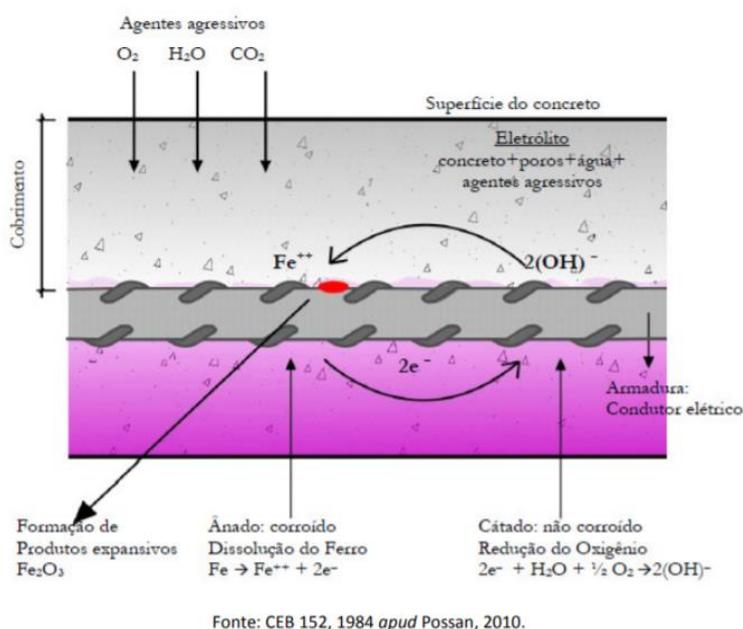


Figura 7 - Processo de corrosão da armadura (POSSAN, 2010).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a conversão do aço em ferrugem, quando íons de cloreto estão presentes, provoca um aumento no volume da armadura, sendo a principal causa para a fissuração do concreto.

2.4. Reabilitação de vigas de concreto armado

Segundo Romero (2007), podem existir diversas razões para que seja necessário realizar reforços nas estruturas de concreto. O autor ressalta alguns dos motivos, como projetos e execuções inadequadas, uso de materiais de baixa

qualidade, desgastes naturais, limitações das estruturas devido a acidentes, sobrecargas e aumento nas condições de segurança.

Silva (2006) destaca algumas causas das manifestações patológicas relacionadas à sobrecarga da estrutura. Por exemplo, os erros no dimensionamento, a utilização de concreto com f_{ck} inferior ao especificado, a utilização de aço diferente do especificado, a inexistência de controle de qualidade e o uso incorreto da estrutura, seja pela mudança de utilização o espaço ou pelo aumento de carga, devido a construção de novos pavimentos.

A reabilitação da estrutura é caracterizada em duas etapas, em recuperação e reforço. A recuperação irá eliminar a patologia identificada, restabelecendo o uso e a segurança da estrutura. Já o reforço é utilizado quando o carregamento sobre o qual a estrutura está sendo solicitada é maior que o suportado, sendo executado após a recuperação (MACHADO, 2010).

As etapas de recuperação e reforço devem prever:

- Remoção do concreto desagregado;
- Regularização do trecho a ser recomposto;
- Limpeza e correção da corrosão das barras;
- Recomposição da superfície de concreto;
- Recuperação de fissuras;
- Limpeza das impurezas;
- Limpeza e preparação da superfície e das arestas para receber o reforço;
- Execução do reforço.

Os reforços que serão objetos de estudo da modelagem proposta neste trabalho são explicados nos tópicos a seguir.

2.4.1. Reforço com chapas metálicas

De acordo com Souza e Ripper (1998), quando é necessário adicionar capacidade resistente a flexão, o reforço com chapas metálicas é uma opção muito eficiente e de rápida execução, além de não ser necessário grandes alterações na geometria das peças.

Na figura 8, é possível observar o processo de colagem, com resina epoxídica ou por chumbamento das chapas, com ajuda de resinas injetadas.

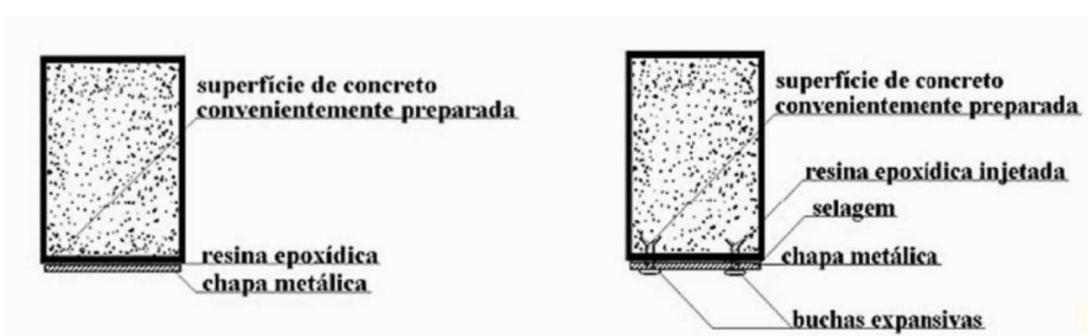


Figura 8 – Esquema de reforço com chapas metálicas (SOUZA E RIPPER, 1998).

A preparação da superfície de concreto deve ser feita para obtenção de uma superfície uniformemente rugosa, resultante do processo de jateamento com areia, a área de concreto deve ser limpa e seca para a aplicação da resina (SOUZA E RIPPER, 1998).

Da mesma forma, segundo Souza e Ripper (1998), a superfície metálica deve estar isenta de material gorduroso e ser submetida a uma decapagem com jato abrasivo para intensificar a aderência da ligação. Além disso, as superfícies que não ficarem em contato com a resina devem receber tratamento anticorrosivo.

2.4.2. Reforço com perfis metálicos

De acordo com Souza e Ripper (1998), não existem diferenças na preparação do concreto e no tratamento das superfícies metálicas, quando comparado ao sistema de chapas metálicas. A diferença é a presença de chumbadores no sistema de perfis metálicos, utilizando buchas expansivas e injeção de resina após o aperto das buchas.

2.4.3. Reforço com fibras de carbono

De acordo com Machado (2010), as fibras de carbono são resultado do tratamento térmico de fibras precursoras orgânicas como o poliacrilonitril ou com base no alcatrão derivado do petróleo e fibras de rayon, em local inerte.

A produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras e processamento à elevadas temperaturas. As fibras resultantes possuem átomos de carbono perfeitamente alinhados, conferindo ótima resistência mecânica. A instalação desse sistema de fibras de carbono, de acordo com Machado (2010), deve utilizar a sequência de procedimentos descritos a seguir:

- Recuperação da superfície de concreto: é necessário que a superfície possua resistência mecânica suficiente para que ocorra a transferência de esforços na interface dos sistemas:
 - Remoção do concreto desagregado;
 - Regularização do trecho a ser recomposto;
 - Limpeza e recuperação de armadura corroídas;
 - Recomposição do substrato de concreto.
- Recuperação de fissuras;
- Preparação da superfície para o recebimento do sistema de fibras de carbono:
 - Utilização de abrasivos ou jatos de areia para limpeza da superfície;
- Aplicação das fibras de carbono:
 - Aplicação do imprimador primário
 - Aplicação do regularizador de superfície
 - Corte e imprimação das fibras de carbono

As fibras podem ser utilizadas, segundo Machado (2010), para absorver esforços de tensão gerados pelos momentos fletores negativos e positivos ou por tensões de cisalhamento geradas por esforços cortantes. Para os reforços de tensões, as fibras de carbono podem ser colocadas conforme a figura 9.

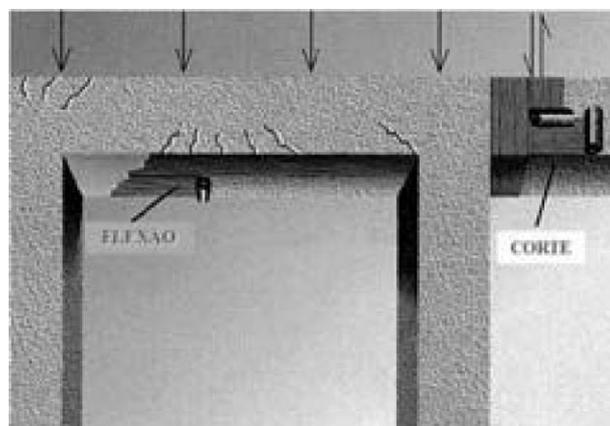


Figura 9 – Disposição das fibras de carbono (MACHADO, 2010).

2.5. RESISTÊNCIAS DO MATERIAIS

2.5.1. Módulo de Elasticidade

De acordo com Rampinelli (2018), o módulo de elasticidade ou módulo de Young representa a dificuldade de elementos submetidos a determinada força em deformar. Pode-se determinar o módulo de elasticidade pela razão entre a tensão e a deformação.

Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, maior é a rigidez do material. A determinação do módulo de Young é feita de acordo com a NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto - procedimento pelo o ensaio descrito na NBR 8522/2014: Concreto - determinação do módulo de elasticidade à compressão.

2.5.2. Coeficiente de Poisson

De acordo com Rampinelli (2018), quando submetido à compressão, elementos podem sofrer um encurtamento longitudinalmente e uma expansão transversalmente. A razão entre as deformações longitudinal e transversal é conhecida como o coeficiente de Poisson ν é definida pela equação (2.01).

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.01)$$

Para o concreto, o coeficiente de Poisson pode variar entre 0,11 e 0,26. A NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto - procedimento determina um valor usual de 0,20. O coeficiente de Poisson depende da direção e sentido da força exercida no elemento e é um importante parâmetro para definir sua deformação (RAMPINELLI, 2018).

2.5.3. Tensões principais

De acordo com Hibbeler (2010), a resistência dos materiais estuda a relação entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem em seu interior.

Considerando um material contínuo e coeso, agindo sobre uma área subdividida e pequena, ΔA , uma força típica finita, ΔF , com três componentes ΔF_x , ΔF_y e ΔF_z , tangentes e normais à área. À medida que a área, ΔA , tende a zero, a força, ΔF , também tenderá a zero, fazendo com que o quociente entre a força e a área tenda a finito. Podemos, então, definir a tensão como sendo a intensidade da força interna sobre uma área que passa por um ponto (HIBBELER, 2010).

2.5.3.1. Tensão normal

A intensidade da força, que age perpendicularmente à área ΔA , é definida, por Hibbeler (2010), como tensão normal, sigma. Como definido que ΔF_z é normal à área, então, a força é definida pela equação (2.02):

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.02)$$

2.5.3.2. Tensão de cisalhamento

Hibbeler (2010) define a tensão de cisalhamento, como a intensidade das forças por unidade de área, que agem tangente a área ΔA . Sendo as componentes da tensão de cisalhamento definidas pelas equações (2.03) e (2.04):

$$\tau_{z,x} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2.03)$$

$$\tau_{z,y} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (2.04)$$

2.5.4. Estado de tensão

Se o corpo for cortado, como exemplificado na figura 10, por planos paralelos ao plano x-z e pelo plano y-z, é possível obter um elemento cúbico do material que configura o estado de tensão que age em torno do ponto escolhido no corpo (HIBBELER, 2010).

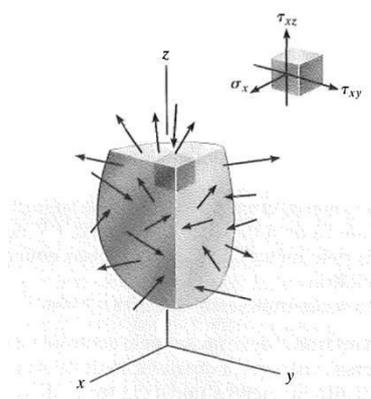


Figura 10 – Corte do corpo (HIBBELER, 2010).

Segundo Hibbeler (2010), o estado de tensões é retratado por três componentes que atuam em cada face do elemento, de acordo com o ilustrado na figura 11.

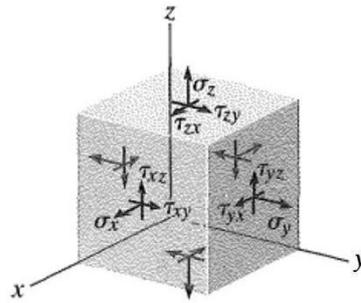


Figura 11 – Componentes atuam nas faces do elemento (HIBBELER, 2010).

2.5.5. Critério de von Mises

De acordo com Beer (2011), o critério de von Mises baseia-se no cálculo da energia de distorção de um material relacionada com as oscilações na sua forma. Conforme esse método, uma estrutura está em segurança sob a condição da energia de distorção por unidade de volume (u_d) no material seja inferior à energia de distorção por unidade de volume necessária para ocorrer o escoamento $(u_d)_Y$ em um corpo de prova do material no ensaio de tração.

Segundo Hibbeler (2010), a energia de distorção por unidade de volume de um material u_d é calculada pela equação (2.05):

$$u_d = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.05)$$

Onde:

ν , o coeficiente de Poisson;

E , o módulo de Young.

A energia de distorção por unidade de volume de um material que escoar $(u_d)_Y$ é calculado pela equação (2.06) (HIBBELER, 2010):

$$(u_d)_Y = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_Y^2 \quad (2.06)$$

Como já discutido, para que a estrutura esteja em segurança é necessário que a equação (2.07) seja atendida.

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] < 2\sigma_Y^2 \quad (2.07)$$

Uma tensão principal é nula no estado plano de tensão, logo a equação (2.07) pode ser escrita como (2.08):

$$\sigma_a^2 - \sigma_a\sigma_b + \sigma_b^2 < \sigma_Y^2 \quad (2.08)$$

Essa equação é uma função elíptica, como demonstrado na figura 12, os pontos dentro da elipse indicam que a estrutura está em segurança.

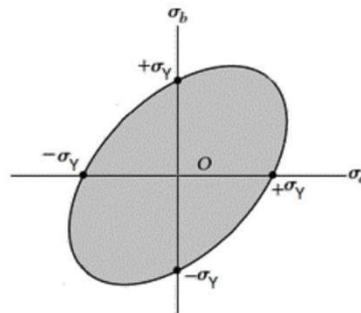


Figura 12 – Elipse do critério de von Mises (HIBBELER, 2010).

2.5.6. Deformação

De acordo com Hibbeler (2010), a mudança na forma e tamanho de um corpo quando submetido a uma força é denominada de deformação. Mas, essa deformação não é uniforme em todo o volume do corpo, podendo variar ao longo do seu comprimento.

É possível descrever a deformação por meio de mudanças no comprimento de segmentos de reta e nos ângulos entre eles. O alongamento ou tração de um segmento de reta por unidade de comprimento é denominado deformação normal. Considere uma reta AB, no interior de um corpo não deformado, com comprimento

Δs . Quando, ao corpo, é aplicado uma força que o deforma, os pontos A e B são deslocados para A' e B', com comprimento $\Delta s'$. Logo, a deformação normal média será definida pela equação (2.09), de acordo com Hibbeler (2010).

$$\varepsilon_{méd} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (2.09)$$

De acordo com Hibbeler (2010), o sinal da deformação indica se o corpo irá se expandir, caso sinal positivo, ou se contrair, caso sinal negativo.

2.5.7. Método dos elementos finitos

De acordo com Souta Filho (2002), o método dos elementos finitos supõe a divisão do domínio, alterando o meio contínuo em discreto. Essa alteração é feita dividindo a área em pedaços menores, que são chamados de elementos finitos, como ilustrado na figura 13.

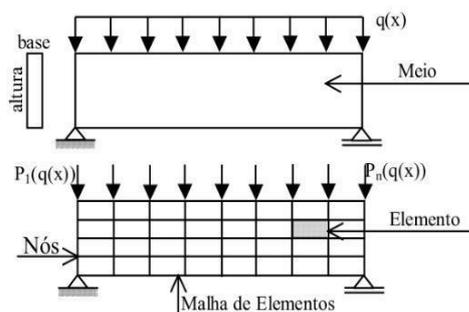


Figura 13 – Divisão da área em elementos menores (SOUTA FILHO, 2002).

A divisão do meio original é chamada de malha de elementos finitos, definindo a precisão e aproximação do resultado com o real. As interseções da malha são chamadas de nós. Para cada elemento da malha existe uma função que descreve o comportamento e a forma do elemento, o primeiro parâmetro de acordo com o que se analisa é o segundo de acordo com os nós (SOUTA FILHO, 2002).

A formação da malha é denominada discretização, compreende a subdivisão dos objetos. A quantidade, forma, tamanho e posição dos elementos pode ser definida

por softwares. Os nós sempre estarão localizados nas extremidades das arestas dos elementos (AZEVEDO, 2015).

As principais vantagens, de acordo com Azevedo (2015), do método dos elementos finitos são:

- A geometria não é uma limitação;
- Diferentes componentes, mesmo com propriedades físicas diferentes, podem ser associados e analisados, considerando o comportamento na área de contato;
- Diminuição dos custos do estudo;
- Os resultados podem ser obtidos rapidamente e com uma boa aproximação do método analítico, com a utilização de softwares.

2.5.8. Análise não-linear

De acordo com Crisfield (1991), o concreto armado apresenta uma relação construtiva não-linear entre as tensões e as deformações, fazendo-se necessário a implementação de uma solução incremental e iterativa.

Segundo Souta Filho (2002), dois pontos são fundamentais nas análises de estruturas de concreto armado:

- Um modelo capaz de descrever as não-linearidades do concreto e do aço;
- Um método eficiente para a solução incremental e iterativa das equações de equilíbrio.

2.5.9. Análise estrutural estática

De acordo com Azevedo (2015), a análise estrutural estática determina deslocamentos, tensões, deformações específicas e forças nas estruturas causadas

por cargas que não produzem efeitos significativos de inércia e amortecimento. Os carregamentos que podem ser aplicados na análise estrutural estática são forças e pressões externas, forças inerciais estáticas, imposições de deslocamentos e cargas que são repetidamente citadas, criando ciclos e causando fadiga.

2.5.10. Etapas do método dos elementos finitos

Segundo Azevedo (2015), a análise pelo método dos elementos finitos se divide em três etapas, listadas a seguir.

- Pré-processamento: deve-se definir a geometria, o tipo de análise, a malha, propriedades dos materiais e condições de contorno.
- Processamento: deve-se configurar a análise, definindo as equações, para obter os deslocamentos nodais.
- Pós-processamento: obtenção de resultados, dependendo da análise realizada.

2.6. ANSYS Workbench

Nas versões mais recentes, de acordo com Azevedo (2015), existem mais de vinte possibilidades de simulação. Na primeira célula de trabalho a geometria que será analisada é desenhada ou importada, de outro software compatível, além dos detalhes da análise. O ANSYS Workbench automaticamente transfere dados entre as células. A interface do software permite o gerenciamento organizado das análises.

Segundo Azevedo (2015), algumas informações, listadas a seguir, são importantes para compreender a interface do software.

- As condições de contorno são definidas, em “Outline”, a partir das ferramentas da barra de contexto e da área de detalhes;
- O usuário consegue configurar as análises a partir da área de detalhes, em “Analysis Settings”;
- As definições de soluções devem ser inseridas em “Outline”;

- “Solution Information” resume as informações relacionadas às soluções, como utilização de hardware e configurações que foram utilizadas;
- Ao iniciar o ambiente é atribuído aço estrutural automaticamente como material das peças, caso seja necessário alterar, deve-se adicionar o material na janela de projeto.

As propriedades dos materiais definem como as estruturas irão se comportar durante a simulação. O ANSYS Workbench possui uma extensa biblioteca de materiais e permite a modificação das propriedades e o acréscimo de novos materiais (AZEVEDO, 2015).

2.7. Eberick

De acordo com a Alto Qi, o Eberick é destinado ao projeto de edificações de concreto armado e permite a análise da estrutura a partir de um modelo de pórtico espacial. O lançamento é feito na sobre a planta arquitetônica, gerando um modelo gráfico em 3D e resultados são fornecidos em forma de planilhas.

O programa possui um conjunto de configurações que oferecem facilidade na análise, dimensionamento e detalhamento da estrutura. Através dessas configurações é possível definir as propriedades dos materiais, os coeficientes de ponderação das cargas e as combinações últimas e de serviço, mesmo para cargas criadas pelo usuário.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os processos que foram utilizados para o desenvolvimento do modelo de previsão.

3.1. Estrutura analisada

A estrutura analisada, neste trabalho, possui dois pavimentos e organização ilustrada na figura 14, extraída do software Eberick.



Figura 14 - Estrutura analisada (AUTOR, 2021).

A mudança no uso da edificação de residencial para comercial, altera as cargas aplicadas na estrutura analisada. Neste trabalho, as cargas foram definidas de acordo com a NBR 6120/1980: cargas para cálculo de estruturas de edificações. O cálculo dos carregamentos incidentes sobre a estrutura foi efetuado com o auxílio do software Eberick. As cargas aplicadas na estrutura podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cargas aplicadas na estrutura analisada (AUTOR, 2021).

Peso próprio	1,10 kN/m
Carregamento da alvenaria	1,83 kN/m
Combinação do peso próprio da laje e revestimento	9,34 kN/m
Carga acidental	9,15 kN/m
Combinação mínima de cargas	12,28 kN/m
Combinação máxima de cargas	21,44 kN/m

A viga escolhida para análise foi a viga engastada denominada L4 entre os pilares P10 e P11, como ilustrada na figura 15.

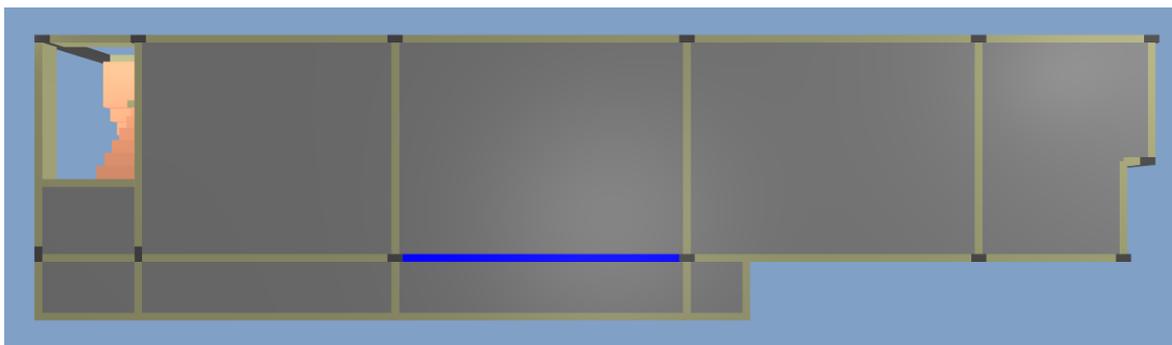


Figura 15 – Viga escolhida para análise (AUTOR, 2021).

A carga distribuída utilizada na viga escolhida é de 25,44kN/m, que é a combinação máxima das cargas aplicadas na estrutura. Seguindo o roteiro de dimensionamento da figura 16 temos:

$$M_d = \frac{21,44 \times (5,7)^2}{8} = 87,07 \text{ kN.m} \quad (1)$$

$$\sigma_{sd} = 0,85 \times \frac{25 \times 10^6}{1,4} = 15,76 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$K_{md} = \frac{87,07 \times 10^3}{0,15 \times 0,3^2 \times 15,76 \times 10^6} = 0,4251 \quad (3)$$

$$K_x = \frac{[1 - (1 - 2 \times 0,4251)^{1/2}]}{0,8} = 0,76 \quad (4)$$

Logo, como $K_x > 0,45$, a viga está no domínio 3, sem ductilidade, ou domínio 4, sendo assim necessária a aplicação de reforço para garantir o desempenho da estrutura em sua nova função.

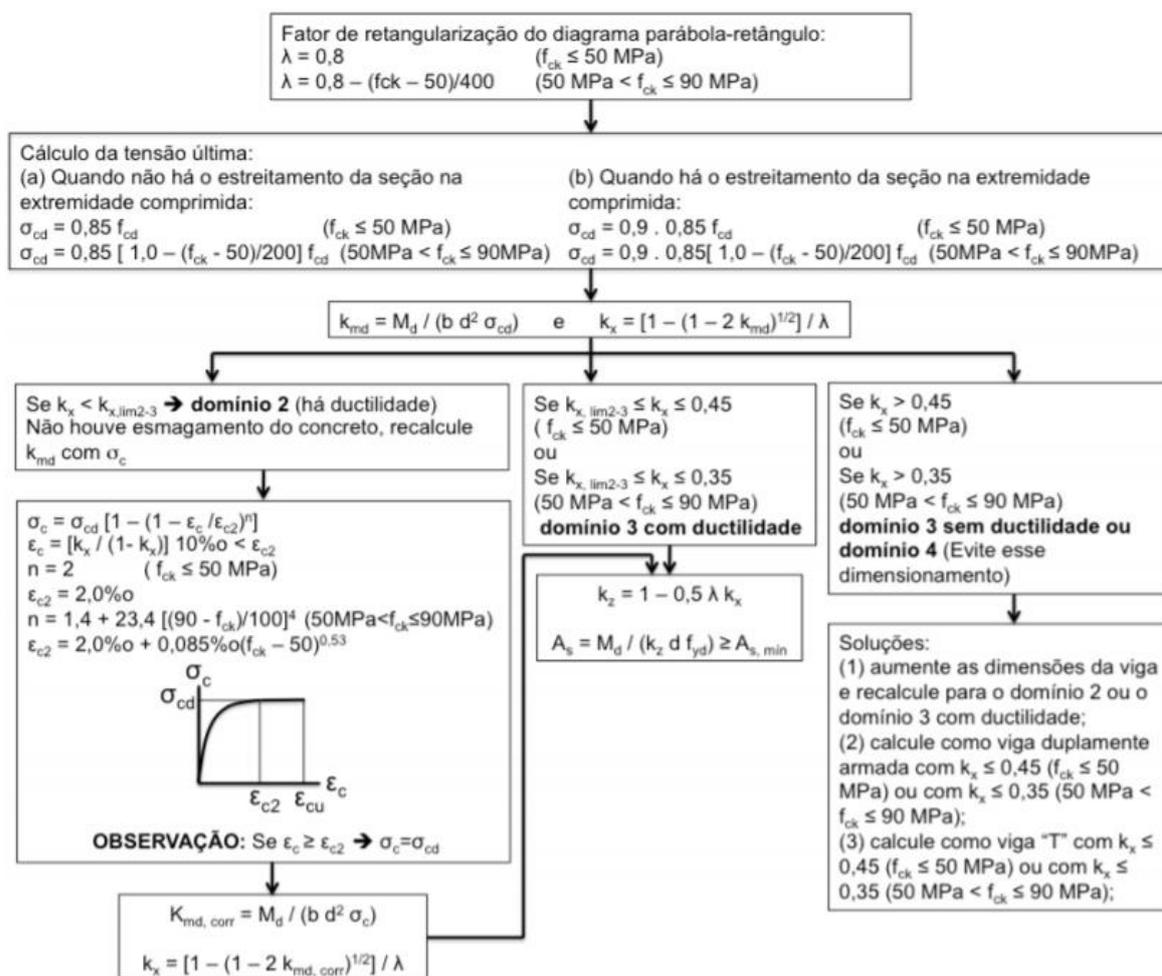


Figura 16 - Roteiro de dimensionamento (SILVA, 2017).

3.2. Definição da análise

A geometria a ser analisada, por meio do método dos elementos finitos, neste trabalho, é o sistema de viga engastada, desenhada no próprio software ANSYS. Devido sua forma geométrica simples não foi necessário a importação do desenho de um software compatível.

A geometria utilizada neste trabalho pode ser observada na figura 17, com seção transversal de 15 x 30 centímetros e um vão de 5,70 metros.

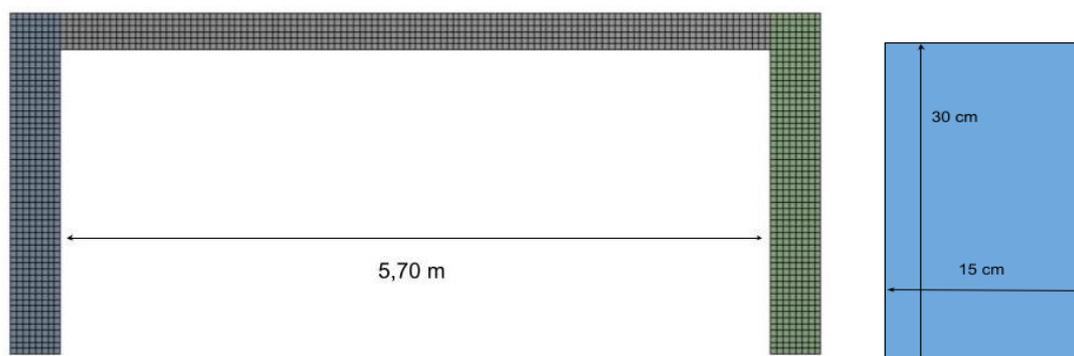


Figura 17 – Geometria da viga analisada (AUTOR, 2021).

A malha de elementos finitos foi definida com elementos quadrados com 50 milímetros de tamanho. O tipo de malha é escolhido dentre as opções pré-definidas pelo software. Neste trabalho, foi escolhida a malha quadrada.

A definição dos materiais das peças é importante devido a diferença de comportamento dos materiais nas diferentes situações (AZEVEDO, 2015). Neste trabalho, para a determinação do comportamento da viga, foi adicionado à biblioteca do ANSYS o material Concreto Armado, além dos diferentes materiais usados no reforço das vigas, como a fibra de carbono e as chapas e perfis metálicos. Pode-se observar as propriedades desses materiais na Tabela 2. Os valores dessas propriedades foram estabelecidos de acordo com a biblioteca ANSYS.

Tabela 2 – Propriedades do concreto armado, da fibra de carbono, dos perfis e chapas metálicas (BIBLIOTECA ANSYS, 2021).

Propriedades	Concreto armado	Fibra de carbono	Chapas e perfis metálicos
Densidade	2500,00 kg/m ³	1900,00 kg/m ³	7850,00 kg/m ³
Módulo de Young	250 GPa	220 GPa	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,18	0,25	0,30
Coefficiente de dilatação térmica	1,4x10 ⁻⁵ 1/°C	-10 ⁶ 1/°C a 0°C	1,2x10 ⁻⁵ 1/°C
Tensão máxima à compressão	25000 kPa	-	-
Tensão máxima à tração	300 kPa	3790 a 6200	460 MPa
Condutividade térmica	0,72 W/m.°C	0,7 W/m.°C	60,5 W/m.°C
Calor específico	780 J/kg.°C	780 J/kg.°C	434 J/kg.°C

Foram analisados sete tipos de simulações, a estrutura sem reforço e a estrutura com reforço em três diferentes tipos de perfis metálicos, com chapas metálicas e com fibras de carbono. Para complementar a análise da interação dos reforços com a estrutura foram analisados dois casos, com o reforço de chapas

metálicas e o reforço com fibras de carbono, na situação de viga bi apoiada. O resumo das simulações realizadas neste trabalho esta disposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo das simulações analisadas neste trabalho (AUTOR, 2021).

Simulação	Reforço estrutural	Tipo de apoio
1	Sem reforço estrutural	Engastado
2	Com perfil metálico em T	Engastado
3	Com perfil metálico em I	Engastado
4	Com perfil metálico em U	Engastado
5	Com chapas metálicas	Engastado
6	Com fibras de carbono	Engastado
7	Com chapas metálicas	Bi apoiada
8	Com fibras de carbono	Bi apoiada

3.2.1. Dimensões do perfil metálico T

O perfil T é produzido em aço ASTM A36 de acordo com a NBR 7007/2016: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural. É empregado em vigas, lajes, estruturas de painéis, além de uma infinidade de outras aplicações. O perfil, com comprimento de 6 metros, pode ser observado na figura 18.

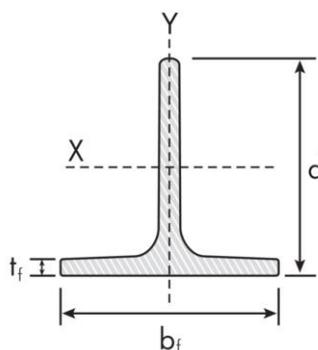


Figura 18 – Perfil T (GERDAU, 2020)

Neste trabalho, será analisado o comportamento do perfil com bitola de 2 x 1/4" e dimensões de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões do perfil em T (GERDAU, 2020).

Mesa ($b_f = d$)	50,80 mm		
Espessura (t_f)	6,35 mm		
Peso Nominal	4,74 kg/m		
Área	6,05 cm ²		
Altura da Linha neutra (x)	1,50 cm		
Eixo X	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)
	14,47 cm ⁴	4,04 cm ³	1,55 cm

Eixo Y	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)
	7,03 cm ⁴	2,77 cm ³	1,08 cm

3.2.2. Dimensões do perfil metálico I

De acordo com a Gerdau, o perfil metálico I é ideal para aplicações que exijam maior resistência, gerando um perfil mais robusto. Produzido em aço ASTM A36 de acordo com a NBR 7007/2016: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural. O perfil, com comprimento de 6,00 metros pode ser observado na figura 19.

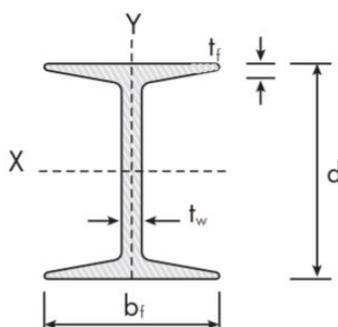


Figura 19 -Perfil I (GERDAU, 2020).

Neste trabalho, será analisado o comportamento do perfil com bitola de 5" e dimensões de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões do perfil em I (GERDAU, 2020).

Alma	d	127 mm	
Espessura (t_f)	t_w	5,44 mm	
Aba	b_f	76,30 mm	
Área	t_f	8,28 mm	
Alma	d	127 mm	
Peso Nominal		14,88 kg/m	
Área		18,80 cm ²	
Raio de concordância r_t		1,88 cm	
Eixo X	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)
	511 cm ⁴	80,40 cm ³	5,21 cm
Eixo Y	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)
	50,20 cm ⁴	13,20 cm ³	1,63 cm

3.2.3. Dimensões do perfil metálico U

De acordo com a Gerdau, o perfil metálico U é ideal para aplicações que exijam maior resistência, gerando um perfil mais robusto. Produzido em aço ASTM A36 de acordo com a NBR 7007/2016: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural. O perfil, com comprimento de 6,00 metros, pode ser observado na figura 20.

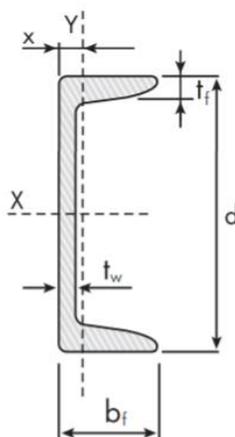


Figura 20 - Perfil U (GERDAU, 2020).

Neste trabalho, será analisado o comportamento do perfil com bitola de 6" e dimensões de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões do perfil em U (GERDAU, 2020).

Alma	d	152,40 mm		
	t_w	5,08 mm		
Aba	b_f	48,77 mm		
	t_f	8,71 mm		
Peso Nominal		12,20 kg/m		
Área		15,50 cm ²		
Altura da Linha neutra (x)		1,50 cm		
Eixo X	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)	
	546 cm ⁴	71,70 cm ³	5,94 cm	
Eixo Y	Momento de Inércia (I)	Módulo de Resistência Elástica (W)	Raio de giração (r)	
	28,80 cm ⁴	8,16 cm ³	1,36 cm	

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise da estrutura sem reforços

Para análise da deformação sofrida pela estrutura, serão utilizados os valores em módulo da deformação. Foi identificada uma deformação máxima em módulo, no centro da viga, de 0,719 centímetros e uma deformação mínima em módulo, na extremidades, de $2,81 \times 10^{-5}$ centímetros. A deformação prevista pelo ANSYS pode ser observada na figura 21.

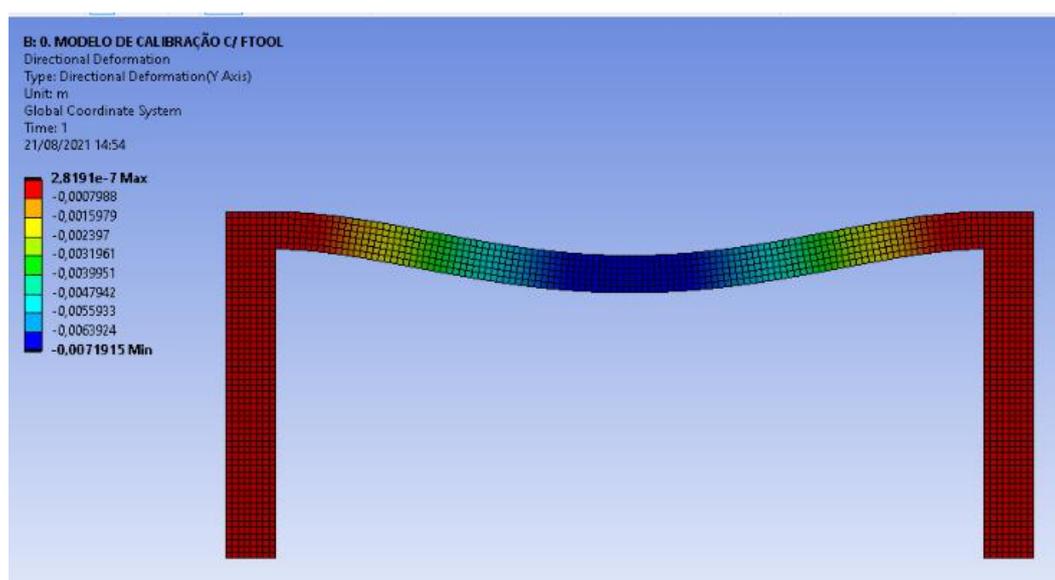


Figura 21 – Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

As tensões principais são utilizadas para calcular as tensões de von Mises e seu critério de ruptura. O ANSYS também calcula as tensões principais máximas, ilustradas na figura 22, onde os valores máximos ocorrem no centro da viga, na face inferior, e nas extremidades, na face superior.

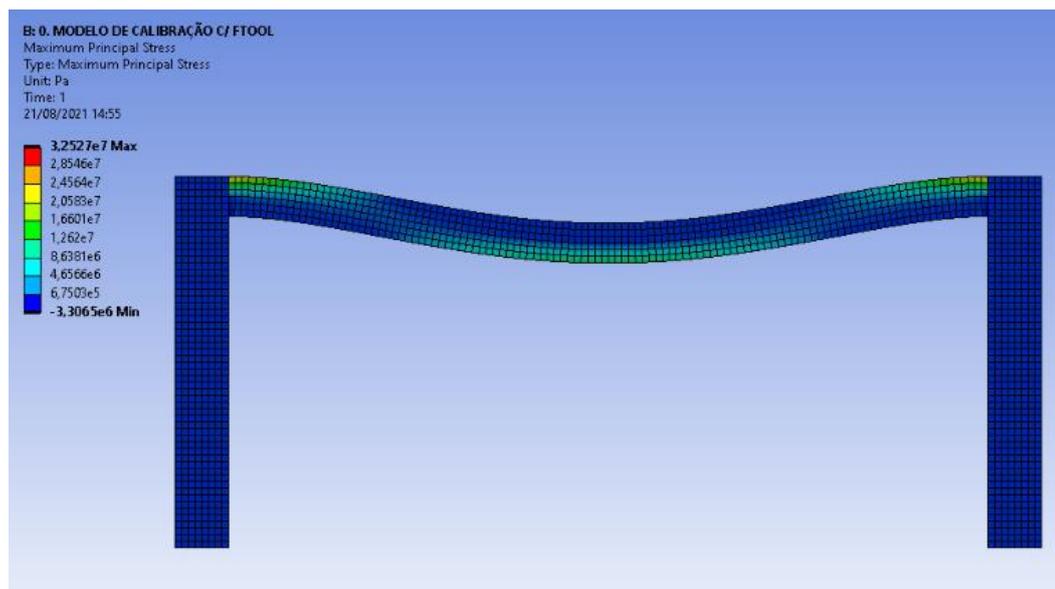


Figura 22 - Distribuição das tensões principais máximas na estrutura (AUTOR, 2021).

A figura 23 ilustra a distribuição das tensões principais mínimas, seu máximo valor ocorre no centro da viga na face inferior e nas extremidades da viga, na face superior.

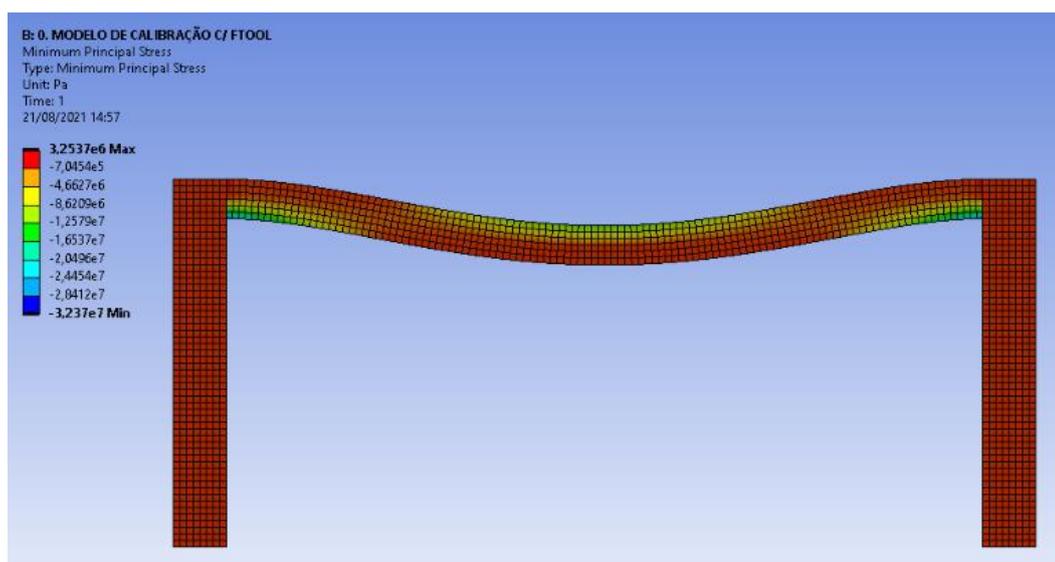


Figura 23 – Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 7 é possível observar os valores máximos, mínimos e médios da tensão principal máxima.

Tabela 7 – Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
---------------	--------------	---------------

$3,25 \times 10^7$ Pa	$1,32 \times 10^6$ Pa	$-3,30 \times 10^6$ Pa
-----------------------	-----------------------	------------------------

Na Tabela 8 são descritos os valores de tensão máximo, mínimo e médio da tensão principal mínima.

Tabela 8 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$3,25 \times 10^6$ Pa	$-1,34 \times 10^6$ Pa	$-3,23 \times 10^7$ Pa

Como já explicado, as tensões de von Mises são encontradas a partir das tensões principais e devem ser menores que a tensão de escoamento do material, para que não ocorra falha na estrutura, é possível observar na figura 24 a distribuição dessas tensões.

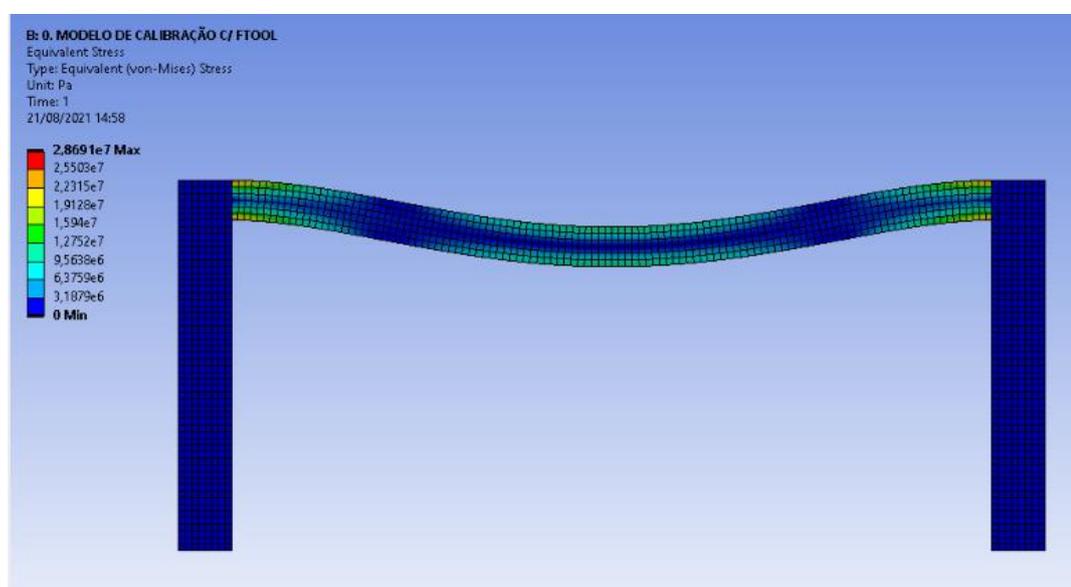


Figura 24 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 9 é possível observar os valores de máximo, mínimo e médio das tensões de von Mises, calculados pelo software de acordo com a situação analisada.

Tabela 9 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$2,85 \times 10^7$ Pa	$2,61 \times 10^6$ Pa	0 Pa

4.2. Análise da estrutura com reforço com perfil metálico T

A deformação calculada pelo ANSYS, pode ser observada na figura 25. A deformação máxima em módulo é de 0,534 centímetros, no centro da viga, e a deformação mínima em módulo é de $2,52 \times 10^{-5}$ centímetros. Quando a viga é reforçada com os perfis metálicos T é possível observar uma diminuição de 0,185 centímetros na deformação que acomete o centro da viga.

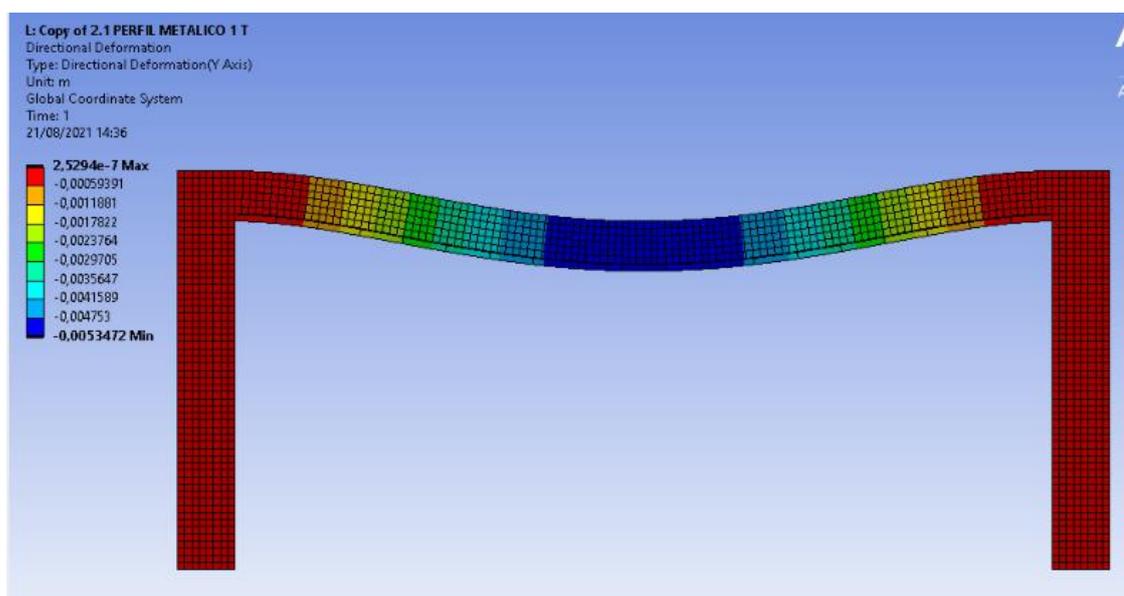


Figura 25 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

As tensões principais são utilizadas para calcular as tensões de von Mises e seu critério de ruptura. O ANSYS também calcula as tensões principais máximas, ilustradas na figura 26. A tensão principal máxima acontece no centro da viga, em sua face inferior.

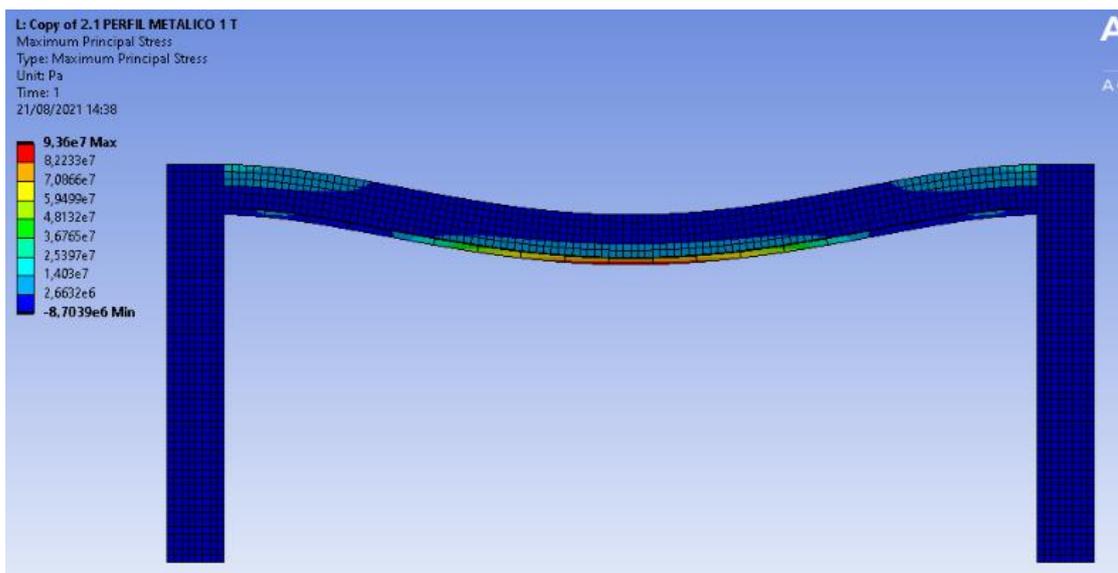


Figura 26 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).

A figura 27 ilustra a distribuição das tensões principais mínimas, seu máximo valor ocorre no centro da viga e nas extremidades na face superior.

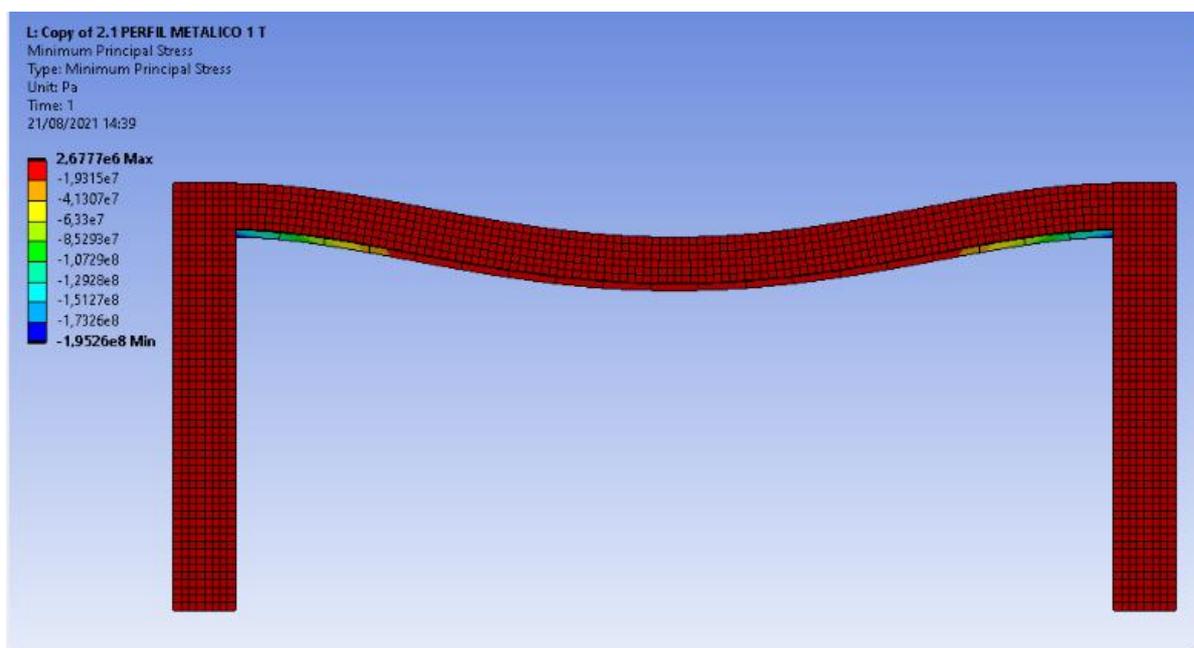


Figura 27 – Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 10 são descritos os valores de tensão máximo, mínimo e médio da tensão principal mínima.

Tabela 10 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$9,36 \times 10^7$ Pa	$1,56 \times 10^6$ Pa	$-8,70 \times 10^6$ Pa

Na Tabela 11 são descritos os valores de tensão máximo, mínimo e médio da tensão principal mínima.

Tabela 11 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$2,67 \times 10^6$ Pa	$1,71 \times 10^6$ Pa	$-1,95 \times 10^8$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas a partir das tensões principais máxima e mínima e são determinadas durante a modelagem pelo software ANSYS. Na figura 28 é observado a distribuição das tensões de von Mises na estrutura.

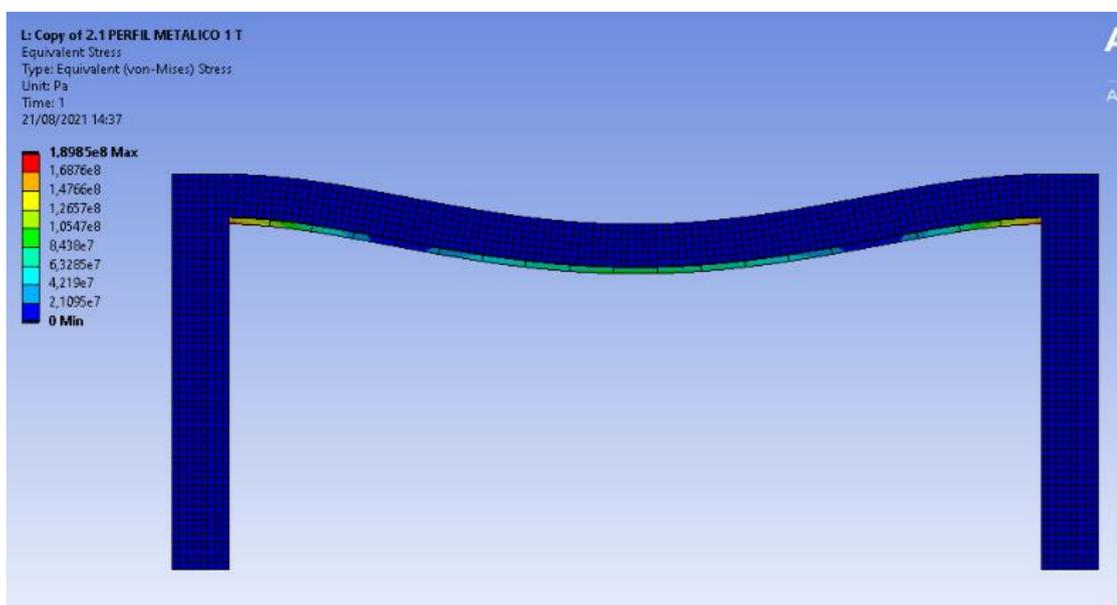


Figura 28 - Distribuição das tensões de von Mises (AUTOR, 2021).

Na Tabela 12 é possível observar os valores de máximo, mínimo e médio das tensões de von Mises.

Tabela 12 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,89 \times 10^8$ Pa	$3,20 \times 10^6$ Pa	0 Pa

4.3. Análise da estrutura com reforço com perfil metálico I

A deformação máxima em módulo, que ocorre no centro da viga, neste caso, é de 0,253 centímetros e a deformação mínima em módulo, que ocorre nas extremidades da viga, é de $4,41 \times 10^{-5}$ centímetros. A deformação calculada pelo software pode ser observada na figura 29. Comparando com a estrutura sem reforço, houve uma diminuição de 0,466 centímetros na deformação que acomete o centro da viga.

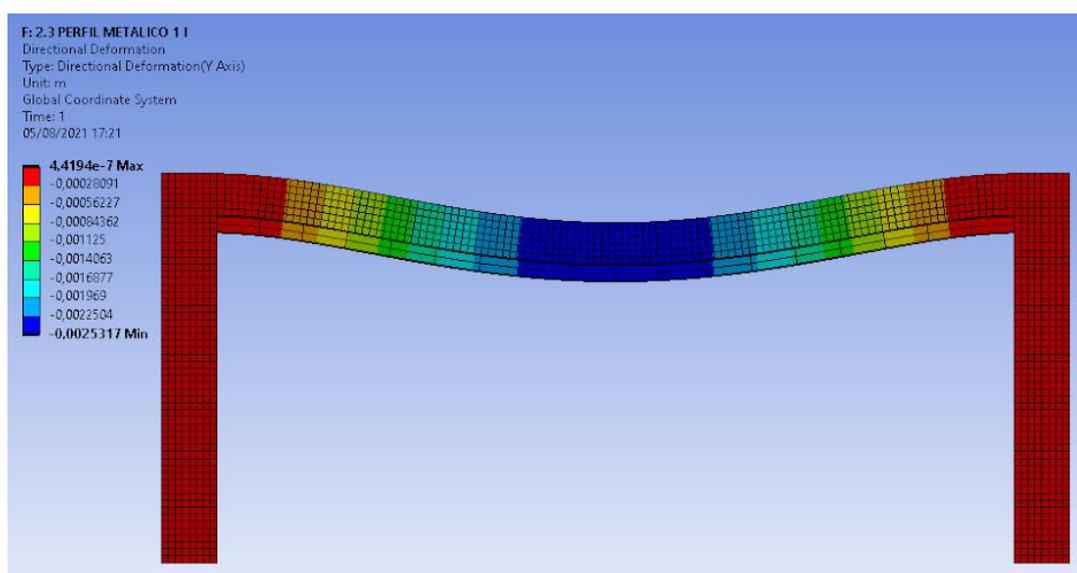


Figura 29 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

O software calcula, ainda, as tensões principais da estrutura. Na figura 30 é possível observar as tensões principais máximas, ao longo da estrutura, com valores máximos ocorrendo no centro da viga, na face inferior.

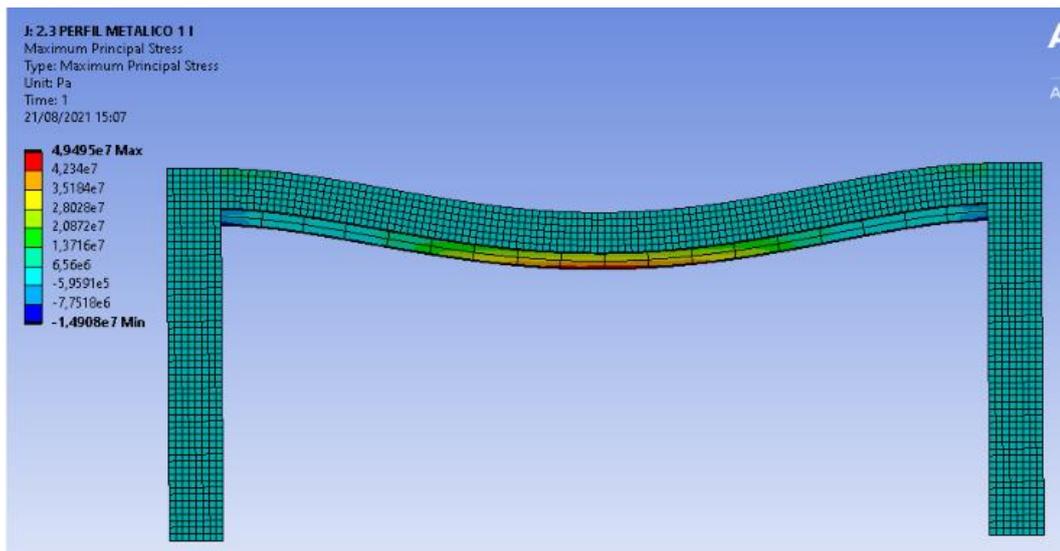


Figura 30 - Distribuição das tensões principais máximas na estrutura (AUTOR, 2021).

A figura 31 ilustra a distribuição das tensões principais mínimas, seu máximo valor ocorre no centro da viga na face inferior e nas extremidades na face superior.

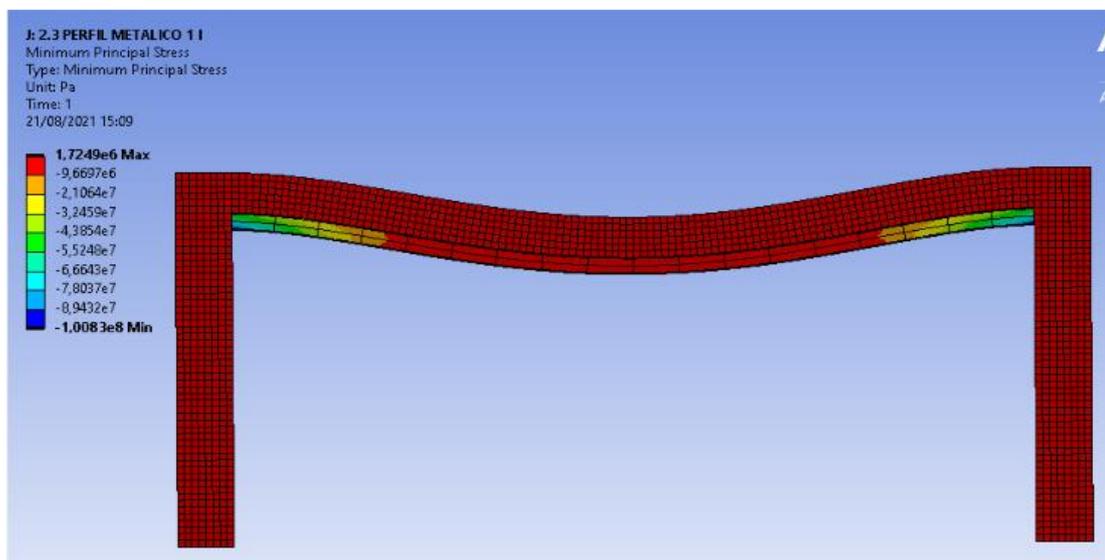


Figura 31 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 13 é apresentado os valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima, calculadas pelo software, de acordo com o reforço em perfil metálico I.

Tabela 13 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
---------------	--------------	---------------

$4,94 \times 10^7$ Pa	$1,09 \times 10^6$ Pa	$-1,49 \times 10^7$ Pa
-----------------------	-----------------------	------------------------

Na Tabela 14 é possível observar os valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima, calculado pelo ANSYS.

Tabela 14 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,72 \times 10^6$ Pa	$1,24 \times 10^6$ Pa	$-1,00 \times 10^8$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas a partir das tensões principais máximas e mínimas, de acordo com a situação da estrutura, e são determinadas pelo software durante a simulação, a distribuição é apresentada na figura 32.

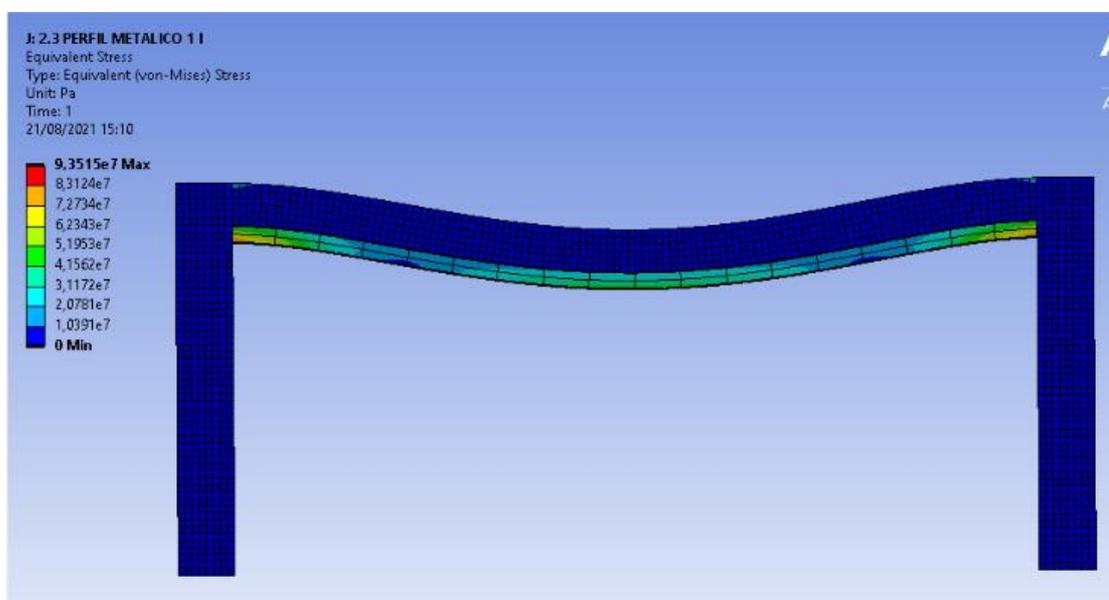


Figura 32 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 15 são dispostos os valores de máximo, mínimo e média das tensões de von Mises.

Tabela 15 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$9,35 \times 10^7$ Pa	$2,26 \times 10^6$ Pa	0 Pa

4.4. Análise da estrutura com reforço com perfil metálico U

A deformação calculada pelo ANSYS pode ser observada na figura 33. Os valores de deformação em módulo são de uma deformação máxima, no centro da viga, de 0,348 centímetros e uma deformação mínima, nas extremidades engastadas, de $2,21 \times 10^{-5}$ centímetros. Quando comparado com a estrutura sem reforços observamos uma diminuição na deformação no centro da viga de 0,371 centímetros.

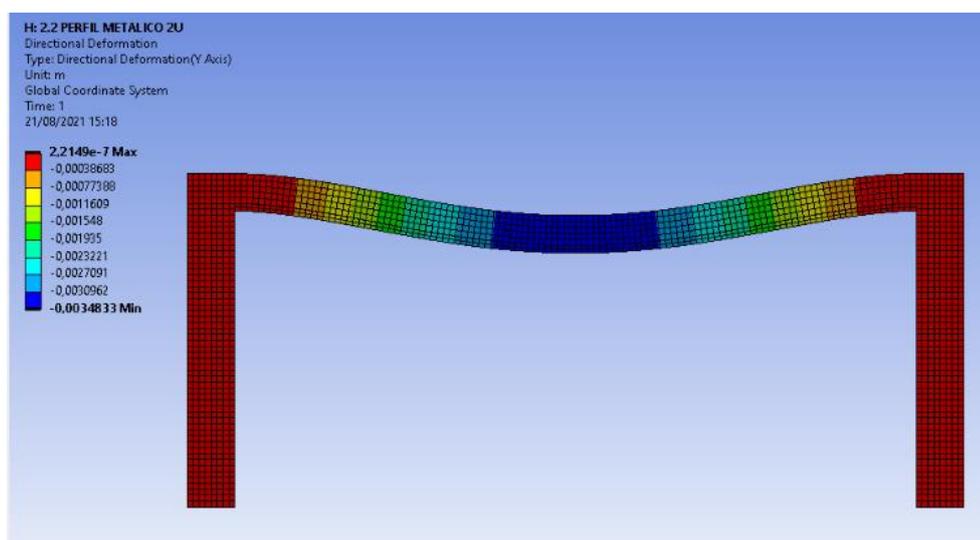


Figura 33 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

O software ANSYS calcula as tensões principais máxima, ilustradas na figura 34, com valores máximos ocorrendo no centro da viga, na face inferior.

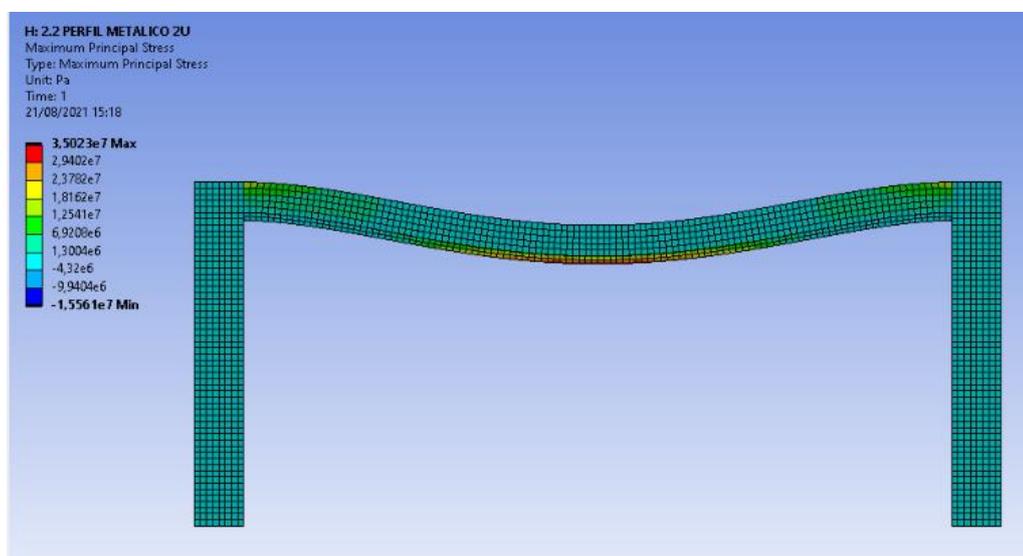


Figura 34 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).

A figura 35 ilustra a distribuição das tensões principais mínimas, seu máximo valor ocorre no centro da viga na face inferior e nas extremidades na face superior.

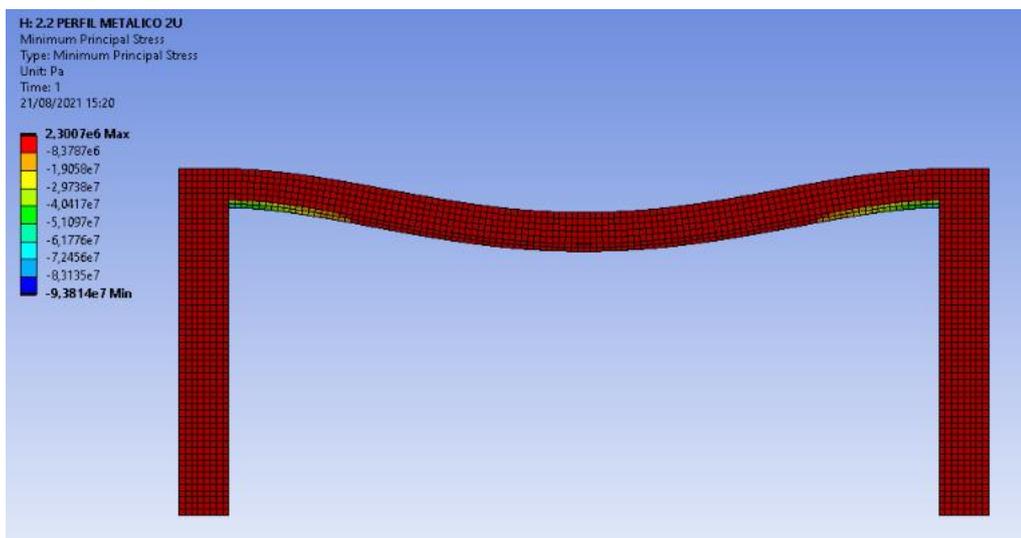


Figura 35 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 16, são apresentados os valores máximo, mínimo e médio da tensão principal máxima.

Tabela 16 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$3,50 \times 10^7$ Pa	$2,42 \times 10^6$ Pa	$-1,55 \times 10^7$ Pa

Na Tabela 17, estão apresentados os valores de máximo, mínimo e médio da tensão principal mínima ao longo da estrutura.

Tabela 17 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$2,30 \times 10^6$ Pa	$-2,52 \times 10^6$ Pa	$-9,38 \times 10^7$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas pelo ANSYS a partir das tensões principais, sua distribuição na estrutura pode ser observada na figura 36.

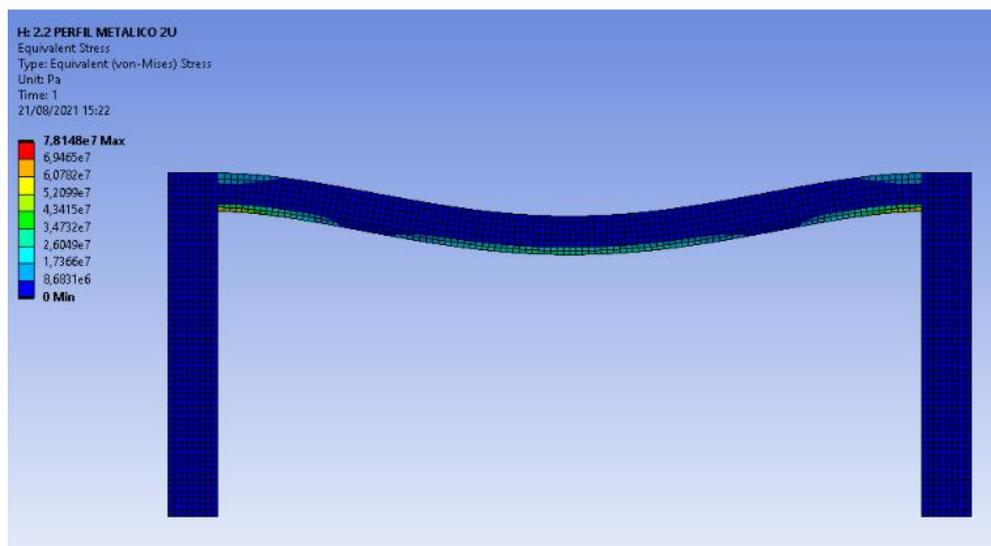


Figura 36 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 18 é possível observar os valores da tensão de von Mises, para esta situação.

Tabela 18 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
7,81 x 10 ⁷ Pa	4,85 x 10 ⁶ Pa	0 Pa

4.5. Análise da estrutura com reforço de chapa metálicas

Neste caso, a deformação máxima em módulo, no centro da viga, é de 0,656 centímetros e a deformação mínima em módulo, nas extremidades da viga, é de $3,97 \times 10^{-3}$ centímetros. A deformação calculada pelo software pode ser observada na figura 37. Quando comparada com a estrutura sem reforço é observado uma diminuição na deformação que acomete o centro da viga de 0,063 centímetros.

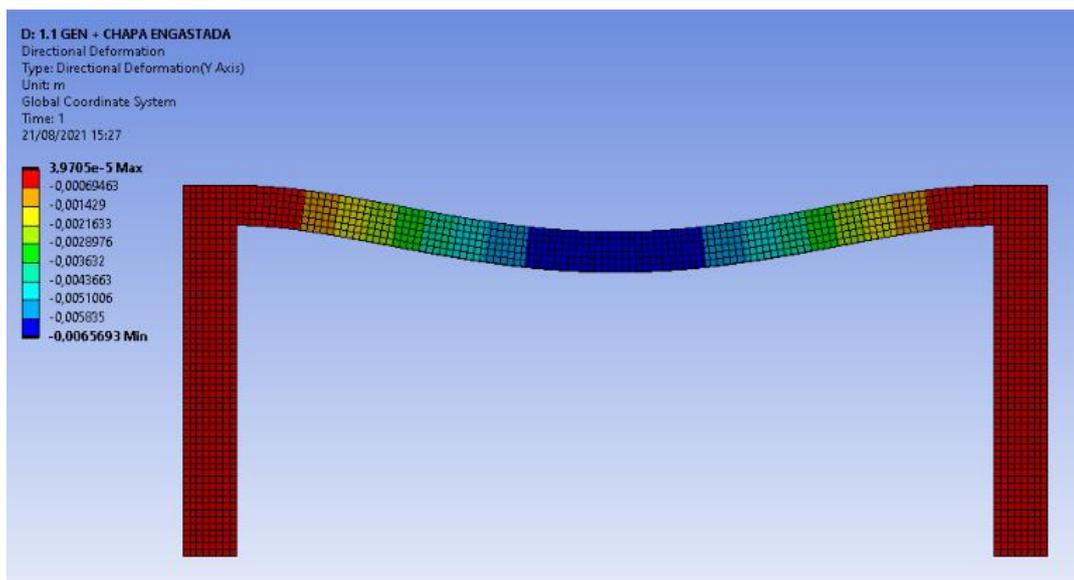


Figura 37 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

O software ANSYS calcula as tensões principais máximas ilustradas nas figuras 38 e 39. Essa última representando a distribuição das tensões principais máximas e mínimas, respectivamente, na face inferior da viga.

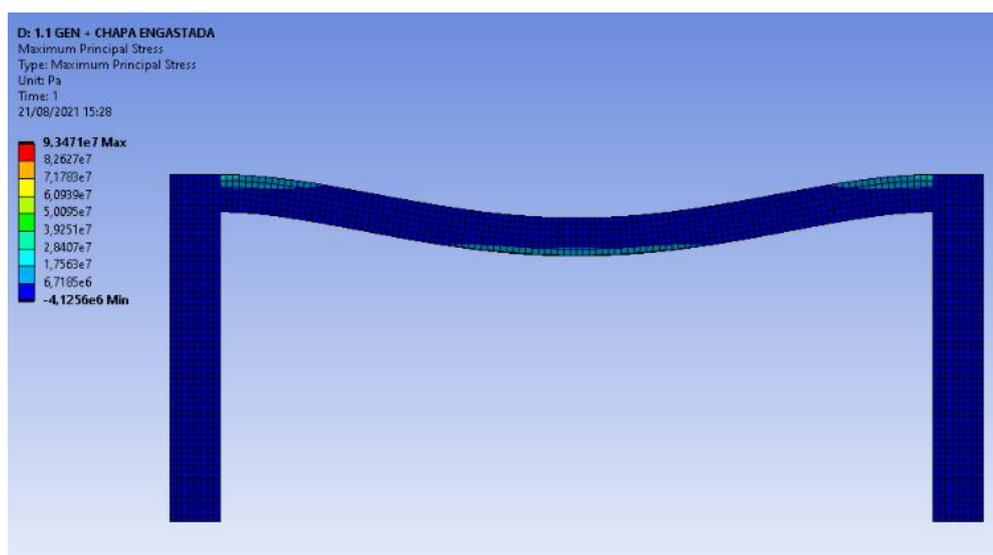


Figura 38 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).

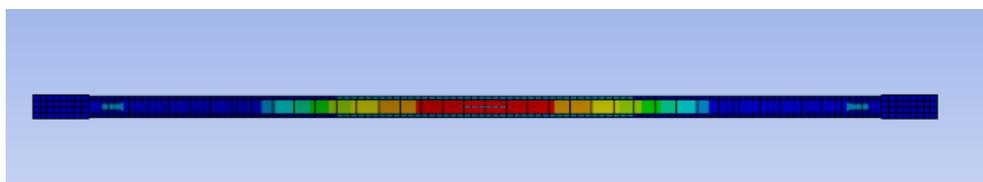


Figura 39 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 19, são representados os valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima.

Tabela 19 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$9,34 \times 10^7$ Pa	$1,57 \times 10^6$ Pa	$-4,12 \times 10^6$ Pa

Nas figuras 40 e 41, é apresentada a distribuição das tensões principais mínimas na estrutura. Com valores máximos no centro da viga, na face inferior.

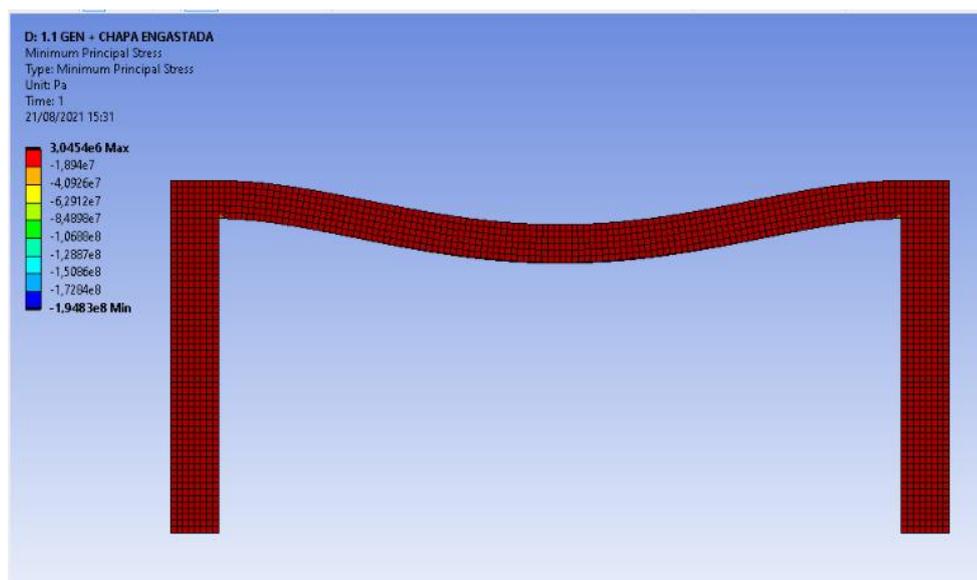


Figura 40 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 41 - Distribuição das tensões principais mínimas na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 20, estão dispostos os valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima.

Tabela 20 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$3,04 \times 10^6$ Pa	$-1,64 \times 10^6$ Pa	$-1,94 \times 10^8$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas a partir das tensões principais máximas e mínimas e são determinadas pelo próprio software de modelagem. A distribuição ao longo da estrutura analisada das tensões de von Mises pode ser visualizada na figura 42. A figura 43 representa a distribuição na face inferior das tensões principais mínimas, indicando que os valores máximos ocorrem nas extremidades.

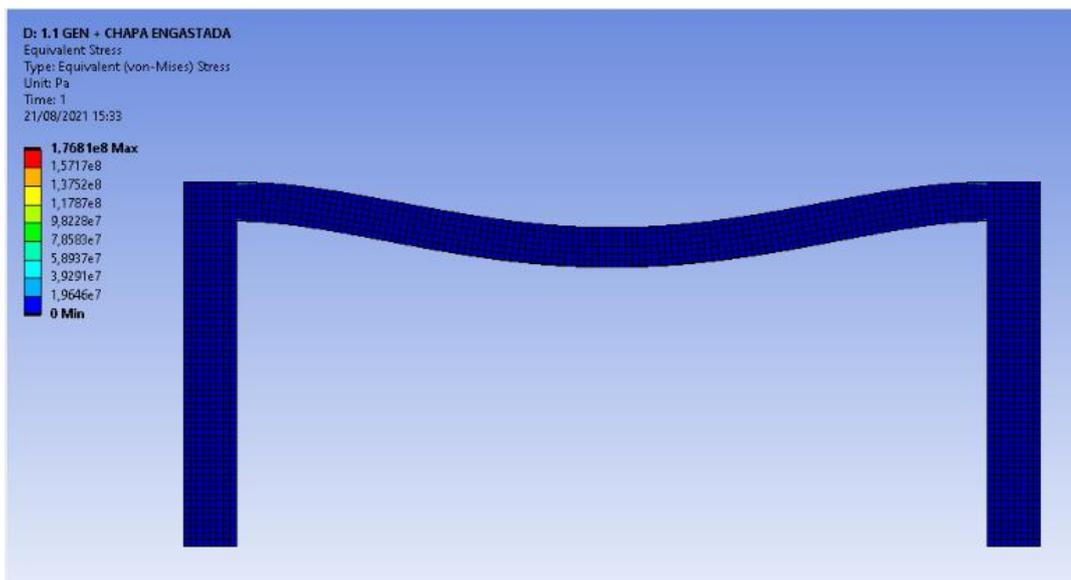


Figura 42 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 43 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 21, estão dispostos os valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises.

Tabela 21 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,76 \times 10^8$ Pa	$3,12 \times 10^6$ Pa	0 Pa

4.6. Análise da estrutura com reforço de fibra de carbono

A deformação calculada pelo ANSYS pode ser observada na figura 44. A deformação máxima em módulo, que ocorre no centro da viga, é de 0,176 centímetros

e a deformação mínima em módulo, que ocorre nas extremidades engastadas, é de $1,25 \times 10^{-5}$ centímetros. Quando comparada com a estrutura sem reforço, a deformação no centro da viga sofre uma diminuição de 0,543 centímetros.

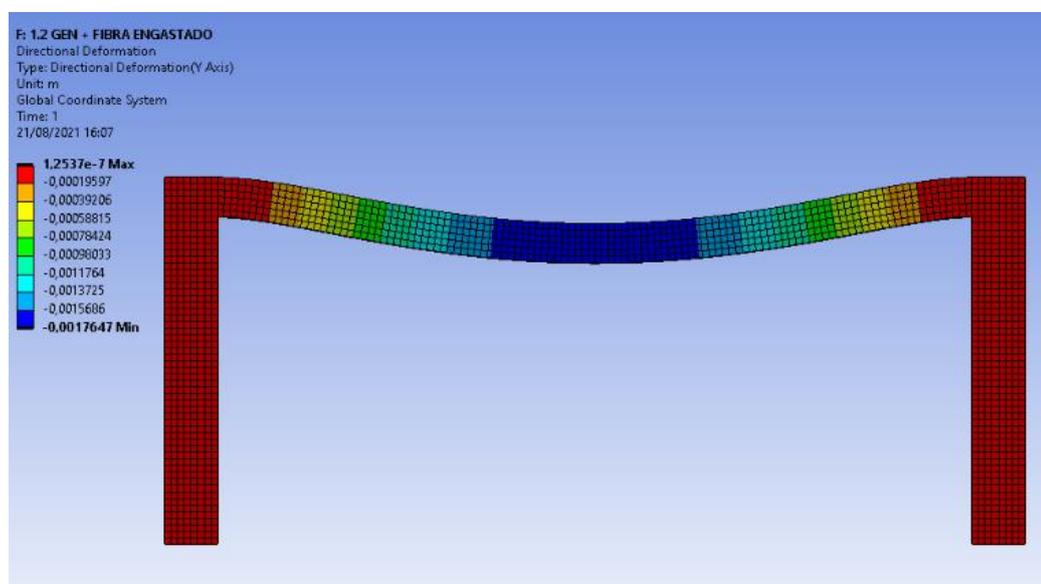


Figura 44 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

A distribuição das tensões principais máximas pode ser observada nas figuras 45 e 46. Essas tensões são calculadas pelo ANSYS e são utilizadas para calcular as tensões de von Mises. Os valores máximos ocorrem, de acordo com a figura 45, na face superior da viga, nas extremidades.

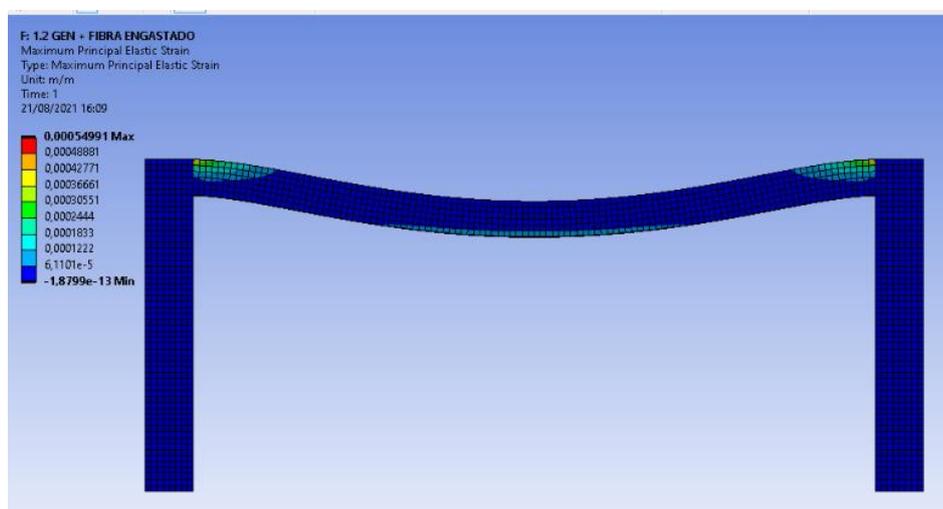


Figura 45 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).

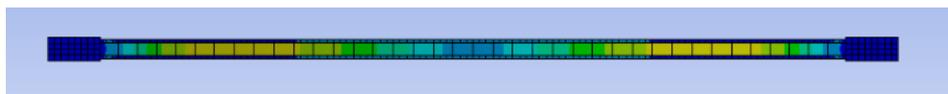


Figura 46 - Distribuição das tensões principais máximas na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 22, estão representados os valores de máximo, mínimo e médio da tensão principal máxima.

Tabela 22 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$5,49 \times 10^4$ Pa	$2,25 \times 10^5$ Pa	$-1,87 \times 10^{13}$ Pa

A distribuição das tensões principais mínimas pode ser observada nas figuras 47 e 48. E, de acordo com as mesmas, os valores máximos ocorrem no centro da viga.

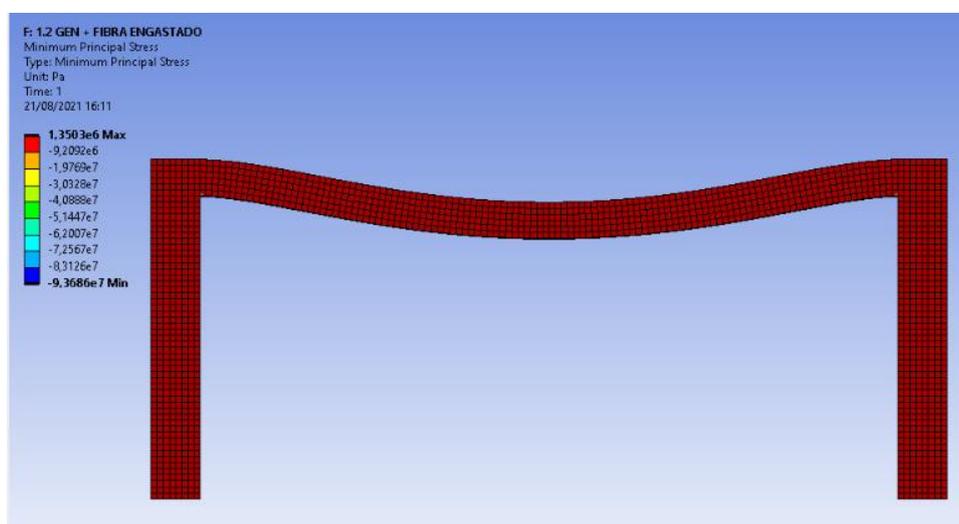


Figura 47 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

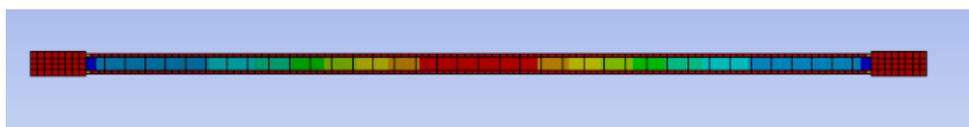


Figura 48 - Distribuição das tensões principais mínimas na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 23 é possível observar os valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima.

Tabela 23 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,35 \times 10^6$ Pa	$-1,78 \times 10^6$ Pa	$-9,36 \times 10^7$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas a partir das tensões principais máxima e mínima e determinadas pelo ANSYS durante a modelagem. A figura 49 representa a distribuição das tensões de von Mises ao longo da estrutura e a figura 50 ilustra a distribuição dessas tensões na face inferior da viga, expondo que os valores máximos ocorrem próximos as extremidades.

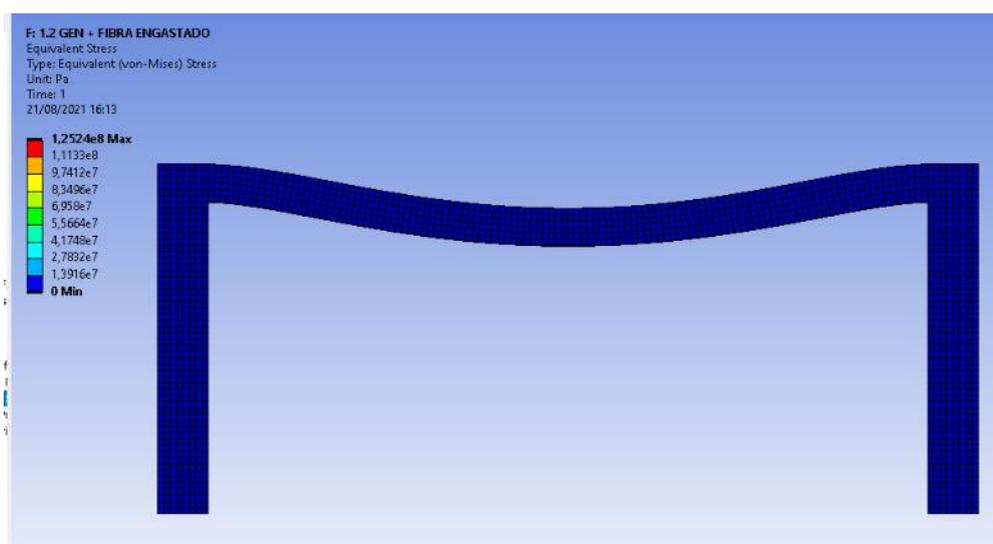


Figura 49 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 50 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

A Tabela 24 apresenta os valores de tensão de von Mises máximo, mínimo e médio.

Tabela 24 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,25 \times 10^8$ Pa	$3,12 \times 10^6$ Pa	0 Pa

4.7. Análise da estrutura com reforço de chapas metálicas em viga bi apoiada

A deformação máxima em módulo, que acomete o centro da viga, é de 2,01 centímetros e a deformação mínima em módulo, que ocorre nas extremidades, é de 0,213 centímetros. A deformação calculada pelo ANSYS pode ser observada na figura 51.

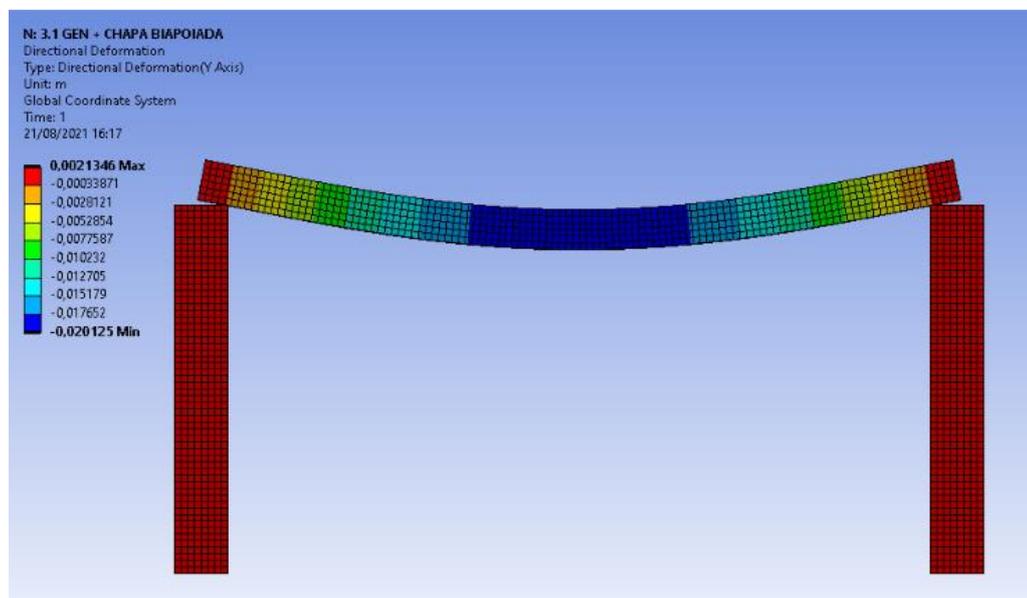


Figura 51 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

A distribuição das tensões principais máximas pode ser observada nas figuras 52. A figura 53 ilustra que os valores máximos concentram-se na parte central da viga.

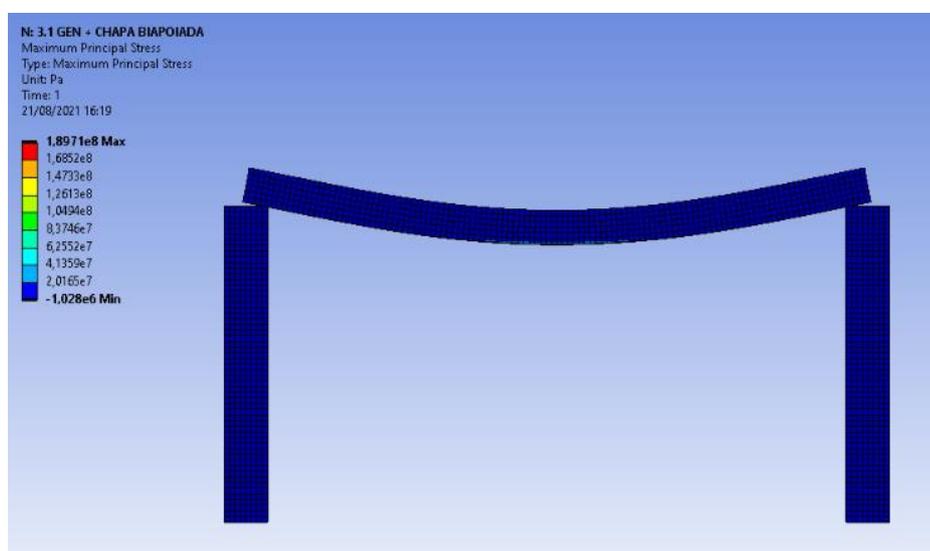


Figura 52 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 53 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 25 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões principais máximas.

Tabela 25 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,89 \times 10^8$ Pa	$3,36 \times 10^6$ Pa	$-1,02 \times 10^6$ Pa

A distribuição das tensões principais mínimas pode ser observada nas figuras 54 exibindo a concentração dos valores máximos ocorrem na face inferior da viga.

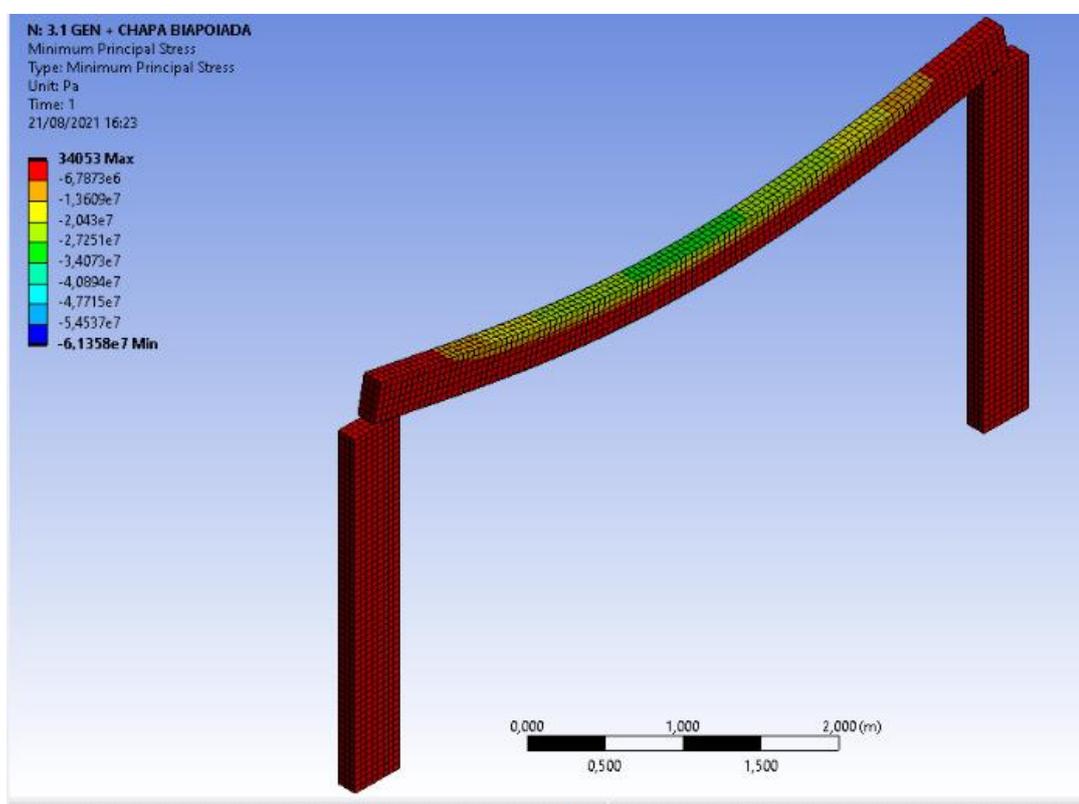


Figura 54 - Distribuição das tensões principais mínima na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 26 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões principais mínimas.

Tabela 26 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$3,4 \times 10^4$ Pa	$-2,45 \times 10^6$ Pa	$-6,13 \times 10^7$ Pa

As tensões de von Mises são encontradas a partir das tensões principais e são determinadas pelo ANSYS durante a simulação. Na figura 55 é possível observar a distribuição das tensões de von Mises ao longo da estrutura bi apoiada. E a figura 56 apresenta a distribuição dessas tensões na face inferior na viga.

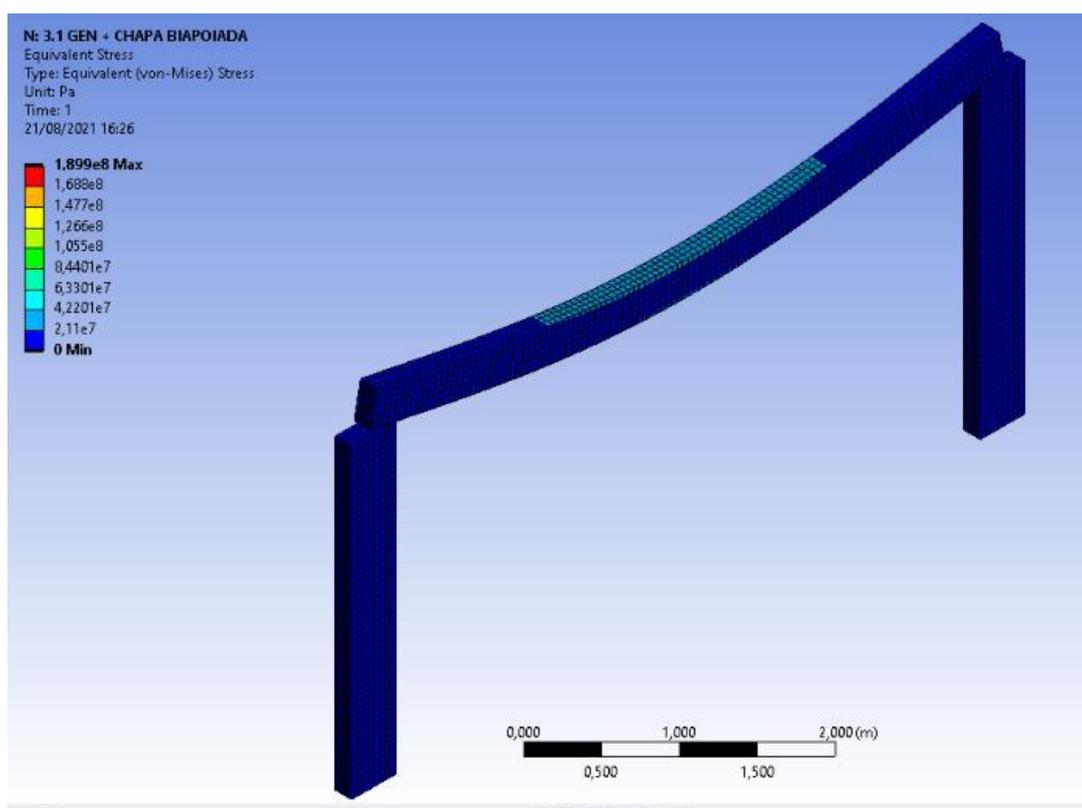


Figura 55 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).

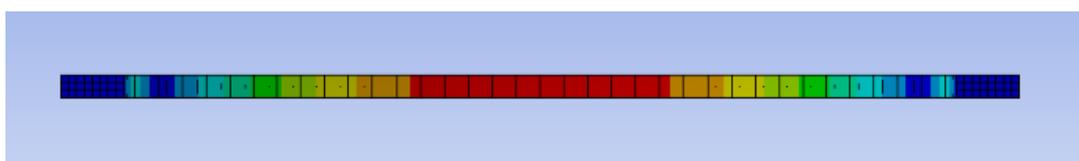


Figura 56 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 27 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões de von Mises.

Tabela 27 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
1,89 x 10 ⁸ Pa	5,74 x 10 ⁶ Pa	0 Pa

4.8. Análise da estrutura com reforço de fibras de carbono em viga bi apoiada

A deformação calculada pelo software é ilustrada na figura 57. A deformação máxima em módulo, no centro da viga, é de 1,67 centímetros e a deformação mínima em módulo, nas extremidades da viga, é de 0,362 centímetros.

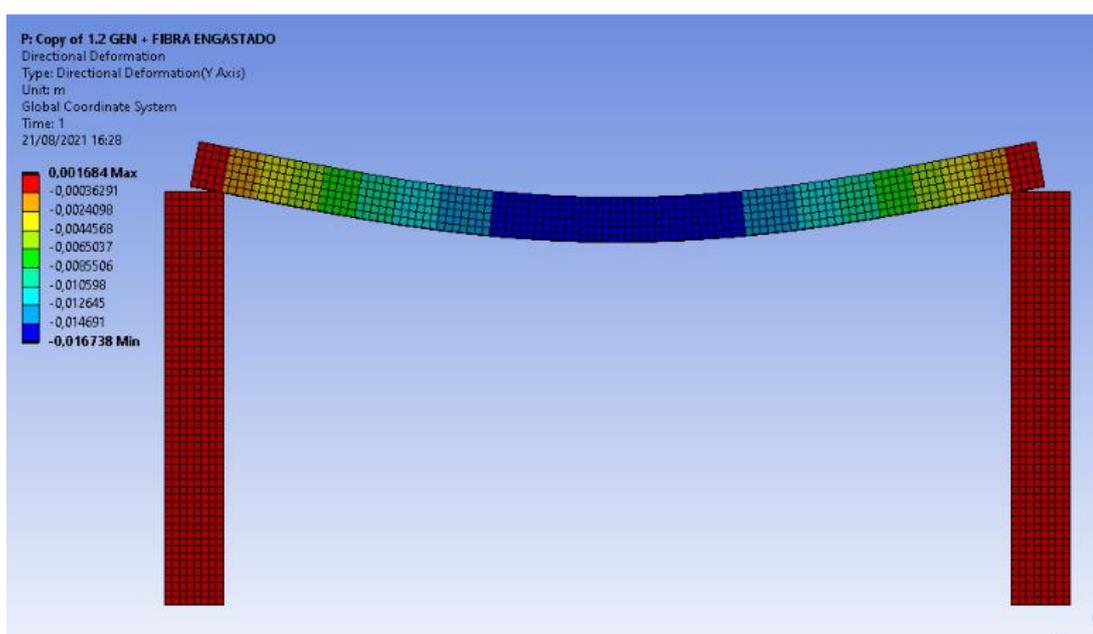


Figura 57 - Distribuição das deformações na estrutura (AUTOR, 2021).

A distribuição das tensões principais máximas pode ser observada nas figuras 58 e 59, respectivamente. Essas tensões principais são determinadas pelo ANSYS durante a simulação. Os valores máximos podem ser observados no centro da viga, na face inferior.

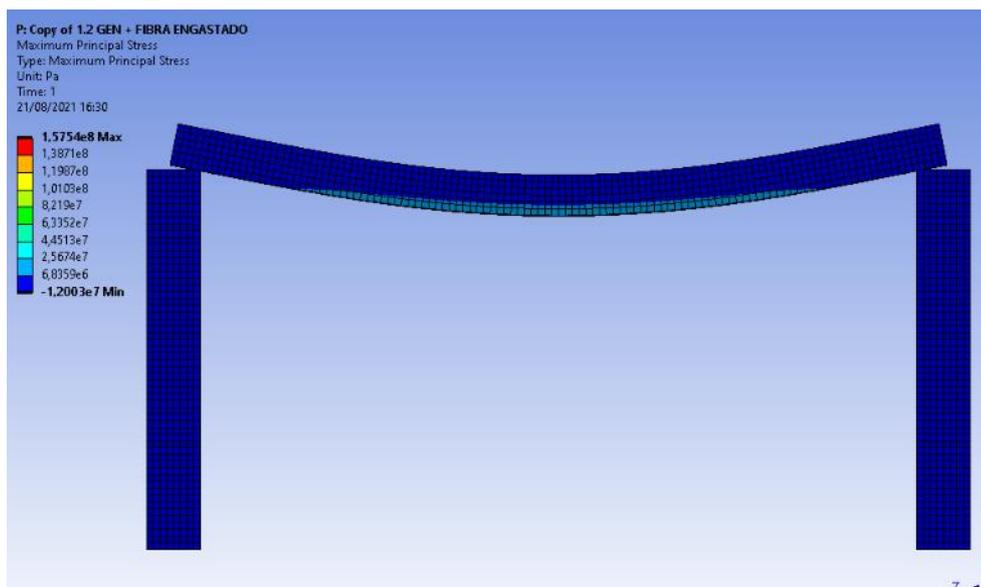


Figura 58 - Distribuição das tensões principais máxima na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 59 - Distribuição das tensões principais máxima na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 28 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões principais máximas.

Tabela 28 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal máxima

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,57 \times 10^8$ Pa	$1,72 \times 10^7$ Pa	$-1,2 \times 10^7$ Pa

A figura 60 representa a distribuição das tensões principais mínimas na face inferior da viga. Exibindo os valores máximo na face inferior da viga.

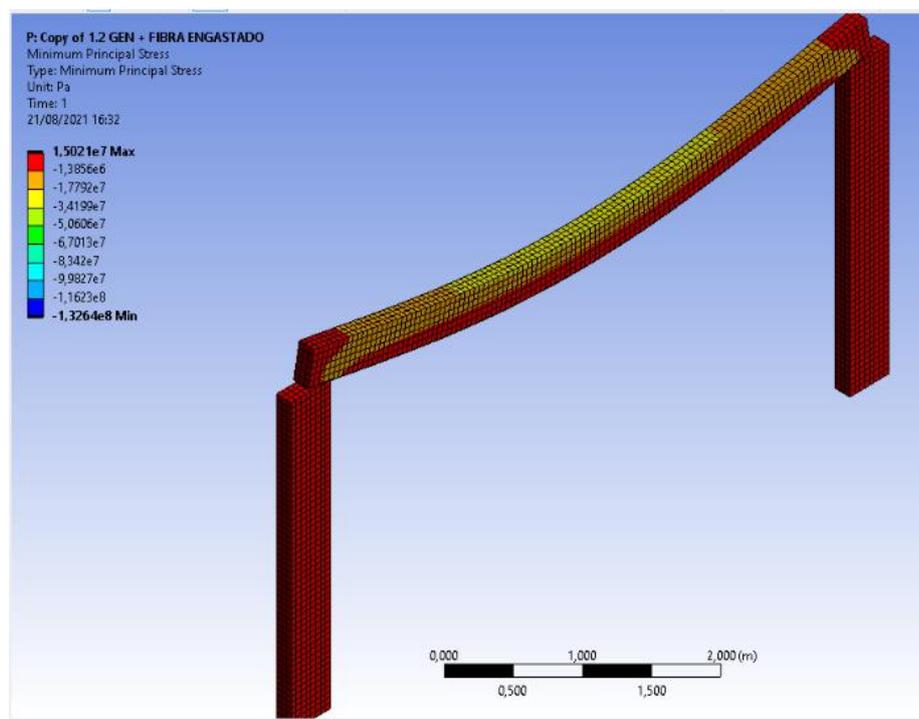


Figura 60 - Distribuição das tensões principais mínimas na estrutura (AUTOR, 2021).

Na Tabela 29 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões principais mínimas.

Tabela 29 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão principal mínima (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,50 \times 10^7$ Pa	$-2,34 \times 10^6$ Pa	$1,32 \times 10^8$ Pa

As tensões de von Mises são calculadas a partir das tensões principais máxima e mínima e determinadas pelo ANSYS durante a modelagem. A figura 61 representa a distribuição das tensões de von Mises ao longo da estrutura bi apoiada e a figura 62 ilustra a distribuição dessas tensões na face inferior da viga.

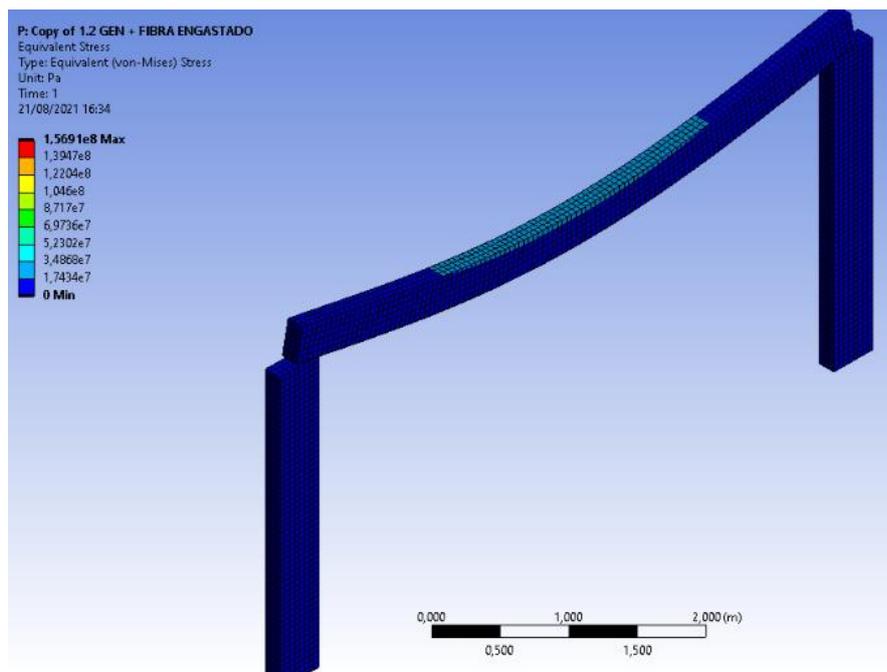


Figura 61 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura (AUTOR, 2021).



Figura 62 - Distribuição das tensões de von Mises na face inferior da viga (AUTOR, 2021).

Na Tabela 30 são apresentados os valores de máximo, mínimo e médio das tensões de von Mises.

Tabela 30 - Valores de máximo, mínimo e média da tensão de von Mises (AUTOR, 2021).

Tensão Máxima	Tensão Média	Tensão Mínima
$1,56 \times 10^8$ Pa	$1,94 \times 10^7$ Pa	0 Pa

4.9. Resumo dos resultados das análises

Na Tabela 31, estão dispostas as deformações que ocorrem no centro da viga em todas os casos analisados neste trabalho, para facilitar a comparação e a avaliação dos resultados.

Tabela 31 – Resumo das deformações no centro da viga nas simulações (AUTOR, 2021).

Modelagem	Deformação no centro da viga
Estrutura sem reforço	719×10^{-3} cm
Estrutura com reforço em perfil metálico T	534×10^{-3} cm
Estrutura com reforço em perfil metálico I	253×10^{-3} cm
Estrutura com reforço em perfil metálico U	348×10^{-3} cm
Estrutura com reforço com chapas metálicas	656×10^{-3} cm
Estrutura com reforço de fibras de carbono	176×10^{-3} cm

Na Tabela 32, estão dispostas as deformações que ocorrem nas extremidades da viga em todas os casos analisados neste trabalho, para facilitar a comparação e a avaliação dos resultados.

Tabela 32 - Deformações nas extremidades da viga em diferentes simulações (AUTOR, 2021).

Modelagem	Deformação nas extremidades da viga
Estrutura sem reforço	$2,81 \times 10^{-5}$ cm
Estrutura com reforço em perfil metálico T	$2,52 \times 10^{-5}$ cm
Estrutura com reforço em perfil metálico I	$4,41 \times 10^{-5}$ cm
Estrutura com reforço em perfil metálico U	$2,21 \times 10^{-5}$ cm
Estrutura com reforço com chapas metálicas	$397,0 \times 10^{-5}$ cm
Estrutura com reforço de fibras de carbono	$1,25 \times 10^{-5}$ cm

Na tabela 33, estão pontadas as deformações com o reforço de chapas metálicas em duas configurações de apoio diferentes, engastadas e bi apoiada.

Tabela 33 – Deformações com reforço de chapas metálicas (AUTOR, 2021).

	Deformações no centro da viga	Deformação nas extremidades
Viga engastada	0,656 cm	$3,97 \times 10^{-3}$ cm
Viga bi apoiada	2,01 cm	213×10^{-3} cm

Na tabela 34, estão pontadas as deformações com o reforço de chapas metálicas em duas configurações de apoio diferentes, engastadas e bi apoiada.

Tabela 34 - Deformações com reforço de fibras de carbono (AUTOR, 2021).

	Deformações no centro da viga	Deformação nas extremidades
Viga engastada	0,176 cm	125×10^{-3} cm
Viga bi apoiada	1,67 cm	362×10^{-3} cm

5. CONCLUSÃO

As modelagens pelo software ANSYS revelam as influências dos tipos de reforços e dos tipos de apoios nas deformações e nas tensões atuantes na estrutura. E, assim, definir o reforço que melhor recupera a estrutura, comparando com a modelagem da estrutura sem reforços.

Analisando as deformações, que ocorrem no centro da viga, de todas as análises com apoio engastado, constatamos que aquele reforço que apresenta menor deformação é o reforço com fibras de carbono. Isso ocorre devido à alta resistência mecânica da fibra de carbono.

Comparando as deformações nas extremidades da viga, com apoio engastado, podemos constatar que o reforço que apresenta menor deformação é também o reforço com fibras de carbono. Isso ocorre devido as propriedades da fibra de carbono com alta resistência mecânica e boa flexibilidade, garantido melhor aderências nas extremidades da viga.

Logo, o reforço que apresentou melhores resultados na recuperação da estrutura, considerando a deformação nas extremidades dos apoios e no centro da viga, foi a imprimação de fibra de carbono.

Pode-se observar, também, a influência nos apoios quando comparamos as modelagens com reforço de chapas metálicas quando a viga está engastada e quando está bi apoiada. As extremidades e o centro da viga engastada deformam menos devido à configuração do apoio que resiste mais à deformação imposta pela carga em relação à configuração de viga bi apoiada. Deformando 1,354 centímetros a menos no centro da viga e 0,2126 centímetros a menos nas extremidades.

O mesmo pode ser observado quando comparamos as análises dos reforços de fibras de carbono nas duas configurações de apoios. Assim como na análise do reforço com chapas metálicas, a comparação das análises mostra que as vigas engastadas deformam menos em relação a vigas bi apoiadas. Quando o reforço é com fibras de carbono a deformação no centro da viga é menor em 1,494 centímetros e nas extremidades a diferença é de 0,3619 centímetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTOQI EBERICK V5. **Sistema Para Projeto de Edificações em Concreto Armado - Tutorial Básico do Alto QI Eberick – Revisão 4**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7007**: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: cargas para cálculo de estruturas de edificação. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008

AZEVEDO, D. F. O. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes, 2015.

BEER, F. P; JOHNSTON JR, E. R; DEWOLF, J. T; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BOTELHO, M. H. C. **Concreto armado, eu te amo, para arquitetos**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

COUTO, J. A. S; CARMINATTI, R. L; NUNES, R. R. A; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção**. Caderno de Graduação – Ciências exatas e tecnologias, v. 1, n. 17, p. 49-58. Sergipe, 2013.

CRISFIELD, M. A. **Nonlinear Finite Element Analysis of solids and structures**. **Jon Wiley & Sons**, New York, v. 1, 1991.

GERDAU. **Gerdau: o futuro se molda**. Catálogos e Manuais. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>. Acesso em: 05 de agosto de 2021.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estrutura de concreto**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1992.

HIBBELER, R.C. **Resistências dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Better, 2010.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil**: causas e soluções para danos e prejuízos em obras. São Paulo: Editora Pini, 2007.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

PITELLI, G. T; MARCO, G. **Patologias em estruturas de concreto armado**. Universidade de Araraquara. São Paulo, S/D.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e precisão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia) – Escola de Engenharia Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

RAMPINELLI, B. G. **Simulação numérica tridimensional de vigas em concreto armado pelo método dos elementos finitos**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

RODRIGUES, R. B; SOUZA, M. F. S. M. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Universidade Estadual de Campinas, 2008.

ROMERO, D. V. S. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, E. A. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

SILVA, R. J.C. **Concreto armado**. 3. ed. Sobral: Universidade Estadual Vale do Acaraú, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 2017.

SOUTO FILHO, M. V. **Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado**. Tese de mestrado no programa de pós-graduação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1998.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios**: causas, prevenções e recuperação. São Paulo: Editora Pini, 2003.