

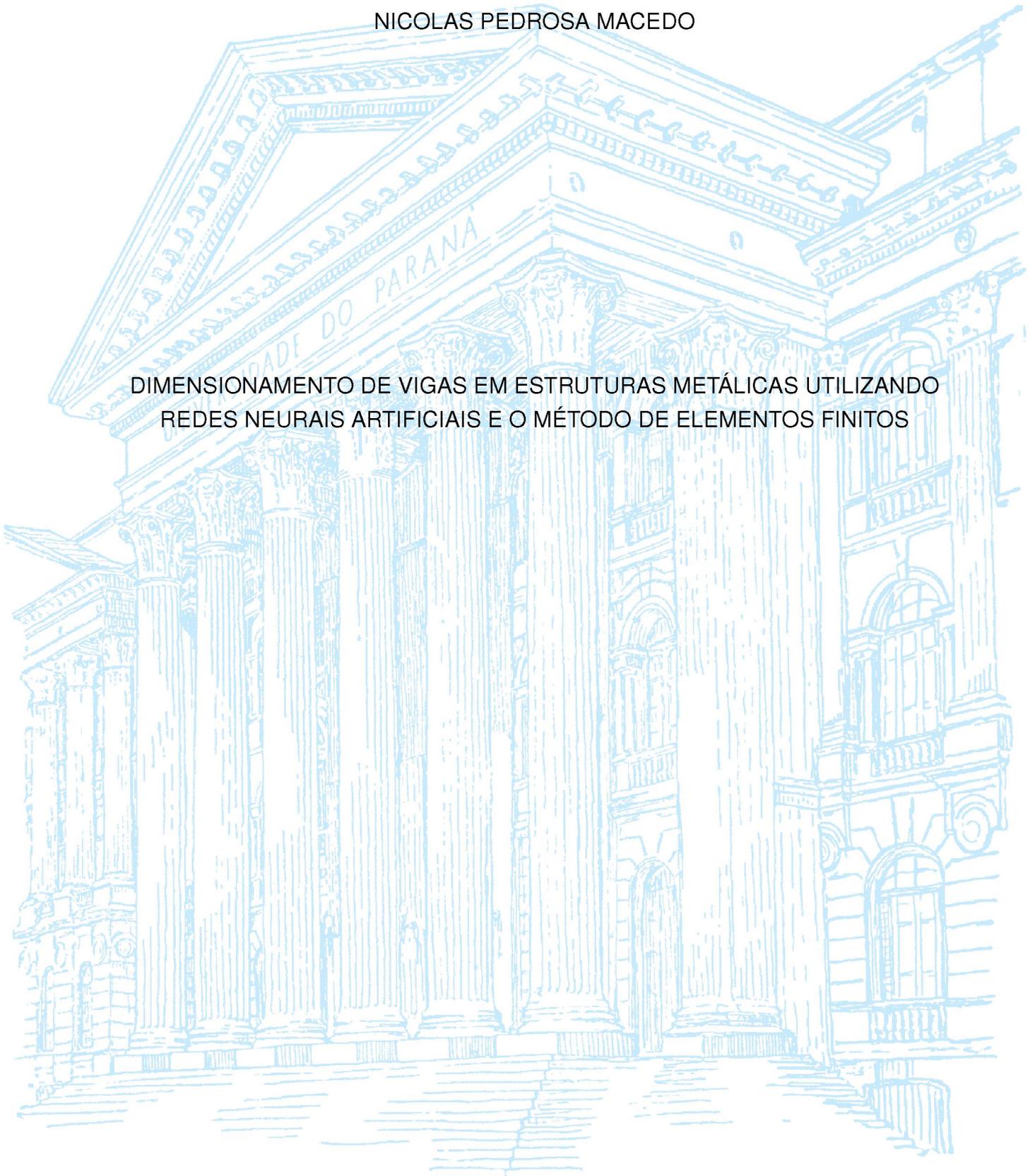
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICOLAS PEDROSA MACEDO

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS UTILIZANDO
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

CURITIBA

2021



NICOLAS PEDROSA MACEDO

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS UTILIZANDO
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marco André Argenta

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

M141d Macedo, Nicolas Pedrosa

Dimensionamento de vigas em estruturas metálicas utilizando redes neurais artificiais e o método de elementos finitos [recurso eletrônico]/ Nicolas Pedrosa Macedo - Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marco André Argenta

1. Redes neurais (Computação). 2. Estrutura metálica. I. Argenta, Marco André. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 006.3

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NICOLAS PEDROSA MACEDO** intitulada: **DIMENSIONAMENTO DE VIGAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**, sob orientação do Prof. Dr. MARCO ANDRE ARGENTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 13:06:17.0

MARCO ANDRE ARGENTA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 14:53:02.0

EDUARDO JAQUES SPINOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 13:51:22.0

MARCOS ARNDT

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: ppgecc@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 77867

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 77867

RESUMO

Devido à grande variedade de perfis disponíveis para serem utilizados em estruturas metálicas, também existe uma grande quantidade de configurações possíveis para os elementos estruturais. Por essa razão, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta utilizando redes neurais artificiais para auxiliar no dimensionamento de vigas com seção do tipo I e H conectadas às colunas por meio de uma ligação do tipo cantoneira dupla. A ferramenta deve fornecer para o vão da viga e a carga aplicada uma configuração com o perfil para a viga, o perfil cantoneira para a ligação, o diâmetro e a quantidade de parafusos. Durante o desenvolvimento do trabalho foi preparado um conjunto de configurações variando seus parâmetros. As configurações foram analisadas utilizando o método de elementos finitos. Na análise pelo método dos elementos finitos os perfis foram modelados utilizando um elemento quadrilateral plano com efeitos do estado plano e de placa de Kirchhoff-Love. Em seguida, com base nos diagramas de esforços internos obtidos com os resultados da análise pelo método de elementos finitos, as configurações foram verificadas de acordo com os critérios de dimensionamento da norma brasileira NBR 8800:2008. Os resultados das verificações de dimensionamento das configurações foram utilizados durante o treinamento das redes neurais. Os resultados da ferramenta utilizando as redes neurais foram avaliados por sua acurácia em fornecer configurações que atendem os critérios de dimensionamento. Para os conjuntos de teste, 98% das configurações indicadas atenderam os critérios de dimensionamento. Portanto, uma vantagem da ferramenta é fornecer de forma simplificada, com custo computacional reduzido e de acordo com as normas técnicas uma configuração para os elementos estruturais.

Palavras-chaves: Estrutura metálica. Dimensionamento. Rede neural. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Due to the wide variety of profiles available for use in steel structures, there are also a lot of possible configurations for the structural elements. For this reason, the objective of this work is to develop a tool using artificial neural networks to assist in the design of beams with type I section connected to the columns by a double angle connection. The tool must provide for the length of the beam and the applied load a configuration with the profile for the beam, the double angle profile for the connection, the diameter and the number of bolts. During the development of the work a set of configurations was prepared varying its parameters. The configurations were analyzed using the finite element method. In the analysis by the finite element method, the profiles were modeled using a flat quadrilateral element with effects of the plane stress and Kirchhoff-Love plate. Then, based on the internal force diagrams obtained with the results of the analysis using the finite element method, the configurations were verified according to the design criteria of the Brazilian standard NBR 8800:2008. The results of the configuration design checks were used during the training of the neural networks. The results of the tool using the neural networks were evaluated for its accuracy in providing configurations that meet the design criteria. For the test sets, 98% of the indicated configurations met the design criteria. Therefore, an advantage of the tool is to provide, in a simplified way, with reduced computational cost and according to the technical standards, a configuration for the structural elements.

Keywords: Steel Structure. Structural design. Neural network. Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Edifício garagem em estrutura metálica.	19
FIGURA 2 – Ilustração da ferramenta proposta com os dados de entrada (vão da viga e carga aplicada) e de saída (configuração de perfis e parafusos).	20
FIGURA 3 – Gráfico tensão deformação convencional para o aço.	23
FIGURA 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m	25
FIGURA 5 – Curva relacionando a resistência à compressão σ_c e esbeltez λ	26
FIGURA 6 – Curva do fator de redução χ em função do índice de esbeltez λ_0	27
FIGURA 7 – Estágios de um elemento solicitado a flexão.	28
FIGURA 8 – Ligações ideais: (a) ligação perfeitamente rígida; (b) ligação rotulada.	31
FIGURA 9 – Tipos de ligação viga-coluna: (a) ligação cantoneira dupla, (b) chapa de topo, (c) chapa de topo com enrijecedores	32
FIGURA 10 – Efeito alavanca em ligações tracionadas.	36
FIGURA 11 – Ilustração de uma ligação excêntrica.	37
FIGURA 12 – Ilustração de uma ligação excêntrica por corte.	38
FIGURA 13 – Sólido submetido ao estado plano de tensões.	39
FIGURA 14 – Ilustração de uma placa.	41
FIGURA 15 – Flexão de uma placa retangular.	42
FIGURA 16 – Flexão de uma placa retangular.	44
FIGURA 17 – Posicionamento do perfil segundo os eixos.	45
FIGURA 18 – Elemento plano isoparamétrico de 4 nós.	49
FIGURA 19 – Graus de liberdade do elemento de estado plano.	49
FIGURA 20 – Família de funções de Lagrange de primeira ordem	50
FIGURA 21 – Funções de forma N_i para o elemento de estado plano.	51
FIGURA 22 – Graus de liberdade do elemento de placa	53
FIGURA 23 – Triângulo de pascal	54
FIGURA 24 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade w_i	56
FIGURA 25 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade θ_{ri}	57
FIGURA 26 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade θ_{si}	58
FIGURA 27 – Ilustração do elemento de pórtico espacial.	60
FIGURA 28 – Modelo matemático simplificado para um neurônio artificial.	64
FIGURA 29 – Ilustração de uma rede neural multicamadas.	65

FIGURA 30 – Gráfico da função sigmóide e a sua derivada.	67
FIGURA 31 – Gráfico da função ReLU e a sua derivada.	68
FIGURA 32 – Ilustração dos neurônios que influenciam na ativação de um neurônio em uma rede totalmente conectada.	69
FIGURA 33 – Esquema para o cálculo da derivada da função custo em relação ao peso w^l em uma camada l	70
FIGURA 34 – Fluxograma dos objetivos específicos	74
FIGURA 35 – Ilustração de uma configuração de viga e os seus elementos de ligação com a mesa da coluna.	75
FIGURA 36 – Ilustração de uma configuração de viga e os seus elementos de ligação com a alma da coluna.	75
FIGURA 37 – Principais dados de um modelo.	76
FIGURA 38 – Seções I e cantoneira de abas iguais.	76
FIGURA 39 – Fluxograma geral da análise pelo MEF.	78
FIGURA 40 – Malha de elementos finitos da configuração de viga conectada à mesa da coluna.	79
FIGURA 41 – Malha de elementos finitos da configuração de viga conectada à alma da coluna.	79
FIGURA 42 – Detalhe da malha da região da ligação para a viga conectada à mesa da coluna.	80
FIGURA 43 – Detalhe da malha da região da ligação para a viga conectada à alma da coluna.	80
FIGURA 44 – Ilustração dos nós da malha que foram restringidos para a viga conectada à mesa da coluna.	81
FIGURA 45 – Ilustração dos nós da malha que foram restringidos para a viga conectada à alma da coluna.	81
FIGURA 46 – Ilustração dos nós da malha em que foram aplicados a carga distribuída para a viga conectada à mesa da coluna.	82
FIGURA 47 – Ilustração dos nós da malha em que foram aplicados a carga distribuída para a viga conectada à alma da coluna.	82
FIGURA 48 – Detalhe do contato entre os elementos dos perfis e dos elementos do parafuso. Nós com a mesma cor indicam que foram considerados os mesmos graus de liberdade durante a solução.	83
FIGURA 49 – Ilustração de uma seção para cálculo dos esforços internos da viga.	84
FIGURA 50 – Ilustração de forma genérica do diagrama de tensões na direção longitudinal (σ_x) de uma seção da viga.	84
FIGURA 51 – Ilustração da rede neural para indicar o perfil da viga.	87
FIGURA 52 – Gráfico da função tangente hiperbólica.	88
FIGURA 53 – Ilustração da rede neural para indicar a configuração da ligação.	89

FIGURA 54 – Ilustração do resultado u em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna).	91
FIGURA 55 – Ilustração do resultado v em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna).	92
FIGURA 56 – Ilustração do resultado w em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna)	92
FIGURA 57 – Ilustração do resultado u em mm com a deformação ampliada em 20x. (viga conectada à alma da coluna)	93
FIGURA 58 – Ilustração do resultado v em mm com a deformação ampliada em 20x. (viga conectada à alma da coluna)	93
FIGURA 59 – Ilustração do resultado w em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à alma da coluna).	94
FIGURA 60 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna.	95
FIGURA 61 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna.	96
FIGURA 62 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna, agrupado por comprimento.	97
FIGURA 63 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna, agrupado por seção.	97
FIGURA 64 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna, agrupado por comprimento.	98
FIGURA 65 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna, agrupado por seção.	98
FIGURA 66 – Diagrama de esforço cortante para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à mesa da coluna.	99
FIGURA 67 – Diagrama de momento fletor para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à mesa da coluna.	100

FIGURA 68 – Diagrama de esforço cortante para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à alma da coluna.	101
FIGURA 69 – Diagrama de momento fletor para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à alma da coluna.	101
FIGURA 70 – Curva EQM por época para a rede neural que indica o perfil para a viga conectada à mesa.	102
FIGURA 71 – Curva EQM por época para a rede neural que indica o perfil para a viga conectada à alma.	103
FIGURA 72 – Curva EQM por época para a rede neural que indica os elementos de ligação para a viga conectada à mesa.	104
FIGURA 73 – Curva EQM por época para a rede neural que indica os elementos de ligação para a viga conectada à alma.	104
FIGURA 74 – Esquema da viga para a o primeiro exemplo de aplicação.	105
FIGURA 75 – Desenho tridimensional da viga utilizando a primeira configuração indicada para cada vão pelas redes neurais com a identificação dos perfis.	110
FIGURA 76 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis e detalhes das ligações.	111
FIGURA 77 – Esquema das vigas para o segundo exemplo de aplicação.	112
FIGURA 78 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis.	120
FIGURA 79 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis.	121

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tabela de valores para a integração numérica pela Quadratura de Gauss.	52
TABELA 2 – Tabela de perfis adotados para a viga e coluna das configurações.	77
TABELA 3 – Tabela de cantoneiras adotadas para o conjunto de configurações.	77
TABELA 4 – Tabela de parafusos adotados para o conjunto de configurações.	78
TABELA 5 – Valores das propriedades dos aços adotados nas configurações.	78
TABELA 6 – Valores adotados para x_3 de acordo com o perfil.	89
TABELA 7 – Tempos para a criação do conjunto de exemplo e para o treinamento das redes neurais.	105
TABELA 8 – Características dos vãos da viga do primeiro exemplo.	106
TABELA 9 – Valores de entrada para a rede neural que indica os perfis.	106
TABELA 10 – Valores de saída obtidos pela rede neural para o perfil do vão V1.	106
TABELA 11 – Valores de saída filtrados e ordenados para o perfil do vão V1. . .	107
TABELA 12 – Valores de entrada para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1	107
TABELA 13 – Valores de saída para a rede neural que indica os elementos da ligação - vão V1 - perfil W150x13,0	108
TABELA 14 – Configurações indicadas para o vão V1.	108
TABELA 15 – Configurações indicadas para o vão V2.	109
TABELA 16 – Configurações indicadas para o vão V3.	109
TABELA 17 – Configurações de perfis e elementos de ligação em comum para todos os vãos.	111
TABELA 18 – Características das vigas do segundo exemplo.	112
TABELA 19 – Valores de entrada para a rede neural que indica os perfis.	113
TABELA 20 – Valores de saída obtidos pela rede neural para o perfil da viga V1.	113
TABELA 21 – Valores de saída filtrados e ordenados para o perfil da viga V1. .	114
TABELA 22 – Valores de entrada para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1	114
TABELA 23 – Valores de saída para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1 - W250x25,3	114
TABELA 24 – Configurações indicadas para as vigas V1 e V3.	115
TABELA 25 – Configurações indicadas para as vigas V2 e V4.	116
TABELA 26 – Configurações indicadas para a viga V5.	117
TABELA 27 – Configurações indicadas para a viga V6.	118
TABELA 28 – Configurações indicadas para a viga V7.	119

TABELA 29 – Configurações de perfis e elementos de ligação em comum para cada todas as vigas.	121
TABELA 30 – Configurações analisadas no caso de teste de $L = 585$ cm, $q = 0,144$ kN/cm e conectada na mesa da coluna.	122
TABELA 31 – Resultados da análise do caso de teste de $L = 585$ cm, $q = 0,144$ kN/cm e conectada à mesa da coluna.	123
TABELA 32 – Matriz de confusão para o conjunto de teste para a viga conectada à mesa da coluna.	123
TABELA 33 – Matriz de confusão para o conjunto de teste para a viga conectada à alma da coluna.	124
TABELA 34 – Valores de acurácia, precisão e F1 para os modelos.	124

LISTA DE SIGLAS

EQM	Erro quadrado médio
IA	Inteligência artificial
MEF	Método de elementos finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

Estruturas metálicas

A_e	Área líquida efetiva da seção transversal do perfil
A_g	Área bruta da seção transversal do perfil
A_{gv}	Área bruta sujeita a cisalhamento
A_{nt}	Área líquida sujeita a tração
A_{nv}	Área líquida sujeita a cisalhamento
A_w	Área efetiva de cisalhamento, função da geometria da seção transversal
C_{fp}	Coefficiente de resistência do fuste do parafuso em função do tipo de furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço
C_{pc}	Coefficiente em função da posição do plano de corte no parafuso
C_{pl}	Coefficiente de resistência do elemento conectado em função do tipo de furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço
C_{ts}	Coefficiente em função da distribuição da tensão de tração na área líquida
d_b	Diâmetro do parafuso
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_u	Tensão de ruptura do aço
f_{ub}	Tensão de ruptura do material do parafuso
F_d	Valor de cálculo após a combinação das ações para o estado limite último
$F_{Gi,k}$	Valor característico da ação permanente
F_k	Valor característico da ação
$F_{Q1,k}$	Valor característico da ação variável principal
$F_{Qj,k}$	Valor característico de uma ação variável secundária
F_{ser}	Valor de cálculo após a combinação das ações para o estado limite de serviço
$F_{t,Rd}$	Força de tração resistente de cálculo do parafuso
$F_{v,Rd}$	Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso

l_f	Distância na direção da força entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
N_e	Força axial de flambagem elástica
n_p	Número de parafusos tracionados na ligação
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$N_{t,Rd}^{ESB}$	Força axial de tração resistente de cálculo para escoamento da seção bruta
$N_{t,Rd}^{RSL}$	Força axial de tração resistente de cálculo para ruptura da seção líquida
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
P_{cr}	Carga crítica de flambagem elástica
Q	Fator de redução associado a flambagem local
t	Espessura do elemento que está sendo conectado
α	Relação entre o momento M_2 gerado pelo efeito alavanca no parafuso e o momento M_1 gerado pelo efeito alavanca na face da alma do perfil
γ_{q1}	Coeficiente de ponderação da ação variável principal
γ_{gi}	Coeficiente de ponderação de uma ação permanente
γ_{qj}	Coeficiente de ponderação de uma ação variável secundária
δ	Relação entre a área líquida A_e do perfil e a área bruta A_g
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão
Ψ_{0j}	Fator de combinação de uma ação variável secundária
Ψ_{2j}	Fator de combinação de uma ação variável para valores quase permanentes

Mecânica dos sólidos

D	Matriz de relações constitutivas do material
E	Módulo de elasticidade elástico do material
u	Deslocamento na direção x

v	Descolamento na direção y
w	Deslocamento na direção z
γ_{xy}	Deformação de cisalhamento no plano xy
ϵ	Vetor de deformações
ϵ_x	Deformação na direção x
ϵ_y	Deformação na direção y
ν_{yz}	Coeficiente de Poisson
σ_x	Tensão na direção x
σ_y	Tensão na direção y
σ_z	Tensão na direção z
σ_v	Tensão equivalente de von Mises
τ_{xy}	Tensão cisalhante no plano xy
τ_{xz}	Tensão cisalhante no plano xz
τ_{yz}	Tensão cisalhante no plano yz

Método dos elementos Finitos

A	Área da seção transversal
B	Matriz das derivadas das funções de forma
D	Matriz de relações constitutivas
E	Módulo de elasticidade
f^e	Vetor de forças nodais do elemento
G	Módulo de elasticidade transversal
I_y	Momento de inércia da seção transversal em torno do eixo y
I_z	Momento de inércia da seção transversal em torno do eixo z
J	Módulo de torção
K^e	Matriz de rigidez do elemento

L	Matriz de operadores diferenciais das funções de forma
N	Funções de forma para interpolação dos deslocamentos de um elemento
p	Forças de volume do corpo
q	Cargas na superfície do corpo
S	Superfície do corpo
u_e	Vetor de deslocamentos nodais de um elemento
\mathbf{u}	Vetor de deslocamentos de um elemento
u, v, w	Deslocamentos nas direções x, y e z
V	Volume do corpo
W_e	Trabalho externo no corpo
W_i	Trabalho interno no corpo
δu	Deslocamentos virtuais
$\delta \epsilon$	Deformações virtuais
ϵ	Vetor de deformações
θ_x, θ_y	Rotações em torno das direções x e y
σ	Vetor de tensões

Redes neurais artificiais

a	Ativação de um neurônio
b	Bias
C	Função Custo
L	Número de camadas de uma rede neural
\mathbf{W}	Matriz de pesos das conexões entre camadas consecutivas
w_i	Peso de uma conexão entre neurônios de camadas adjacentes
z	Soma das ativações de um neurônio ponderada pelos pesos das conexões
δ	Sinal de erro
σ	Função de ativação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivos Específicos	20
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
1.3	CONTRIBUIÇÕES	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	ESTRUTURAS METÁLICAS	22
2.1.1	Dimensionamento de um elemento	24
2.1.2	Ligações em estruturas metálicas	31
2.1.3	Ligações parafusadas	32
2.2	MECÂNICA DOS SÓLIDOS	39
2.2.1	Estado Plano de Tensão	39
2.2.2	Placa de Kirchhoff-Love	40
2.2.3	Resultante dos esforços em uma seção	45
2.3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	47
2.3.1	Conceitos iniciais	47
2.3.2	Elemento de estado plano de 4 nós	48
2.3.3	Elemento de Pórtico	60
2.3.4	Matriz de rotação	61
2.4	APRENDIZADO DE MÁQUINA	63
2.4.1	Redes Neurais Artificiais	63
2.4.2	Treinando a rede neural	68
3	METODOLOGIA	74
3.1	CONFIGURAÇÃO DE VIGA	74
3.2	ELABORAÇÃO DO CONJUNTO DE CONFIGURAÇÕES	76
3.3	ANÁLISE PELO MEF	78
3.4	ESFORÇOS INTERNOS	83
3.5	VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO	85
3.6	MODELAGEM DAS REDES NEURAS	86
3.7	VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES NEURAS	90
4	RESULTADOS	91
4.1	MEF	91

4.2	REDES NEURAIS	102
4.3	EXEMPLO DE APLICAÇÃO (A)	105
4.4	EXEMPLO DE APLICAÇÃO (B)	112
4.5	VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS	122
5	DISCUSSÃO	125
6	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	129

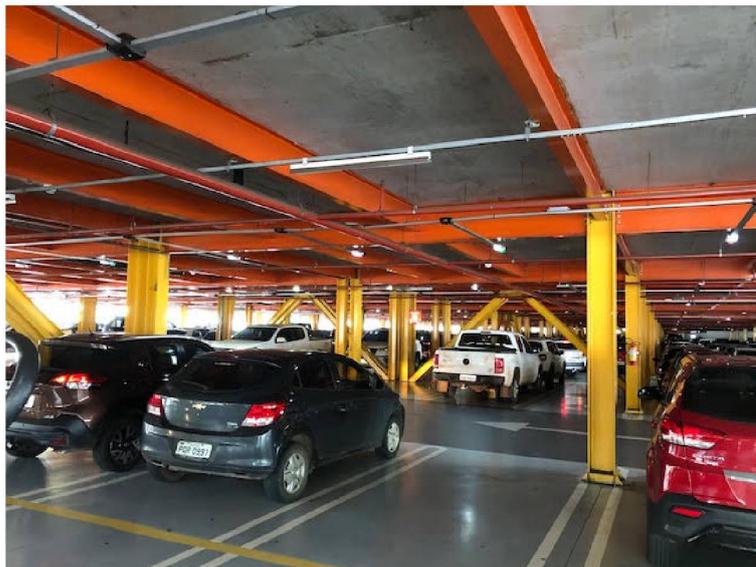
1 INTRODUCAO

A engenharia de estruturas pode ser definida como a mistura de arte e ciência, combinando a intuição do engenheiro sobre o comportamento da estrutura com o conhecimento dos princípios da estática, dinâmica, mecânica dos materiais e a análise estrutural para elaborar uma estrutura segura e de forma viável economicamente (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2008).

Ainda segundo Salmon, Johnson e Malhas (2008), as primeiras estruturas construídas pelos homens se inspiravam nas observações realizadas na natureza, como as vigas e os arcos. A medida que os princípios que regem o comportamento das estruturas e dos materiais foram sendo melhor compreendidos, os procedimentos para o dimensionamento se tornaram mais científicos.

Entre os materiais mais utilizados nas estruturas estão a madeira, o concreto e o aço. O foco deste trabalho são as estruturas de aço. As estruturas de aço são utilizadas para as mais variadas finalidades, como pontes, galpões, edifícios residenciais e comerciais, entre outros. Na figura 1 está ilustrada uma estrutura metálica utilizada como edifício garagem.

FIGURA 1 – Edifício garagem em estrutura metálica.



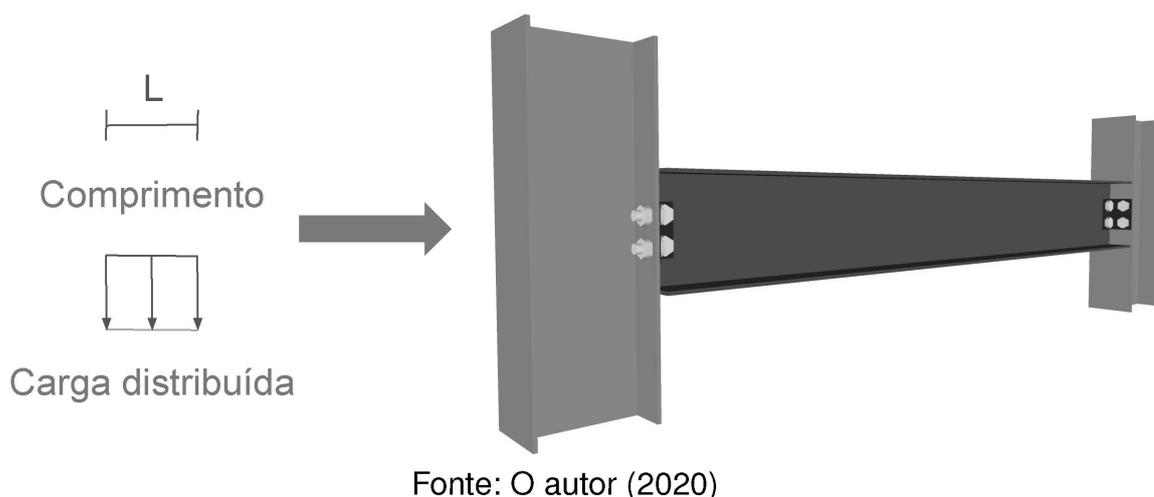
Fonte: O autor (2020)

Segundo Silva Vellasco et al. (2014), o comportamento estrutural passa pelo entendimento de uma série de fenômenos físicos relacionados com a ocorrência de estados-limites últimos. Ao longo dos últimos anos houve uma evolução considerável dos procedimentos e modelos usados no dimensionamento de estruturas metálicas e

mistas. Essa evolução foi fruto de um aumento do nível de conhecimento do comportamento estrutural que foi obtido com o uso de novas técnicas numéricas e experimentais. Entre os modelos para representar o comportamento estrutural, estão os modelos analíticos e matemáticos, os experimentais e os numéricos. Entre os modelos numéricos estão o Método de Elementos Finitos (MEF) e técnicas de inteligência computacional.

Utilizando dois dos modelos numéricos, o método de elementos finitos e as redes neurais artificiais, a proposta deste trabalho é desenvolver uma ferramenta para auxiliar no dimensionamento de vigas em estruturas metálicas como ilustrado na figura 2.

FIGURA 2 – Ilustração da ferramenta proposta com os dados de entrada (vão da viga e carga aplicada) e de saída (configuração de perfis e parafusos).



1.1 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para o auxílio no dimensionamento de vigas de estruturas metálicas que utilizam perfis estruturais laminados com seções do tipo I e H conectadas por meio de ligações do tipo cantoneira dupla a colunas de mesmo tipo de perfil. Para isso serão modeladas redes neurais artificiais utilizando os resultados obtidos da análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e critérios de dimensionamento. Na análise pelo MEF será utilizado o elemento de casca plano com efeito de placa segundo a formulação de Kirchhoff-Love.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para alcançar o objetivo principal, são:

- Implementar o método de elementos finitos utilizando o elemento de casca plano que combina os efeitos do estado plano e de placa segundo a formulação de Kirchhoff-Love.

- Modelar e analisar utilizando o método de elementos finitos configurações de vigas com perfis estruturais de seção dos tipo I e H conectados por ligações do tipo cantoneira dupla.
- Implementar as verificações de dimensionamento segundo a norma NBR 8800:2008 para o perfil da viga e os elementos da ligação.
- Modelar redes neurais para indicar as configurações para a viga e os elementos de sua ligação com a coluna.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 2 será apresentada a revisão da literatura, dividida em quatro tópicos: estruturas metálicas, mecânica dos materiais, método dos elementos finitos e aprendizado de máquina. No capítulo 3 serão apresentados a preparação do conjunto de configurações das vigas, as simulações das configurações utilizando método de elementos finitos e por fim a preparação dos dados e o treinamento das redes neurais. No capítulo 4 serão apresentados os resultados e sua validação. No capítulo 5 serão apresentadas as discussões e por fim no último capítulo serão apresentadas as considerações finais.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Como contribuição deste trabalho fica o estudo, com suas limitações, sobre a utilização de redes neurais artificiais para auxiliar no dimensionamento de vigas em estruturas metálicas. As vigas possuem perfis de seção dos tipos I e H conectadas a colunas por meio de ligações parafusadas do tipo cantoneira dupla.

2 FUNDAMENTACAO

No item 2.1 desta revisão serão apresentados conceitos de estruturas metálicas e práticas para as verificações de dimensionamento. Já no item 2.2 serão apresentados conceitos da mecânica de sólidos, como o estado plano de tensões, a formulação de placa segundo Kirchhoff Love e a obtenção de esforços resultantes a partir das tensões em uma seção. No item 2.3 será apresentada a formulação do método de elementos finitos. Por último, no item 2.4, será apresentada a revisão sobre redes neurais artificiais.

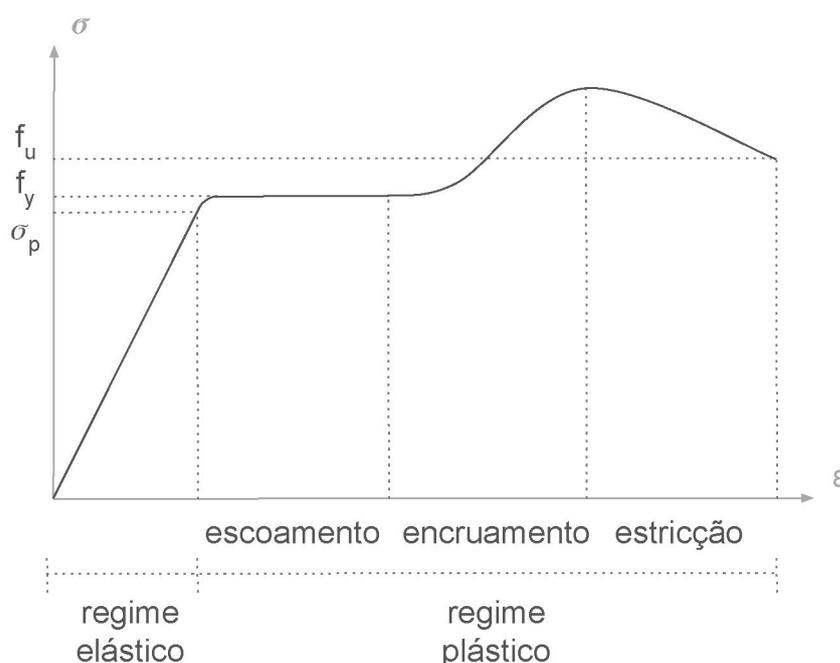
2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

Segundo Segui (2013), o dimensionamento de um elemento estrutural implica em selecionar um perfil que deve resistir às forças aplicadas de forma segura e economicamente viável. De maneira geral, se busca a menor quantidade de aço, resultando em perfis com as menores seções transversais. A determinação das seções transversais deve ser feita de maneira segura e o dimensionamento pode ser realizado por diferentes métodos. O requisito fundamental do dimensionamento de uma estrutura é que o esforço solicitante deve ser inferior à força resistente

O dimensionamento pode ser realizado pelo método das tensões máximas admissíveis ou pelo método dos estados limites. A norma brasileira ABNT (2008) para o dimensionamento de estruturas metálicas estabelece os requisitos com base no método dos estados limites. Nesse método as cargas são majoradas por coeficientes que variam de acordo com o tipo de carga, e a força resistente do elemento é minorada por um coeficiente. As cargas majoradas são as que levam a estrutura ou o elemento estrutural a seu limite. Em termos de segurança, o limite pode ser último ou de serviço. No limite último pode ocorrer fratura, escoamento ou flambagem de um elemento estrutural, já o limite de serviço pode ser, por exemplo, a deformação máxima da estrutura ou de um elemento estrutural (SEGUI, 2013).

Na figura 3 é ilustrado o gráfico de tensão deformação convencional do aço com patamar de escoamento. O primeiro trecho do gráfico é o regime elástico do material, onde a tensão é linearmente proporcional a deformação. Ao final do regime linear se inicia o escoamento do aço caracterizada pelo aumento da deformação com tensão constante, o valor da tensão ou limite de escoamento é representado por f_y e σ_p é o limite de proporcionalidade do regime linear. Ao final do regime plástico é definida a tensão de ruptura f_u (PFEIL; PFEIL, 2009).

FIGURA 3 – Gráfico tensão deformação convencional para o aço.



Fonte: O autor (2020)

As ações na estrutura podem ser do tipo permanente, variável ou excepcional. Além das ações serem ponderadas por um coeficiente de segurança, são também combinadas. As combinações podem ser para o estado limite último ou para o estado limite de serviço. As combinações do estado limite último podem ser do tipo normal, especial ou de construção. Já as combinações para o estado limite de serviço podem ser do tipo quase permanente, frequente ou rara (ABNT, 2008). A combinação do estado limite último do tipo normal e a combinação do estado limite de serviço do tipo quase permanente são calculadas por:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (2.1)$$

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (2.2)$$

onde F_k é o valor característico da ação, F_d é o valor de cálculo após a combinação das ações para o estado limite último, F_{ser} é o valor de cálculo após a combinação das ações para o estado limite de serviço, γ_{gi} é o coeficiente de ponderação de uma ação permanente, $F_{Gi,k}$ é o valor característico da ação permanente, γ_{q1} é o coeficiente de ponderação da ação variável principal, $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal, Ψ_{0j} é o fator de combinação de uma ação variável secundária,

γ_{qj} é o coeficiente de ponderação de uma ação variável secundária, $F_{Qj,k}$ é o valor característico de uma ação variável secundária e Ψ_{2j} é o fator de combinação de uma ação variável para valores quase permanentes.

2.1.1 Dimensionamento de um elemento

As verificações que devem ser realizadas durante o dimensionamento de um elemento de estrutura metálica são devidos aos esforços axiais de tração ou compressão, esforço cortante e momento fletor e ou momento torsor, e quando atuam esforços combinados. O elemento também deve ser verificado quanto às instabilidades, tanto locais como globais.

a) Tração

Para um elemento submetido a esforços de tração, segundo Segui (2013), qualquer seção transversal pode ser utilizada pois para qualquer material o único fator determinante para a resistência é a área da seção transversal. O elemento pode falhar ao atingir um dos dois limites: grandes deformações ou fratura. Para prevenir as grandes deformações, iniciadas pelo escoamento da seção, a força solicitante na área bruta deve ser menor que a tensão de escoamento do aço, já para prevenir a fratura, a tensão na área líquida deve ser menor que a tensão de ruptura do aço.

Quando o elemento é ligado utilizando parafusos ou rebites, são necessários furos no perfil. Como resultado, a área da seção transversal é reduzida e a resistência do elemento também pode ser reduzida dependendo do tamanho e da posição dos furos. Além da redução da área da seção transversal, os furos causam também concentração de tensões, o que pode causar escoamento localizado resultando na fratura da seção líquida. Tradicionalmente é utilizado uma margem de segurança maior quando considera-se a ruptura de seção líquida (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2008).

Segundo a ABNT (2008), deve ser atendida a condição que a força axial de tração solicitante de cálculo $N_{t,Sd}$ deve ser menor ou igual a força axial de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$. A força axial resistente é calculada para o escoamento da seção bruta e para a ruptura da seção líquida por:

$$N_{t,Rd}^{ESB} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.3)$$

$$N_{t,Rd}^{RSL} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.4)$$

onde f_y é a tensão de escoamento do aço, f_u é a tensão de ruptura do aço, A_g é a área bruta da seção transversal do perfil, A_e é a área líquida efetiva da seção transversal do perfil, $N_{t,Rd}^{ESB}$ é a força axial de tração resistente de cálculo para escoamento da

seção bruta e $N_{t,Rd}^{RSL}$ é a força axial de tração resistente de cálculo para ruptura da seção líquida. O γ_{a1} é o coeficiente de ponderação de resistência para o escoamento, flambagem ou instabilidade e γ_{a2} . Os valores destes coeficientes estão apresentados na tabela da figura 4.

FIGURA 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

Combinações	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: (ABNT, 2008).

Para o cálculo da força axial resistente de cálculo para a ruptura da seção líquida, é necessário o cálculo da área líquida efetiva A_e . A área líquida efetiva pode ser calculada de acordo com o item 5.2.3 da ABNT (2008).

b) Compressão

Elementos comprimidos são aqueles que estão sujeitos à compressão axial em que as forças solicitantes são aplicadas no eixo longitudinal do centro de torção da seção transversal. A tensão a que o elemento está submetido é considerada uniforme na seção transversal (SEGUI, 2013). O elemento pode falhar pelo escoamento da seção bruta, flambagem local e/ou flambagem global. A flambagem global pode ser por flexão ou flexotorção.

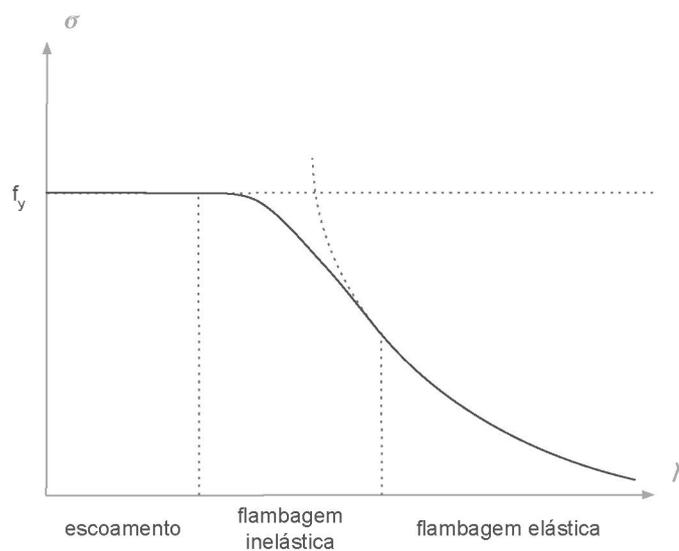
O mecanismo de falha do elemento depende de sua esbeltez. Se o elemento não for esbelto, é maior a probabilidade de ocorrer o escoamento da seção bruta, já se o elemento for muito esbelto é maior a chance de ocorrer a flambagem global.

Quando ocorre a flambagem por flexão, a força máxima solicitante que torna instável o elemento é chamada de carga crítica de flambagem inelástica de Euler P_{cr} . A carga crítica, ou carga crítica de Euler, considera somente o comportamento elástico do material e pode ser calculada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.5)$$

sendo que L é o comprimento de flambagem, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia. Dependendo das condições do elemento e de sua esbelteza, a falha ocorre por flambagem mas quando somente parte da seção transversal sofre escoamento. Essa situação é denominada flambagem inelástica. Quando a esbelteza for grande a resistência será dada pela carga crítica de euler (flambagem elástica), quando a esbelteza for pequena a resistência será dada pelo escoamento e para os casos intermediários deverá ser utilizada uma curva representando a flambagem inelástica (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2008). Estas situações estão ilustradas na figura 5.

FIGURA 5 – Curva relacionando a resistência à compressão σ_c e esbelteza λ .



Fonte: O autor (2020)

Segundo a norma ABNT (2008), a força axial de compressão solicitante de cálculo $N_{c,Sd}$ deve ser menor ou igual à força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ que pode ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.6)$$

O fator de redução associado à resistência compressão χ é calculado por:

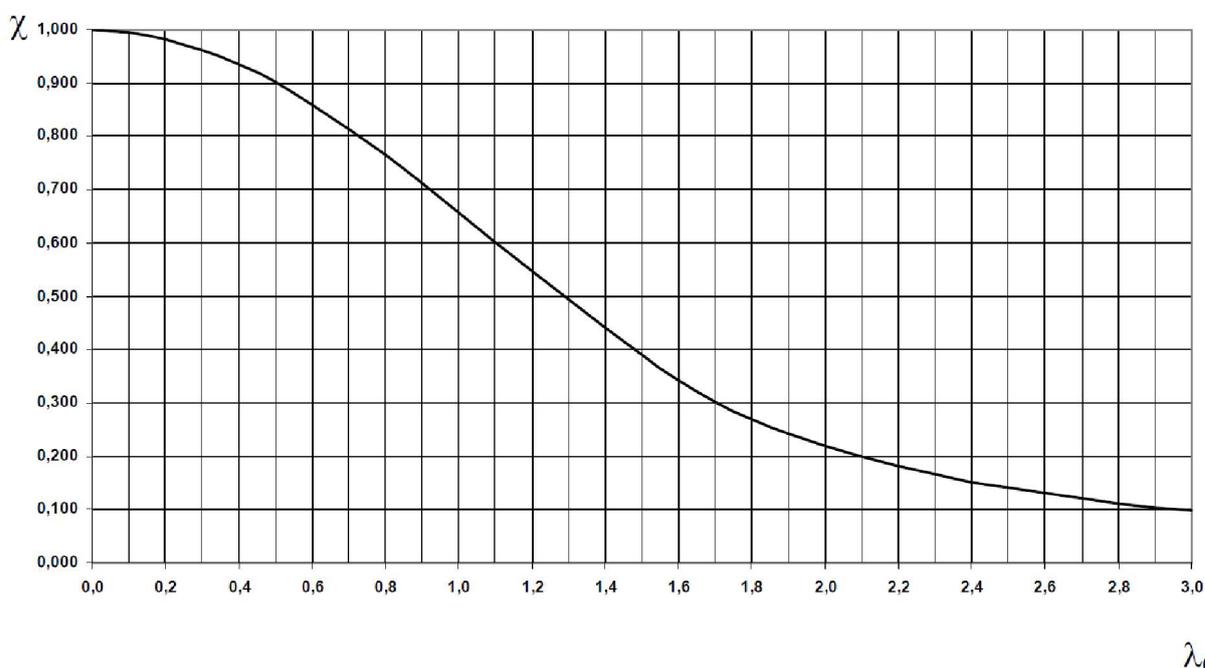
$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2, & \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2}, & \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (2.7)$$

sendo que λ_0 é o índice de esbelteza calculado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (2.8)$$

onde Q é o fator de redução total associado à flambagem local que pode ser calculado conforme anexo F da ABNT (2008) e N_e é a força axial de flambagem elástica que pode ser calculada pelo anexo E. O gráfico da curva do fator de redução χ está ilustrado na figura 6.

FIGURA 6 – Curva do fator de redução χ em função do índice de esbeltez λ_0

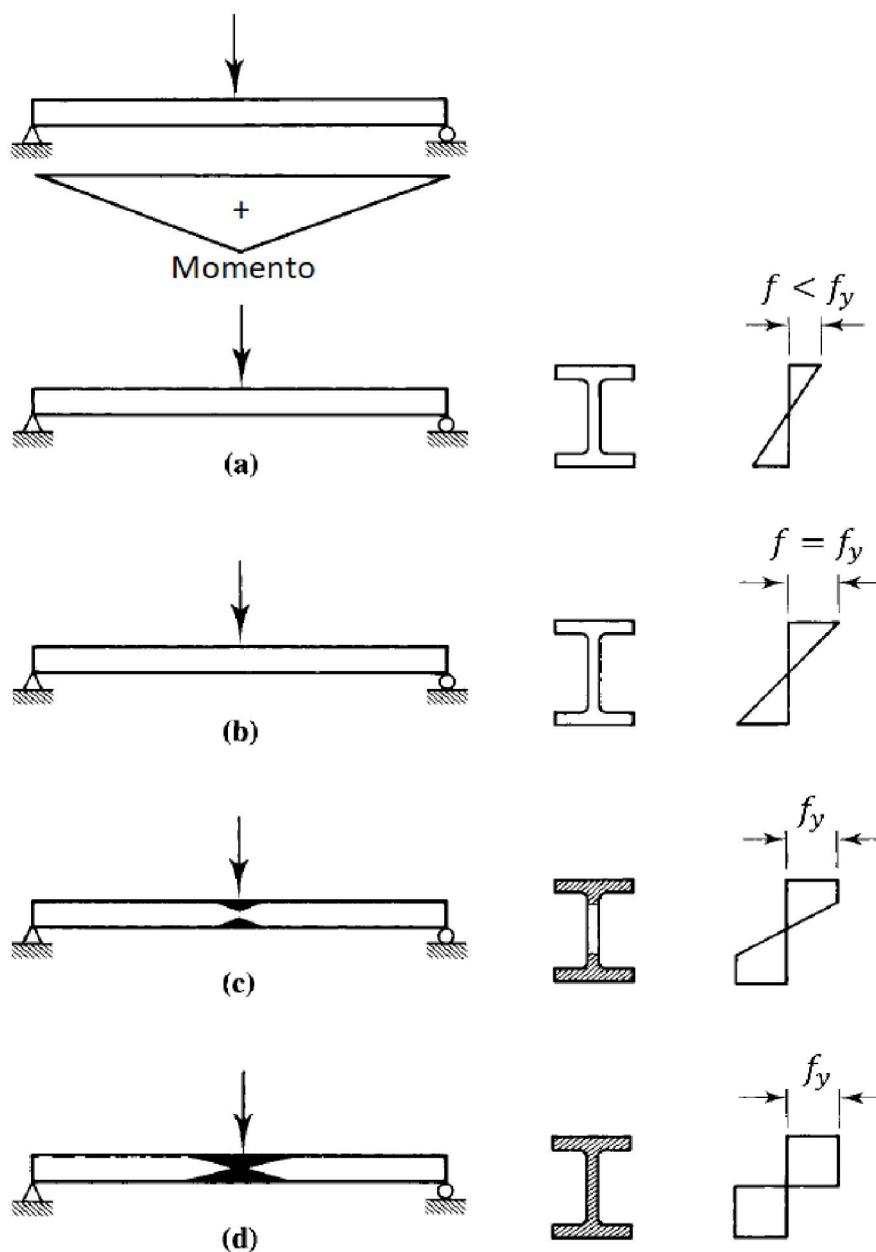


Fonte: ABNT (2008)

c) Flexão

Segundo Segui (2013), para se determinar o momento resistente nominal de uma seção de um elemento, é necessário entender o comportamento do elemento para os vários estágios durante o carregamento, desde as cargas pequenas até o colapso. No primeiro estágio de solicitação (figura 7a), a tensão máxima tanto na parte superior como na parte inferior são iguais e são menores que a tensão de escoamento do aço. Ao aumentar um pouco a solicitação, as tensões nas extremidades se igualam à tensão de escoamento, nesse estágio a seção atinge o momento resistente elástico máximo M_{el} (figura 7b). Aumentando a solicitação o elemento atinge o próximo estágio (figura 7c), a distribuição de tensões na seção transversal deixa de ser linear e as fibras próximas à extremidade iniciam o escoamento. Ao mesmo tempo a região submetida ao escoamento aumenta em direção dos apoios, no eixo longitudinal do elemento. No último estágio (figura 7d), toda a seção atinge a tensão de escoamento, atingindo o momento resistente plástico máximo M_{pl} . Ao atingir esse estágio qualquer aumento na solicitação irá causar o colapso, porque nesse estágio é formada uma rótula plástica no centro do elemento no caso de uma viga simplesmente apoiada.

FIGURA 7 – Estágios de um elemento solicitado a flexão.



Fonte: Adaptado de Segui (2013)

De acordo com o nível de plastificação da seção, a ABNT (2008) classifica as seções em compactas, semicompactas e esbeltas. As seções compactas são aquelas em que atingem o momento de plastificação total M_{pl} , já as seções semicompactas são aquelas que ocorre flambagem local após plastificação parcial da seção. Por último estão as seções esbeltas, nesse caso a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento resistente elástico máximo M_{el} .

Segundo a ABNT (2008), para as seções I e H com dois eixos de simetria, o momento resistente de cálculo é determinado em função da classificação da seção

conforme:

$$M_{Rd} \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & \text{se } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & \text{se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & \text{se } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (2.9)$$

Os valores de λ , λ_p , λ_r , M_r e M_{cr} devem ser calculados de acordo com o anexo G da ABNT (2008).

d) Cortante

O dimensionamento do elemento quando submetido ao esforço cortante depende principalmente do tipo do carregamento transversal, que pode ser distribuído ou concentrado. No caso de carregamento distribuído a verificação é feita de forma global no perfil de acordo com os valores máximos do diagrama de esforço cortante. Para carregamento concentrado, a verificação é local e a resistência é comparada diretamente ao carregamento aplicado. A resistência ao cisalhamento é sempre dada pelos elementos da seção que são paralelos à direção do carregamento (ARGENTA, 2016).

Segundo a ABNT (2008) a força cortante solicitante de cálculo V_{Sd} deve ser menor ou igual a força cortante resistente de cálculo V_{Rd} . Para perfis I ou H, fletidas em relação ao eixo paralelo às mesas, o esforço cortante resistente V_{Rd} pode ser calculado por:

$$V_{Rd} \begin{cases} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ 1, 24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (2.10)$$

onde os valores de λ , λ_p e λ_r podem ser calculados por:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{t_w} \\ \lambda_p &= 1, 10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \\ \lambda_r &= 1, 37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

onde h é a altura da alma do perfil, t_w é a espessura da alma do perfil e k_v é o coeficiente que modifica os valores de λ_p e λ_r em função da existência ou não de enrijecedores e

pode ser calculado de acordo com:

$$k_v = \begin{cases} 5 & \text{para almas sem enrijecedores transversais} \\ 5 & \text{caso } \frac{a}{h} > \left(\frac{260t_w}{h}\right)^2 \\ 5 + \frac{5h^2}{a^2} & \text{para todos os outros casos} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde h é a altura da alma do perfil e a é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes. O valor da força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento V_{pl} é calculado:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (2.13)$$

onde A_w é a área efetiva de cisalhamento, função da geometria da seção transversal e para os perfis I e H pode ser calculada como:

$$A_w = dt_w \quad (2.14)$$

onde d é a altura do perfil e t_w a espessura da alma do perfil. Se o perfil não verificar a condição de segurança tanto para cargas distribuídas quanto para concentradas, existe a possibilidade de acrescentar enrijecedores para aumentar a resistência ao cisalhamento (ARGENTA, 2016).

e) Combinação de esforços

Em muitos casos os elementos estruturais podem ser tratados como submetidos apenas a esforços axiais ou somente com esforços de flexão, isso porque os efeitos secundários são pequenos. Porém, para alguns elementos estruturais os efeitos devido aos esforços axiais e de flexão devem ser considerados simultaneamente (SEGUI, 2013).

Uma forma de considerar esse tipo de situação é utilizar equações de interação. De maneira geral a relação entre a força solicitante F_S e a força resistente F_R pode ser representada por:

$$\frac{F_S}{F_R} \leq 1,00 \quad (2.15)$$

Segundo a ABNT (2008), para elementos submetidos a momentos fletores e força axial deve ser atendida a equação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,20$$

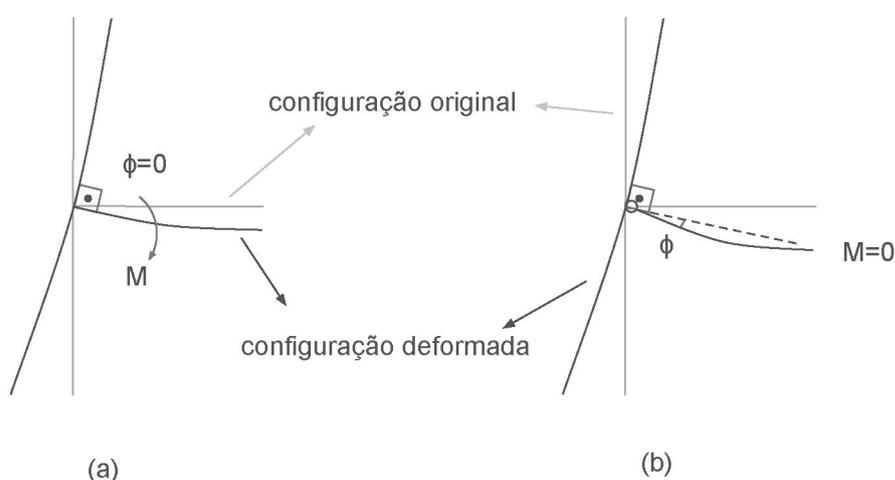
$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,20 \quad (2.16)$$

2.1.2 Ligações em estruturas metálicas

As peças metálicas são fabricadas com dimensões transversais limitadas pela capacidade dos laminadores e com comprimentos limitados pela capacidade dos veículos de transporte. Por esse motivo, as estruturas de aço são formadas pela associação de peças ligadas entre si, e essas uniões tem uma importância fundamental no dimensionamento desse tipo de estrutura. Os dois principais meios de ligação são por conectores ou por solda. Por muito tempo o rebite foi o tipo de conector mais utilizado, porém a tendência moderna é utilizar solda na fabricação das peças e parafusos nas ligações executadas no canteiro de obras (PFEIL; PFEIL, 2009).

O comportamento de uma estrutura com peças individuais, como as estruturas metálicas, dependem essencialmente do comportamento das ligações. Existem dois tipos ideais de comportamento das ligações, como ilustra a figura 8. O primeiro caso é a ligação perfeitamente rígida, que impede completamente a rotação relativa entre a viga e o pilar. Já o segundo caso é a ligação flexível, em que a ligação pode ser representada por uma rótula, deixando totalmente livre a rotação relativa entre as duas peças (PFEIL; PFEIL, 2009).

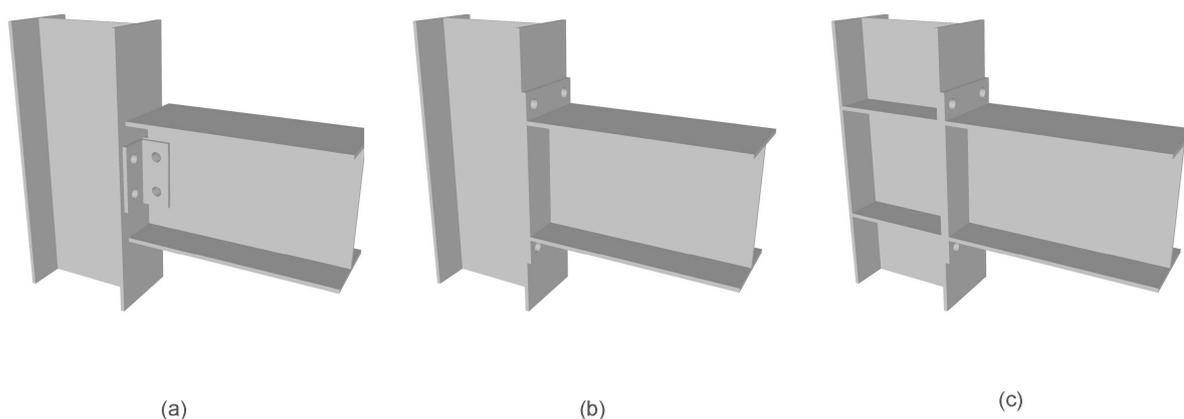
FIGURA 8 – Ligações ideais: (a) ligação perfeitamente rígida; (b) ligação rotulada.



Fonte: O autor (2020)

Na prática, dependendo de como a ligação é montada ela pode se aproximar mais de um caso ideal do que do outro. Um exemplo de ligação que se aproxima do comportamento rotulado é a ligação entre viga e pilar por meio de cantoneiras duplas ligadas pela alma da viga (figura 9a). Já ligações com chapa de topo e com a presença de enrijecedores tem um comportamento mais próximo de uma ligação perfeitamente rígida (figura 9c). Existem também as ligações semirrígidas, que possuem comportamento intermediário entre os casos ideais, por exemplo a ligação utilizando chapa de topo sem enrijecedores na coluna (figura 9b) (PFEIL; PFEIL, 2009).

FIGURA 9 – Tipos de ligação viga-coluna: (a) ligação cantoneira dupla, (b) chapa de topo, (c) chapa de topo com enrijecedores



Fonte: O autor (2020)

2.1.3 Ligações parafusadas

Em ligações parafusadas, entre os conectores utilizados estão os parafusos comuns e os parafusos de alta resistência. Os parafusos comuns são forjados com aços com baixo teor de carbono, seguindo em geral a especificação ASTM A307. O parafuso é formado pelo fuste, pela cabeça e pela porca. Por mais que o aperto mobilize o atrito entre as chapas, somente são consideradas as resistências de corte ou tração do parafuso. Já os parafusos de alta resistência são fabricados com aços tratados termicamente, sendo um dos mais utilizados o aço ASTM A325. Os parafusos de alta resistência podem ser instalados com protensão inicial, garantindo a consideração do atrito durante os cálculos. Quando se deseja impedir qualquer movimentação entre as chapas de conexão, o dimensionamento é feito contra o deslizamento, obtendo-se uma ligação por atrito (PFEIL; PFEIL, 2009). Portanto as ligações podem ser classificadas em ligações por contato ou por atrito.

Nas ligações por contato o esforço é transmitido entre os elementos da ligação através do contato entre o fuste do parafuso e a parede do furo. Para que isso ocorra é necessário que a borda do furo da chapa se apóie no fuste do parafuso. No parafuso

a força aplicada pela chapa irá causar tensões de cisalhamento. Na chapa a força aplicada devido ao contato irá gerar uma tensão de contato, a qual é utilizada para verificar o esmagamento da chapa (ARGENTA, 2016).

Já nas ligações por atrito os parafusos são montados com uma carga de pro-tensão de modo que se desenvolve uma elevada pressão entre as peças na superfície de contato. Ao tentar deslizar uma peça sobre a outra se desenvolve na superfície de contato uma tensão de atrito que impede o escorregamento das peças e garante o funcionamento da ligação (ARGENTA, 2016).

As ligações de atrito são indicadas para carregamentos dinâmicos e para o caso onde o deslizamento da ligação entre as partes conectadas possa afetar o comportamento previsto para a estrutura, já as ligações por contato são indicadas para carregamentos predominantemente estáticos, onde um eventual deslizamento entre as partes conectadas não afete a vida útil dos parafusos e da própria ligação e nem o comportamento global da estrutura (ARGENTA, 2016).

Os conectores são instalados em furos feitos nas chapas, e a execução dos furos é onerosa tornando-se necessária a padronização de dimensões. O furo padrão para parafusos comuns deverá ter uma folga de 1,5 mm em relação ao diâmetro nominal do parafuso (PFEIL; PFEIL, 2009).

Uma prática comum para a verificação do dimensionamento de ligações em estruturas metálicas é seguir as equações da norma ABNT (2008). Para as ligações parafusadas por contato, são verificados a resistência do parafuso ao cisalhamento, resistência do parafuso a tração, resistência à pressão de contato do parafuso com a borda do furo, colapso por rasgamento e o efeito alavanca. A norma também indica os espaçamentos mínimos e máximos entre parafusos e entre os parafusos e a borda da chapa.

A força de cisalhamento resistente de cálculo $F_{v,Rd}$ de um parafuso é calculada de acordo com:

$$F_{v,Rd} = \frac{C_{pc} A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (2.17)$$

onde $F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso, f_{ub} é a tensão de ruptura do material do parafuso e C_{pc} é o coeficiente em função da posição do plano de corte no parafuso e A_b é área da seção transversal do parafuso.

O valor de C_{pc} é igual a 0,4 para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação. O valor do C_{pc} é igual a 0,5 para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas quando o plano de corte não passa pela rosca (ARGENTA,

2016).

A força de tração resistente de cálculo de um parafuso é calculada de acordo com:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,75A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (2.18)$$

onde $F_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo do parafuso.

A força resistente de cálculo do contato do parafuso com a borda do furo, considerando o rasgamento entre dois furos consecutivos ou um furo e a borda, pode ser calculada utilizando:

$$F_{c,Rd} = \frac{C_{pl} l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.19)$$

onde l_f é a distância na direção da força entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre, d_b é o diâmetro do parafuso, t é a espessura do elemento que está sendo conectado, C_{pl} é o coeficiente de resistência do elemento conectado em função do tipo de furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço e C_{fp} é o coeficiente de resistência do fuste do parafuso em função do tipo de furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço. Os valores de C_{pl} e C_{fp} são (ARGENTA, 2016):

$C_{pl} = 1,2$ e $C_{fp} = 2,4$: Furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força e quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto;

$C_{pl} = 1,5$ e $C_{fp} = 3,0$: Furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força e quando a deformação no furo para forças de serviço não for uma limitação de projeto;

$C_{pl} = 1,0$ e $C_{fp} = 2,0$: Furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força e quando a deformação no furo para forças de serviço não for uma limitação de projeto;

No estado limite de colapso por rasgamento, a força resistente de cálculo $F_{r,Rd}$ é determinada pela força resistente de cisalhamento e pela força resistente de tração de uma ou mais linhas de ruptura. Esse limite deve ser verificado junto a ligações em extremidades. O valor da força pode ser calculado por:

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq F_{Sd} \quad (2.20)$$

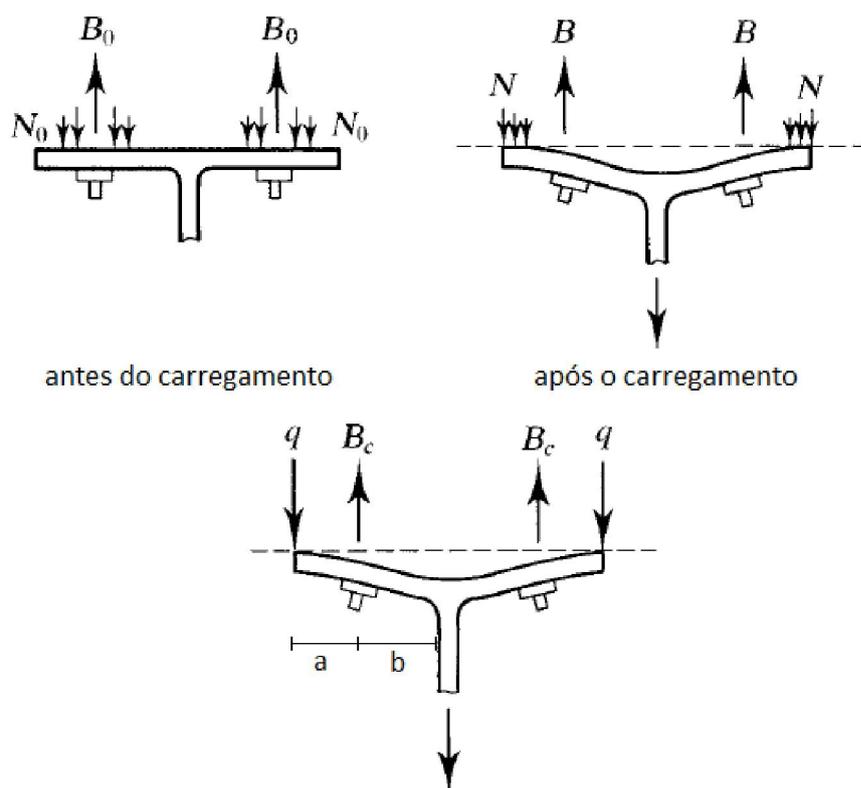
onde A_{nv} é a área líquida sujeita a cisalhamento, A_{nt} é a área líquida sujeita a tração, A_{gv} é a área bruta sujeita a cisalhamento e C_{ts} é o coeficiente em função da distribuição da tensão de tração na área líquida.

Em muitos casos de ligação com conectores que estão sujeitos a forças axiais de tração, a flexibilidade dos elementos da ligação pode resultar em deformações que aumentam a tensão solicitante nos conectores. O aumento do esforço solicitante é denominado efeito alavanca. A medida em que a carga é aplicada, ocorre a redistribuição dos esforços como mostra a figura 10, provocando o aumento da força B_0 para B . O valor máximo do esforço q devido a esse efeito irá ocorrer enquanto as extremidades estiverem em contato com o elemento de suporte. A força axial de tração final em cada parafuso pode ser calculada de acordo com:

$$F_{t,Sd} = \frac{N_{t,Sd}}{n_p} f_u A_{nt} \left[1 + \frac{\alpha \delta}{(1 + \alpha \delta)} \frac{b}{a} \right] \quad (2.21)$$

onde n_p é o número de parafusos tracionados na ligação, α é a relação entre o momento M_2 gerado pelo efeito alavanca no parafuso e o momento M_1 gerado pelo efeito alavanca na face da alma do perfil, $\delta = A_e/A_g$ é a relação entre a área líquida do perfil e a área bruta e a e b são distâncias de acordo com a figura 10. Os espaçamentos mínimos e máximos são definidos no item 6.3.9 da ABNT (2008).

FIGURA 10 – Efeito alavanca em ligações tracionadas.



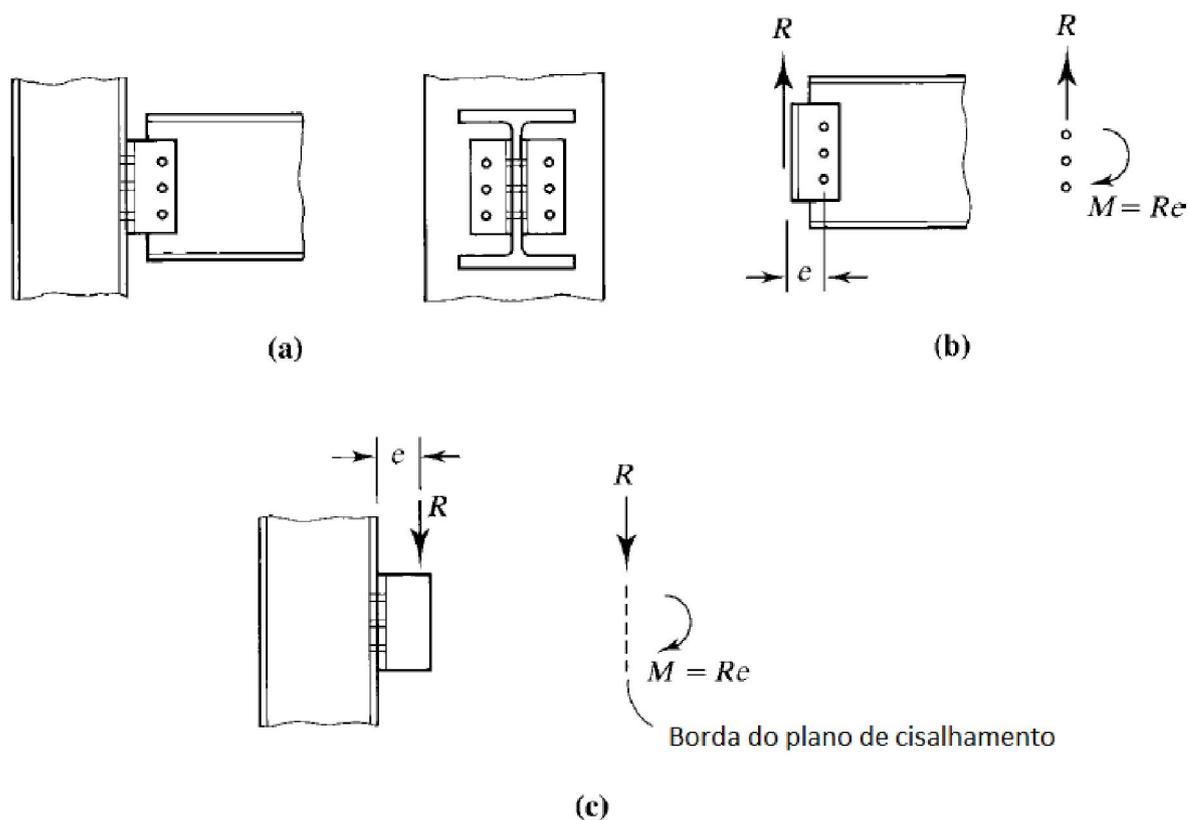
Fonte: Adaptado de Segui (2013)

a) Ligações excêntricas

Uma ligação excêntrica ocorre quando a resultante das forças aplicadas não passa no centro de gravidade dos conectores. A excentricidade e de uma ligação é definida como a distância perpendicular entre a linha de ação da força e o centro de gravidade da ligação.

Considerando a ligação representada na figura 11a, há dois tipos de ligação excêntrica. A primeira é entre a viga e as cantoneiras, nesse tipo atua somente o cisalhamento nos parafusos, ou seja uma ligação excêntrica por corte. Já no segundo caso, entre as cantoneiras e a coluna, atua no parafuso esforço axial e cortante e é definido como uma ligação excêntrica por flexão.

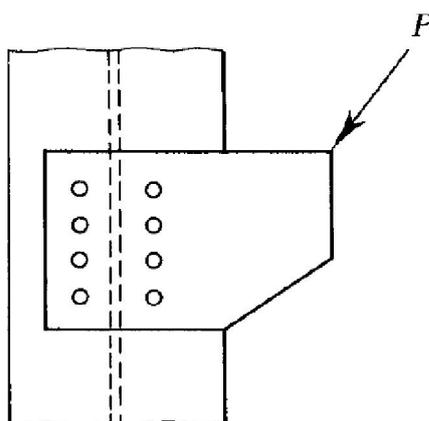
FIGURA 11 – Ilustração de uma ligação excêntrica.



Fonte: Adaptado de Segui (2013)

Para as ligações excêntricas por corte ilustradas pela figura 12 existem dois métodos para a solução, pela análise elástica ou pela resistência última. Na análise elástica é considerado que cada parafuso resiste uma parcela igual de carga, o procedimento para essa análise é simples, porém não é muito preciso, pois é considerado que a relação de carga-deformação no parafuso é linear e a resistência de escoamento não é ultrapassada. O procedimento para análise pela resistência última foi obtida de forma experimental, resultando em uma relação não linear entre a carga e a deformação de forma individual para o parafuso. As hipóteses adotadas foram que durante a falha o grupo de parafusos rotaciona em torno de um centro instantâneo (IC), a deformação em cada parafuso é proporcional a sua distância em relação ao IC, a resistência da ligação acontece quando o parafuso mais distante do IC atinge a resistência última e que as partes conectadas se mantêm rígidas. No capítulo 8 de Segui (2013) é apresentado de forma detalhada o cálculo para os dois métodos.

FIGURA 12 – Ilustração de uma ligação excêntrica por corte.



Fonte: Segui (2013)

No caso de ligações excêntricas por flexão, ilustrado pela figura 11a, a aplicação da carga causa um momento que aumenta a carga axial nos parafusos. Se os parafusos não são pré tensionados, os parafusos superiores vão estar sujeitos a tração, enquanto que os inferiores não serão afetados. Já para parafusos pré tensionados, a área de contato entre a viga e as cantoneiras está sujeita à compressão, a medida que a carga aumenta a tensão de compressão na parte superior de contato diminui, enquanto que na parte inferior a tensão aumenta. Independente do caso, cada parafuso irá resistir a mesma parcela do esforço cortante. Da mesma forma que para a ligação excêntrica por corte, Segui (2013) apresenta de forma detalhada o cálculo para esse tipo de ligação.

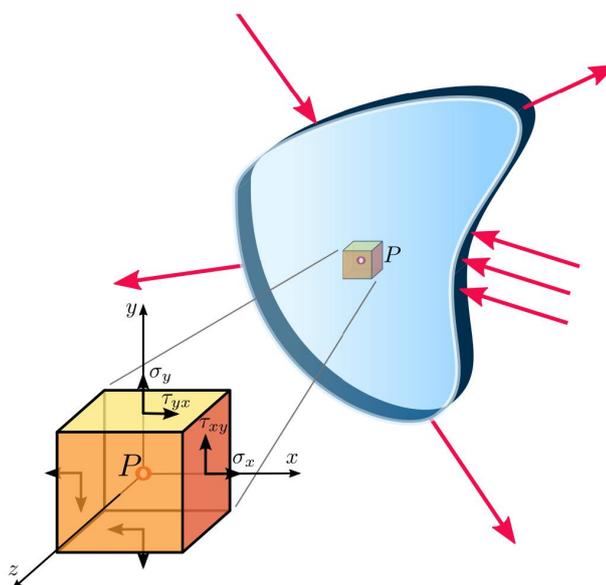
2.2 MECÂNICA DOS SÓLIDOS

Nesta seção será apresentada a teoria do estado plano e de placa segundo a formulação de Kirchhoff-Love que serão utilizadas para o elemento plano que será utilizado no método de elementos finitos. Ainda serão apresentados os conceitos de tensões principais, critério de ruptura e obtenção de esforços resultantes a partir de tensões para uma seção.

2.2.1 Estado Plano de Tensão

Considerando um sólido isotrópico em que duas dimensões são muito maiores do que a outra e que as ações atuam somente no plano médio da superfície, como ilustra a figura 13. As tensões atuantes no sólido podem ser representadas pelo estado plano de tensão, nesse estado as tensões σ_x e σ_y no plano da superfície são diferentes de zero, enquanto que a tensão σ_z é igual a zero. Já a tensão cisalhante τ_{xy} é diferente de zero, enquanto que as tensões cisalhantes τ_{xz} e τ_{yz} são iguais a zero (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2003).

FIGURA 13 – Sólido submetido ao estado plano de tensões.



Fonte: Sanpaz (2009).

Considerando que o campo de deslocamentos no plano é formado pelos deslocamentos u na direção x e v na direção y , a deformação total de um ponto qualquer, representado pelo vetor ϵ , que contribui para o trabalho interno é dado por:

$$\epsilon = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

e utilizando a lei de Hooke, as componentes do vetor de deformação ϵ podem ser escritas de como:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} \\ \epsilon_y &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E}\end{aligned}\quad (2.23)$$

sendo que ν é o coeficiente de Poisson. Isolando as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} pode se obter:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}\quad (2.24)$$

em que pode ser simplificado para:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\epsilon}\quad (2.25)$$

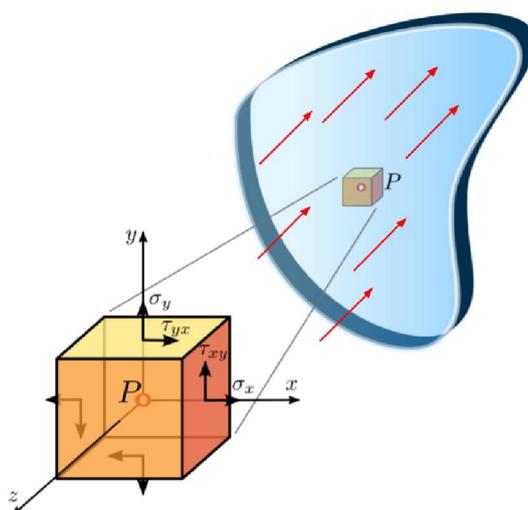
sendo que a matriz de relações constitutivas \mathbf{D} para o regime elástico linear pode ser definida por:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}\quad (2.26)$$

2.2.2 Placa de Kirchhoff-Love

Um sólido é definido como placa quando uma de suas dimensões é muito menor que as outras duas dimensões e está sujeito somente a cargas transversais a sua superfície média, como ilustra a figura 14.

FIGURA 14 – Ilustração de uma placa.



Fonte: Adaptado de Sanpaz (2009).

As duas principais teorias de placa são a de Kirchhoff-Love, também conhecida como a teoria clássica de placas, e a de Reissner-Mindlin. Segundo a teoria de Kirchhoff-Love, após a deformação, um plano perpendicular a superfície média irá permanecer plano e perpendicular a deformada da superfície média, de forma análoga à teoria de Euler-Bernoulli para vigas. De forma semelhante à teoria de viga, a teoria de placa também não considera a deformação pelo esforço cortante. Já na teoria de Reissner Mindlin, uma reta normal à superfície média indeformada permanece reta após a deformação, porém não necessariamente normal a superfície média (BATHE, 2016). Segundo Jawad (2004) as hipóteses adotadas para a placa são:

- Uma placa é considerada fina se a sua espessura é pequena em relação as demais dimensões;
- As cargas são aplicadas de forma perpendicular a superfície média da placa;
- A placa sofre apenas pequenas deformações, que são definidas como menores que a sua espessura;
- A placa é simétrica em relação à superfície média;
- O material é isotrópico e homogêneo.

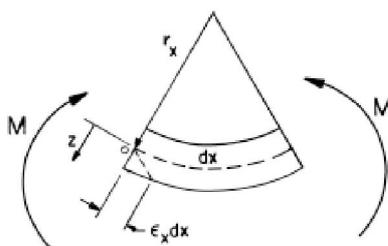
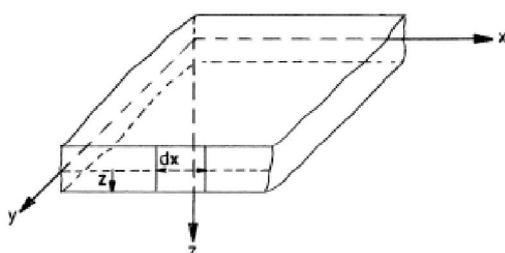
O campo de deslocamento transversal w em uma placa pode ser definido como função das coordenadas (x, y, z) , porém, devido ao comportamento de flexão

e espessura pequena, o campo de deslocamentos pode ser considerado apenas em relação as coordenadas (x, y) :

$$w(x, y, z) \approx w(x, y) \quad (2.27)$$

A formulação que será apresentada a seguir segue o apresentado por Jawad (2004). A relação entre a deformação e o deslocamento transversal w de uma placa fina pode ser obtida de forma geométrica (JAWAD, 2004). A relação está ilustrada pela figura 15.

FIGURA 15 – Flexão de uma placa retangular.



Fonte: Jawad (2004)

A variação de um comprimento distante z da superfície média é obtido por:

$$\frac{dx}{r_x} = \frac{dx + \epsilon_x dx}{r_x + z} \quad (2.28)$$

sendo que pode ser simplificada para a equação:

$$\epsilon_x = \frac{z}{r_x} \quad (2.29)$$

Considerando que a curvatura χ_x da deformada da superfície média está relacionada ao raio de curvatura pela relação $\chi_x = 1/r_x$ e que curvatura é considerada

positiva se a concavidade está para baixo, a equação 2.29 pode ser reescrita como:

$$\epsilon_x = \chi_x z \quad (2.30)$$

De forma similar, para a direção y se obtém as relações:

$$\epsilon_y = \frac{z}{r_y} \quad (2.31)$$

$$\epsilon_y = \chi_y z \quad (2.32)$$

A curvatura χ_x é relacionada com o deslocamento transversal w e a derivada dw/dx por:

$$\chi_x = -\frac{d^2 w}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (2.33)$$

Para um pequeno deslocamento w , o valor da derivada $(dw/dx)^2$ pode ser desprezado e a equação 2.33 pode ser simplificada para:

$$\chi_x = -\frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.34)$$

e de forma semelhante para a direção y obtém-se:

$$\chi_y = -\frac{d^2 w}{dy^2} \quad (2.35)$$

Substituindo as equações 2.34 e 2.35 nas equações 2.30 e 2.32, é obtido para as deformações ϵ_x e ϵ_y :

$$\epsilon_x = -z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.36)$$

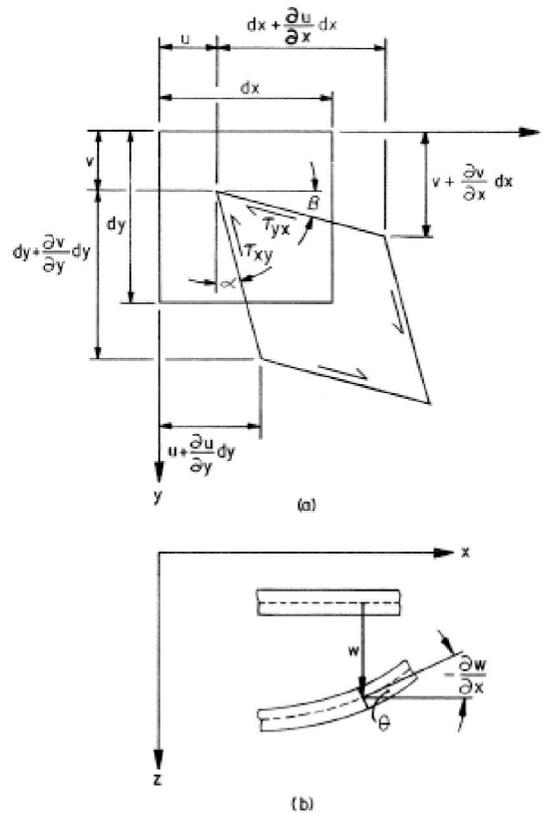
$$\epsilon_y = -z \frac{d^2 w}{dy^2} \quad (2.37)$$

Considerando um elemento infinitesimal de comprimentos dx e dy que está sujeito a uma deformação por cisalhamento no plano da superfície média como ilustra a figura 16, os valores α e β para pequenas deformações podem ser aproximados para as relações:

$$\alpha = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.38)$$

$$\beta = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.39)$$

FIGURA 16 – Flexão de uma placa retangular.



Fonte: Jawad (2004)

Dessa forma, a deformação γ_{xy} pode ser definida por:

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.40)$$

sendo que $u = -z \partial w / \partial x$ e $v = -z \partial w / \partial y$.

Agrupando as deformações ϵ_x (2.36), ϵ_y (2.37) e γ_{xy} (2.40) em um vetor:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} w \quad (2.41)$$

Considerando um material isotrópico elástico linear, as tensões podem ser

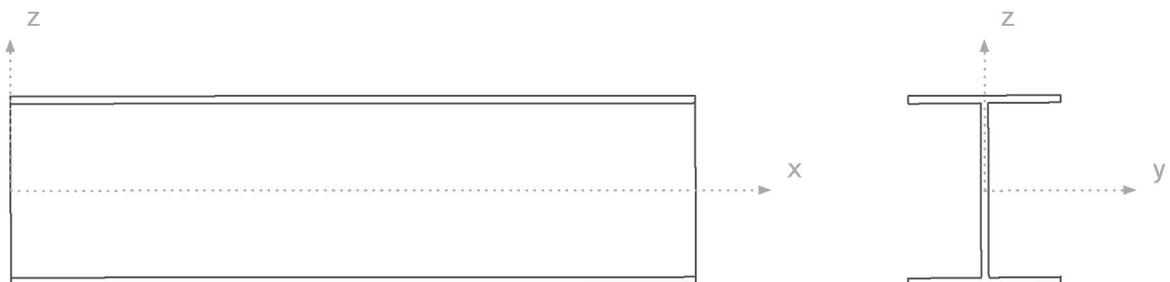
calculadas utilizando a matriz de relações constitutivas D de acordo:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

2.2.3 Resultante dos esforços em uma seção

Os valores de esforços de uma seção transversal de um elemento qualquer podem ser calculados utilizando os valores das tensões nessa seção. Considera-se aqui que o eixo longitudinal do elemento é o eixo x e a seção transversal está no plano yz como ilustra a figura 17.

FIGURA 17 – Posicionamento do perfil segundo os eixos.



Fonte: O autor (2020)

O valor do esforço axial pode ser calculado pela integral da parcela constante da tensão na área da seção transversal:

$$N = \int_A \sigma_x dA \quad (2.43)$$

Já o valor do momento fletor pode ser calculado pela integral da parcela da tensão devido à flexão pela à área da seção transversal. O valor do momento em torno do eixo y e o valor do momento em torno do eixo z podem ser calculados por:

$$M_y = \int_A z \sigma_x dA \quad (2.44)$$

$$M_z = \int_A y \sigma_x dA \quad (2.45)$$

O valor do esforço cortante pode ser calculado pela integral da tensão cisalhante na área seção transversal (2.46).

$$Q_z = \int_A \tau_{xz} dA \quad (2.46)$$

2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Nessa seção serão apresentados conceitos do método de elementos finitos e a formulação dos elementos que foram utilizados na análise das configurações de viga. Primeiro serão apresentados conceitos iniciais do método de elementos finitos, em seguida a formulação do elemento quadrilateral plano que foi utilizado para a modelagem dos perfis e o elemento de pórtico que foi utilizado para a modelagem do parafuso. Por fim, será apresentada a matriz de rotação entre o sistema de coordenadas locais e o sistema de coordenadas globais.

2.3.1 Conceitos iniciais

Segundo o princípio dos trabalhos virtuais ou princípio dos deslocamentos virtuais, quando é imposto um pequeno deslocamento a um corpo, o equilíbrio é garantido se o trabalho virtual interno causado pelas deformações internas for igual ao trabalho externo causado pelas cargas externas. De forma geral, o princípio pode ser representado (BATHE, 2016):

$$W_i = W_e$$

$$\int_V \delta \epsilon \sigma dV = \int_V \delta u p dV + \int_S \delta u q dS \quad (2.47)$$

onde V é o volume do corpo, S é a superfície do corpo, $\delta \epsilon$ são as deformações virtuais, δu são os deslocamentos virtuais, σ as tensões que o corpo está submetido, p são as forças de volume e q as forças de superfície aplicadas no corpo.

Considerando os deslocamentos nodais u^e de um elemento qualquer, o campo de deslocamentos u de um corpo pode ser interpolado utilizando a matriz das funções de forma N por:

$$u = N u^e \quad (2.48)$$

O vetor de deformações ϵ pode ser calculado multiplicando a matriz de operadores diferenciais L pelo vetor de deslocamentos u :

$$\epsilon = L u \quad (2.49)$$

O vetor de tensões σ pode ser calculado multiplicando a matriz constitutiva D pelo vetor de deformações ϵ :

$$\sigma = D \epsilon \quad (2.50)$$

A matriz das derivadas das funções de forma B é calculada em função de L e N por:

$$B = LN \quad (2.51)$$

Utilizando as relações anteriores, a equação 2.47 pode ser reescrita para a equação:

$$\int_V B^T D B dV \mathbf{u}^e = \int_V N^T \mathbf{p} dV + \int_S N^T \mathbf{q} dS \quad (2.52)$$

e de forma compacta para:

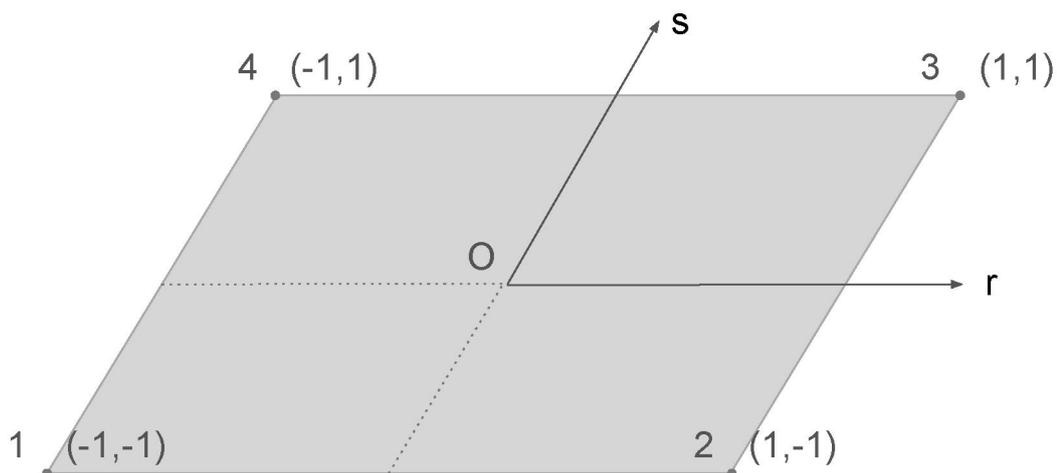
$$K^e \mathbf{u}^e = \mathbf{f}^e \quad (2.53)$$

onde N são as funções de forma, L são os operadores diferenciais, B é a matriz das derivadas das funções de interpolação, K^e é a matriz de rigidez do elemento, \mathbf{u}^e é o vetor de deslocamentos nodais do elemento e \mathbf{f}^e é o vetor de forças nodais do elemento.

2.3.2 Elemento de estado plano de 4 nós

O elemento plano que foi neste trabalho é um elemento isoparamétrico de quatro nós de dimensões 2 por 2 (figura 18). Cada nó do elemento possui 2 graus de liberdade, sendo dois graus de liberdade do efeito de estado plano e três graus de liberdade do efeito de placa. Os graus de liberdade referentes ao estado plano são os deslocamentos u e v nas direções r e s no plano da superfície média. Já entre os graus de liberdade da placa, está o deslocamento transversal w e as rotações θ_r em torno da direção r e θ_s em torno da direção s . Os eixos locais do elemento são representados por r e s com origem no ponto O .

FIGURA 18 – Elemento plano isoparamétrico de 4 nós.

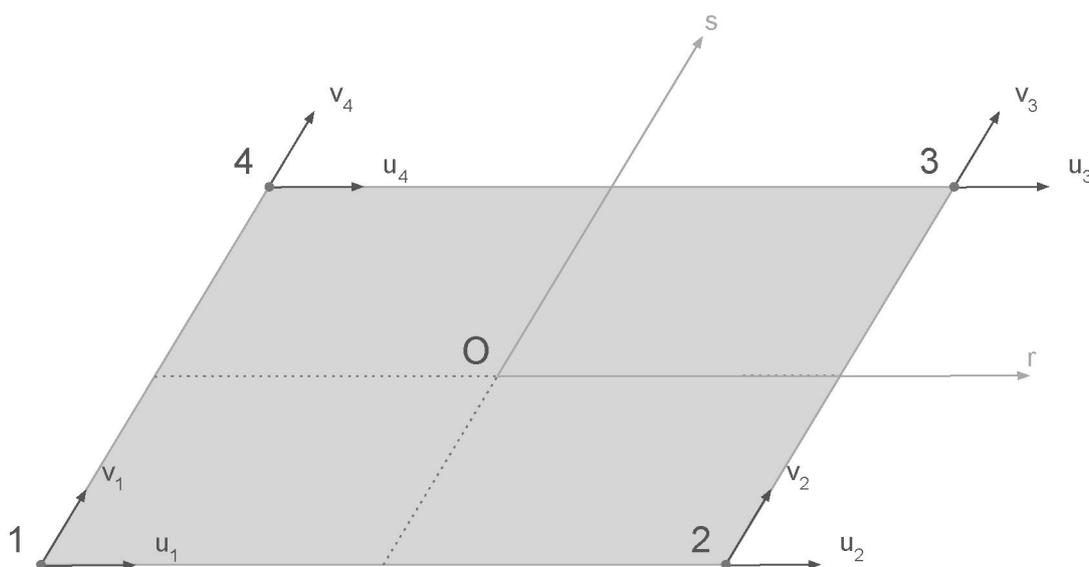


Fonte: O autor (2020)

a) efeito de estado plano

Os graus de liberdade referentes aos deslocamentos u na direção r e v na direção s estão ilustrados na figura 19.

FIGURA 19 – Graus de liberdade do elemento de estado plano.



Fonte: O autor (2020)

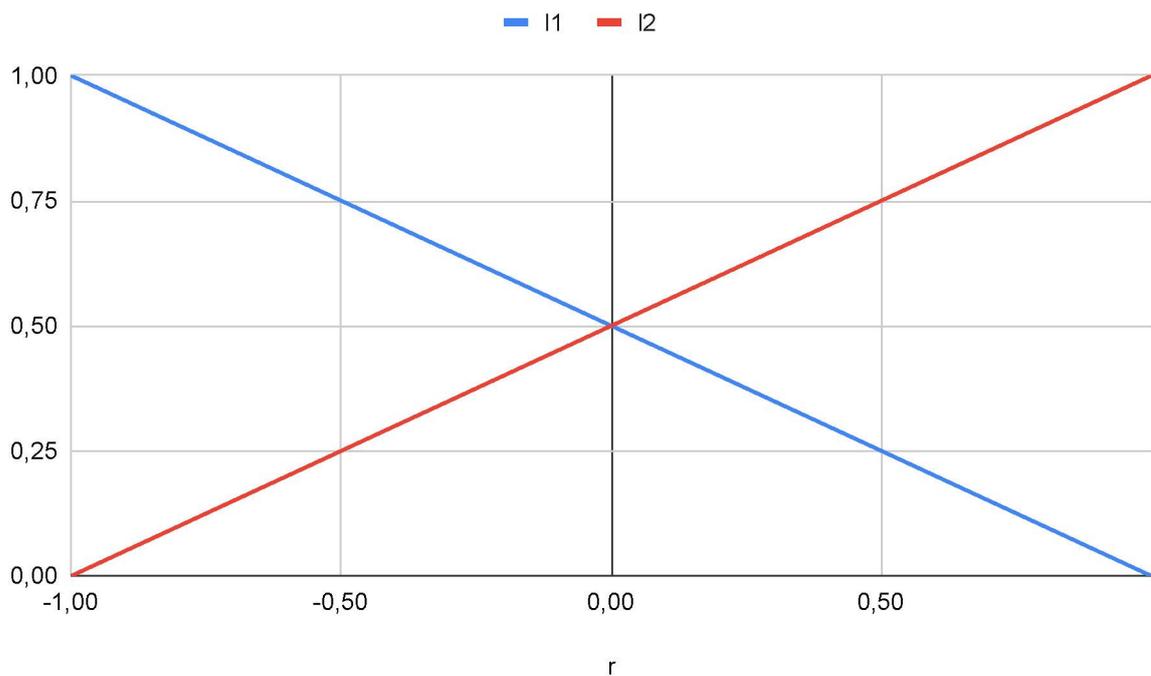
O conjunto de funções de forma utilizado para interpolar os deslocamentos no elemento de estado plano foram compostas utilizando as funções da família de primeira

ordem de Lagrange. Uma função de Lagrange l de grau $m - 1$ para um nó i pode ser calculada por:

$$l_i^{m-1} = \prod_{j=1, j \neq i}^m \frac{r - r_j}{r_i - r_j} \quad (2.54)$$

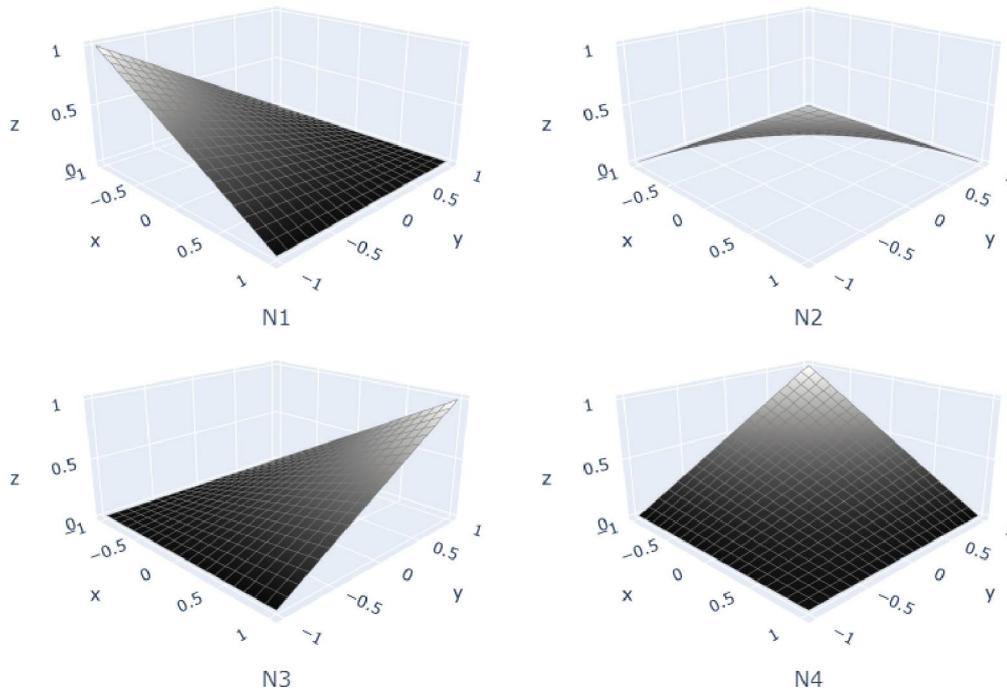
O conjunto de funções de Lagrange lineares para uma direção do elemento está ilustrado pela figura 20.

FIGURA 20 – Família de funções de Lagrange de primeira ordem



Fonte: O autor (2020)

Para compor a função bilinear N_i de um nó i é utilizada a função linear $n_{r,i}$ na direção r e a função $n_{s,i}$ na direção s . Os gráficos das funções de forma para o elemento de estado plano estão ilustrados na figura 21.

FIGURA 21 – Funções de forma N_i para o elemento de estado plano.

Fonte: O autor (2020)

O campo de deslocamento u do elemento pode ser interpolado utilizando as funções de forma N_i e os deslocamentos nodais u^e , de acordo com:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (2.55)$$

Por ser um elemento isoparamétrico, é necessário interpolar as coordenadas do elemento. Para isso é utilizado o mesmo conjunto de funções utilizadas para o campo de deslocamentos. A interpolação é calculada em função das coordenadas

nodais x^e do elemento, de acordo com:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{Bmatrix} \quad (2.56)$$

Com a matriz de funções de forma N , é possível calcular todos os termos utilizados na integral do lado esquerdo da equação 2.52 para se obter a matriz de rigidez K^e . Como a integral é definida em relação ao sistema global e a integração é feita no elemento mestre, é necessário transformar as derivadas presentes na matriz B , para isso é utilizada a matriz Jacobiana J . A matriz Jacobiana e as derivadas das funções de forma em relação às coordenadas no sistema local podem ser calculadas por:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

Pela transformação do sistema de coordenadas, a matriz de rigidez K^e do elemento pode ser calculada utilizando a equação:

$$\mathbf{K}^e = \int \int \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx dy dz = \int \int \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \det \mathbf{J} dr ds dz \quad (2.59)$$

O cálculo da matriz de rigidez K^e é realizado utilizando a integração numérica pela Quadratura de Gauss. Nesse método a integral pode ser calculada pela soma do valor do integrando em um determinado ponto multiplicado por um peso. O número de pontos necessários e os valores dos pesos variam de acordo com a ordem do polinômio presente na integral. As coordenadas dos pontos e os valores dos pesos estão apresentados na tabela 1.

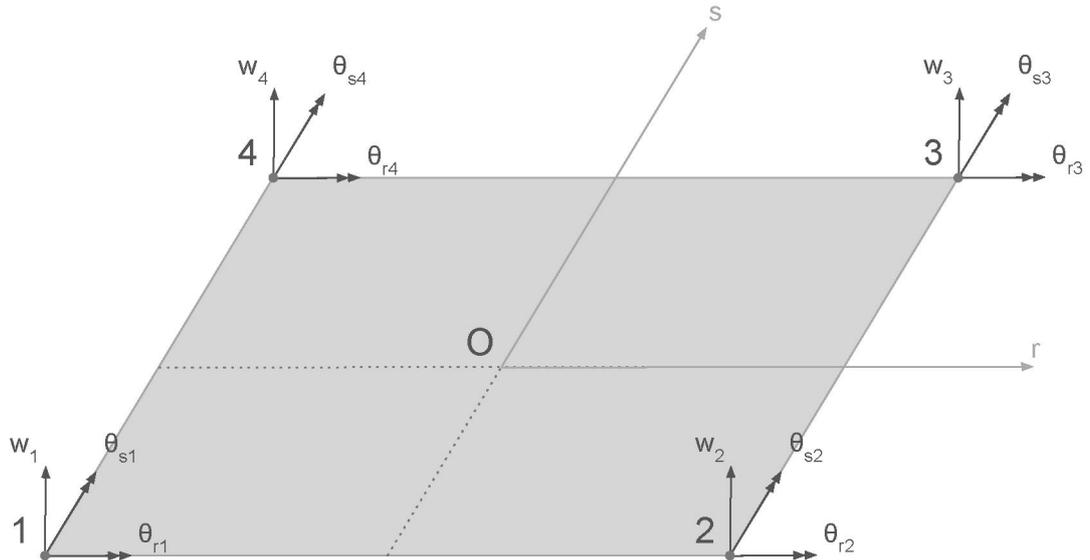
TABELA 1 – Tabela de valores para a integração numérica pela Quadratura de Gauss.

n	r	s	pesos
2	$\pm 1/\sqrt{3}$	$\pm 1/\sqrt{3}$	1

b) efeito de placa

Para a formulação do elemento de placa serão considerados os deslocamentos nodais u^e como ilustra a figura 22. No total são 12 graus de liberdade, sendo 4 graus de liberdade de deslocamento transversal w , 4 graus de liberdade de rotação θ_r e 4 graus de liberdade de rotação θ_s .

FIGURA 22 – Graus de liberdade do elemento de placa



Fonte: O autor (2020)

O campo de deslocamento do elemento é interpolado a partir dos deslocamentos nodais utilizando a matriz de funções de forma N . De forma genérica uma função de forma N_i pode ser calculada por:

$$N_i = \sum_{j=1}^J c_{i,j} t_j \quad (2.60)$$

onde $c_{i,j}$ são os coeficientes que multiplicam os termos polinômiais t_j . As funções de

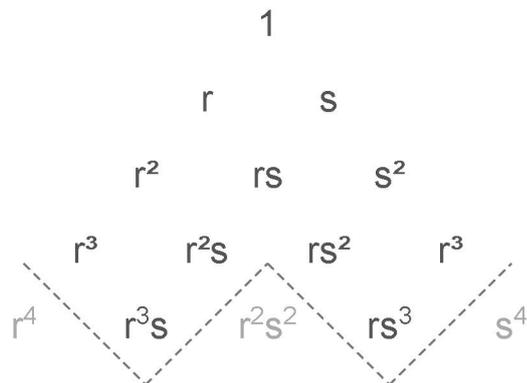
forma podem ser representadas de forma matricial por:

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \vdots \\ N_i \\ \vdots \\ N_{10} \\ N_{11} \\ N_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,j} & \cdots & c_{12,j} \\ c_{2,1} & \cdots & c_{2,j} & \cdots & c_{12,j} \\ c_{3,1} & \cdots & c_{3,j} & \cdots & c_{12,j} \\ \vdots & & & & \\ c_{i,1} & \cdots & c_{i,j} & \cdots & c_{12,j} \\ \vdots & & & & \\ c_{12,1} & \cdots & c_{12,j} & \cdots & c_{12,12} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_i \\ \vdots \\ t_{10} \\ t_{11} \\ t_{12} \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

onde i representa o i -ésimo grau de liberdade e n o número total de graus de liberdade do elemento.

Os termos do polinômio para descrever o campo de deslocamento w do elemento foi obtido segundo a ordem do triângulo de Pascal representado na figura 23. É recomendada a utilização de polinômios completos, porém como o elemento possui 12 graus de liberdade, não é possível utilizar todos os termos de 4ª ordem. Por isso foram selecionados apenas os termos r^3s e rs^3 .

FIGURA 23 – Triângulo de pascal



Fonte: O autor (2020)

Dessa forma, o vetor t de termos polinomiais é definido por:

$$\mathbf{t} = [1 \quad r \quad s \quad r^2 \quad rs \quad s^2 \quad r^3 \quad r^2s \quad rs^2 \quad s^3 \quad r^3s \quad rs^3] \quad (2.62)$$

O campo de deslocamento w do elemento pode ser interpolado utilizando as funções de forma N_i e os deslocamentos nodais u^e , de acordo com:

$$w = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & \cdots & N_{10} & N_{11} & N_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{r1} \\ \theta_{s1} \\ \vdots \\ w_4 \\ \theta_{r4} \\ \theta_{s4} \end{Bmatrix} \quad (2.63)$$

O próximo passo é o cálculo dos coeficientes $c_{i,j}$, para isso será utilizada a equação 2.63. As funções N_i devem atender alguns requisitos, o primeiro deles é que o valor de w em um nó i deve ser unitário quando somente o deslocamento w_i for unitário, enquanto que nos demais nós devem ser iguais a zero. Outro requisito para as funções é que o valor da derivada parcial em relação ao eixo r da função que representa o deslocamento w deve ser unitária somente quando o deslocamento θ_s (rotação em torno do eixo y) for unitário, sendo que todas as demais derivadas nos outros nós devem ser iguais a zero. O mesmo requisito se aplica para as derivadas em relação ao eixo s e para as rotações θ_r . E por fim, a função que descreve w deve respeitar a partição da unidade. Com essas restrições é possível montar os sistemas de equações para encontrar os 144 coeficientes referentes as 12 funções de forma N_i :

$$N_1 = \frac{1}{8} (-r^3s + r^3 - rs^3 + 4rs - 3r + s^3 - 3s + 2) \quad (2.64)$$

$$N_2 = \frac{1}{8} (-rs^3 + rs^2 + rs - r + s^3 - s^2 - s + 1) \quad (2.65)$$

$$N_3 = \frac{1}{8} (-r^3s + r^3 + r^2s - r^2 + rs - r - s + 1) \quad (2.66)$$

$$N_4 = \frac{1}{8} (r^3s - r^3 + rs^3 - 4rs + 3r + s^3 - 3s + 2) \quad (2.67)$$

$$N_5 = \frac{1}{8} (rs^3 - rs^2 - rs + r + s^3 - s^2 - s + 1) \quad (2.68)$$

$$N_6 = \frac{1}{8} (-r^3s + r^3 - r^2s + r^2 + rs - r + s - 1) \quad (2.69)$$

$$N_7 = \frac{1}{8} (-r^3s - r^3 - rs^3 + 4rs + 3r - s^3 + 3s + 2) \quad (2.70)$$

$$N_8 = \frac{1}{8} (rs^3 + rs^2 - rs - r + s^3 + s^2 - s - 1) \quad (2.71)$$

$$N_9 = \frac{1}{8} (r^3 s + r^3 + r^2 s + r^2 - rs - r - s - 1) \quad (2.72)$$

$$N_{10} = \frac{1}{8} (r^3 s + r^3 + rs^3 - 4rs - 3r - s^3 + 3s + 2) \quad (2.73)$$

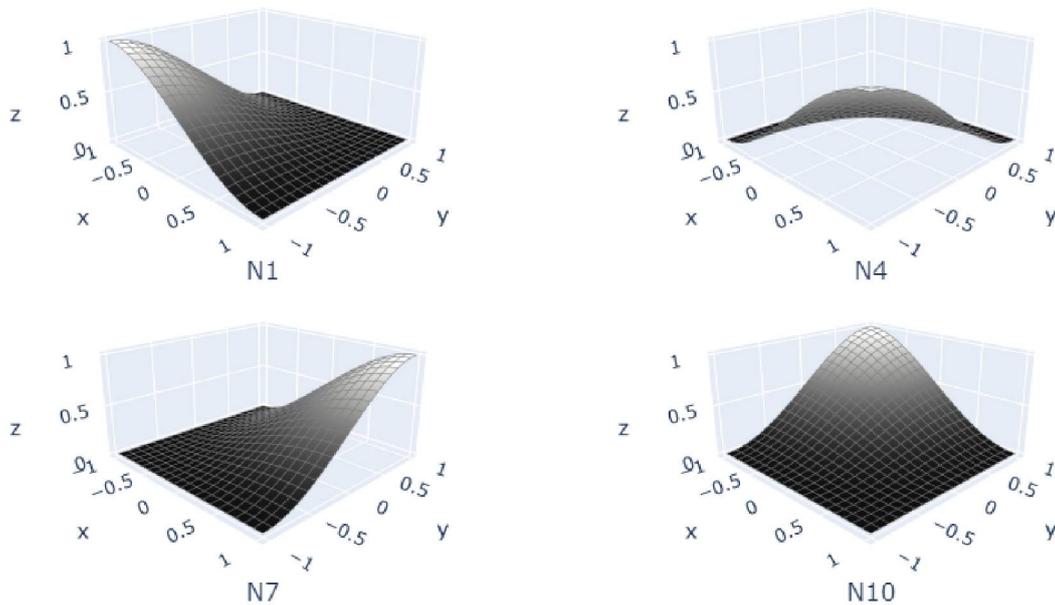
$$N_{11} = \frac{1}{8} (-rs^3 - rs^2 + rs + r + s^3 + s^2 - s - 1) \quad (2.74)$$

$$N_{12} = \frac{1}{8} (r^3 s + r^3 - r^2 s - r^2 - rs - r + s + 1) \quad (2.75)$$

Segundo Soriano (2003) o elemento construído utilizando essas funções de forma é não conforme e se utilizado distorcido perde a sua qualidade de convergente, por essa razão deve-se evitar a distorção deste tipo de elemento.

Os gráficos das funções referentes aos graus de liberdade w estão ilustradas na figura 24. Os gráficos dos graus de liberdade θ_r estão ilustradas na figura 26 e os gráficos dos graus de liberdade θ_s na figura 25

FIGURA 24 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade w_i .



Fonte: O autor (2020)

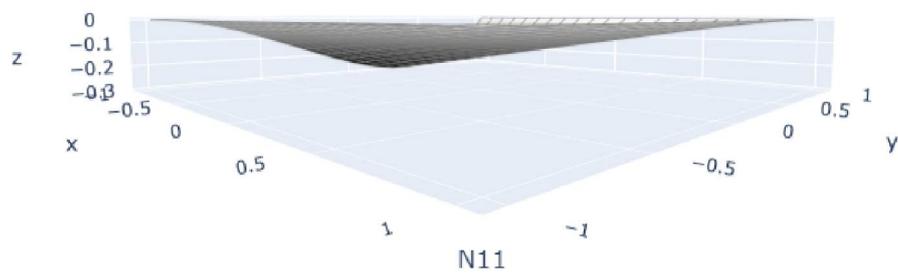
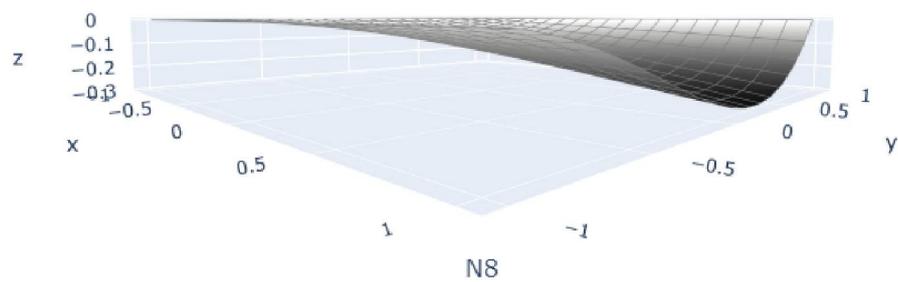
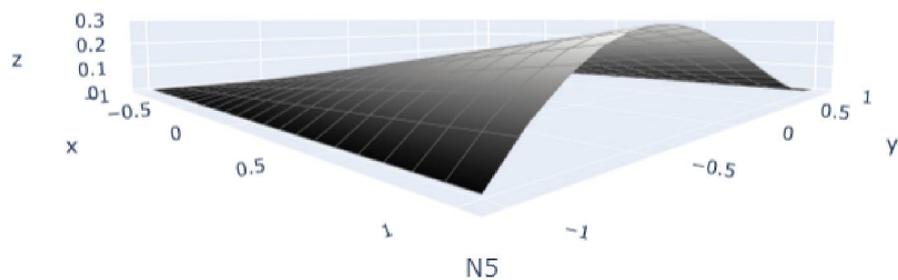
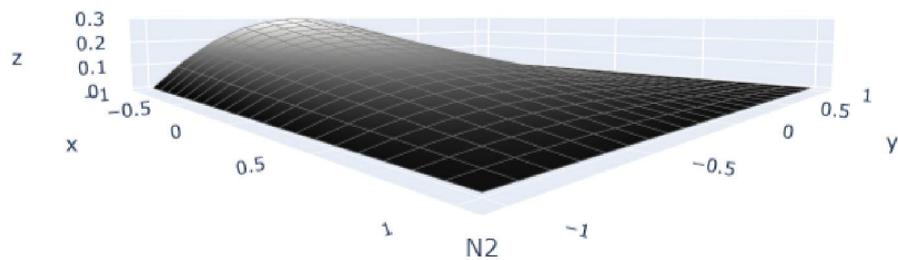
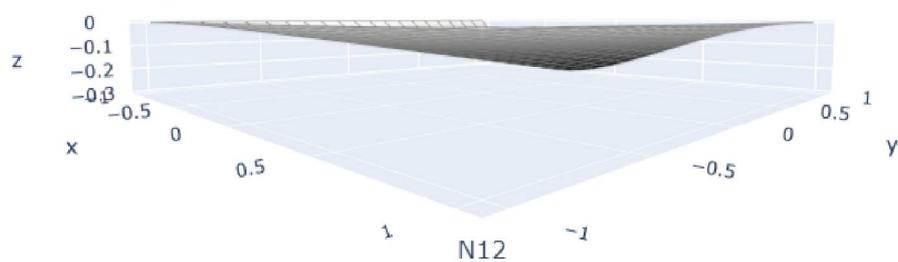
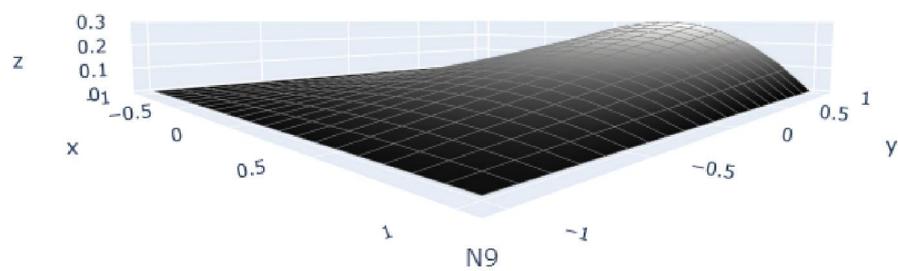
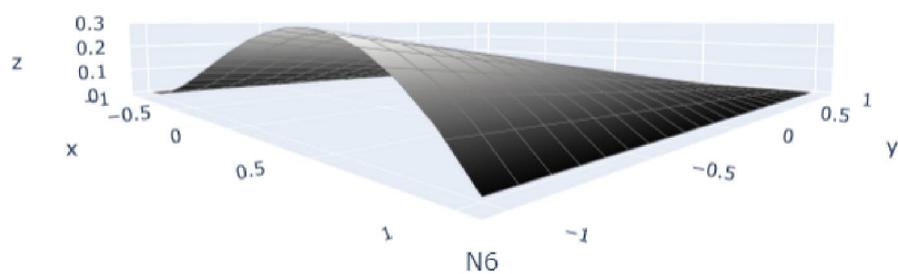
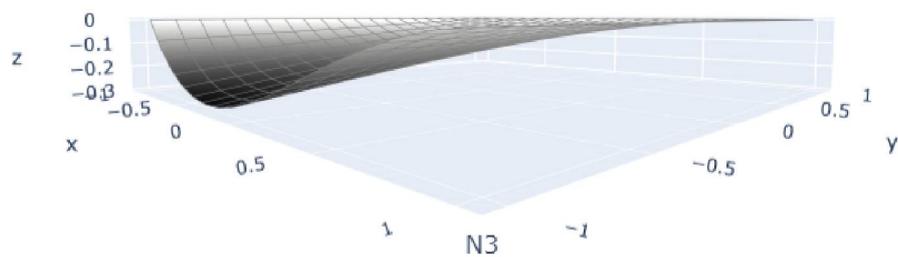
FIGURA 25 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade θ_{ri} .

FIGURA 26 – Funções de forma do elemento de placa para os graus de liberdade θ_{si} .

Da mesma forma que o elemento de estado plano, é necessário interpolar as coordenadas do elemento. Para isso é utilizado o mesmo conjunto de funções utilizadas para a interpolação das coordenadas do elemento de estado plano. A interpolação da geometria é calculada utilizando as coordenadas nodais x^e do elemento de acordo com equação 2.56.

Com o conjunto de funções de forma N , é possível calcular todos os termos utilizados na integral do lado esquerdo da equação 2.52 para se obter a matriz de rigidez K^e . De forma semelhante ao elemento de estado plano, a integral é definida em relação ao sistema global e a integração é feita no elemento mestre, portanto, é necessário transformar as derivadas presentes na matriz B , e para isso é utilizado a matriz Jacobiana J (2.57).

Além disso, também é necessário transformar as derivadas de segunda ordem utilizando:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial x}{\partial r}\right)^2 & \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)^2 & 2\frac{\partial x}{\partial r}\frac{\partial y}{\partial r} \\ \left(\frac{\partial x}{\partial s}\right)^2 & \left(\frac{\partial y}{\partial s}\right)^2 & 2\frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial r}\frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial r}\frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial x}{\partial r} \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 N}{\partial r^2} \\ \frac{\partial^2 N}{\partial s^2} \\ \frac{\partial^2 N}{\partial r \partial s} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial r^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial r^2} \\ \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} \\ \frac{\partial^2 x}{\partial r \partial s} & \frac{\partial^2 y}{\partial r \partial s} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{pmatrix} \right) \quad (2.76)$$

Igualmente ao elemento de estado plano, a matriz de rigidez K^e do elemento após a transformação do sistema de coordenadas pode ser calculada utilizando a equação 2.59 e a integração pela quadratura de Gauss.

Considerando a matriz de rigidez K_m^e devido ao efeito do estado plano e a matriz de rigidez K_p^e devido ao efeito de placa, a matriz de rigidez K^e do elemento de casca pode ser representada utilizando a relação 2.77. A matriz de rigidez da casca possui a dimensão de 20 por 20, sendo que são 8 graus de liberdade da matriz de rigidez do estado plano e 12 graus de liberdade de placa. O vetor de deslocamentos nodais u^e para o elemento de casca é representado por:

$$K^e = \begin{bmatrix} K_m^e & 0 \\ 0 & K_p^e \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

$$u^e = \begin{Bmatrix} u_m^e \\ u_p^e \end{Bmatrix} \quad (2.78)$$

$$f^e = \begin{Bmatrix} f_m^e \\ f_p^e \end{Bmatrix} \quad (2.79)$$

2.3.3 Elemento de Pórtico

O elemento de pórtico tem como base o comportamento de uma viga segundo a teoria de Euler Bernoulli (flexão), o comportamento de um elemento de treliça (esforço axial) e o comportamento a torção. O elemento é ilustrado pela figura 27. Considerando os eixos locais x , y e z , sendo que o eixo x é na direção longitudinal do elemento, esse elemento possui dois planos de flexão, sendo o plano xz com a flexão em torno do eixo y e o plano xy com a flexão em torno do eixo z . Cada nó deste elemento possui 6 graus de liberdade, sendo que são três de translação e outros três de rotação. Sendo que os de translação são na direções dos eixos x , y e z . Já os graus de liberdade de rotação são em torno do eixos x , y e z .

O comportamento no elemento é desacoplado, ou seja, na torção somente é considerado o grau de liberdade da rotação em torno no eixo x , já para a flexão no plano xz é considerada a translação na direção z e a rotação em torno do eixo y . Já para a flexão no plano xy é considerada a translação na direção y e a rotação em torno do eixo z . Por último, no comportamento axial, é considerado somente o deslocamento na direção do eixo x .

FIGURA 27 – Ilustração do elemento de pórtico espacial.



Fonte: O autor (2020).

Segundo Azevedo (2003) a matriz de rigidez do elemento de pórtico é:

$$k^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

onde A é a área da seção transversal, I_y é o momento de inércia em torno no eixo y , I_z é o momento de inércia em torno no eixo z , E é módulo de elasticidade do material, G é o módulo de elasticidade transversal e J o módulo de torção da seção.

O vetor de deslocamentos nodais no elemento é:

$$u^e = \left\{ u_{x1} \quad u_{y1} \quad u_{z1} \quad \theta_{x1} \quad \theta_{y1} \quad \theta_{z1} \quad u_{x2} \quad u_{y2} \quad u_{z2} \quad \theta_{x2} \quad \theta_{y2} \quad \theta_{z2} \right\} \quad (2.81)$$

2.3.4 Matriz de rotação

Para descrever um vetor qualquer v definido por coordenadas (x, y, z) em um sistema local de coordenadas a partir de vetor (X, Y, Z) em um sistema global de coordenadas pode ser utilizado:

$$v = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \mathbf{R} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (2.82)$$

onde \mathbf{R} é a matriz de rotação que pode ser calculada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

onde (l_x, m_x, n_x) é o vetor unitário da direção do eixo x local no sistema global, (l_y, m_y, n_y) é o vetor unitário da direção do eixo y local no sistema global e (l_z, m_z, n_z) é o vetor unitário da direção do eixo z no sistema global.

Um vetor de deslocamentos u^e no sistema local pode ser rotacionado para o vetor U^e no sistema global utilizando:

$$U^e = R^T u^e \quad (2.84)$$

Um vetor de forças f^e no sistema local pode ser rotacionado para o vetor F^e no sistema global utilizando:

$$F^e = R^T f^e \quad (2.85)$$

Já uma matriz de rigidez K^e no sistema local de coordenadas pode ser rotacionada para a matriz K_G^e no sistema global utilizando:

$$K_G^e = R^T K^e R \quad (2.86)$$

2.4 APRENDIZADO DE MÁQUINA

Aprendizado de máquina, ou *Machine Learning*, é definida por muitos autores como um campo da Inteligência Artificial (IA) e segundo Arthur Samuel, pioneiro no estudo da IA na IBM e em Stanford, aprendizado de máquina é o campo de estudo que dá ao computador a habilidade para aprender sem ser programado explicitamente (PATTERSON; GIBSON, 2017).

Para Patterson e Gibson (2017), antes de tentar entender como as máquinas podem aprender é necessário definir qual o significado do termo "aprender". Quando se diz que está aprendendo, pode se dizer que está ganhando conhecimento ao estudar, ao ganhar experiência ou sendo ensinado. O aprendizado de máquina utiliza algoritmos para construir um modelo contendo informações extraídas de dados brutos, para em seguida utilizar o modelo para prever sobre dados desconhecidos. O modelo pode ser de diferentes tipos, cada um tem uma maneira de aplicar regras para aprender com os dados conhecidos e prever com dados desconhecidos. Segundo Russel e Norvig (2016) um agente está aprendendo se ele melhora a sua performance em tarefas futuras após realizar observações do ambiente em que está.

Há três tipos de retorno (feedback) que determinam os três principais tipos de aprendizado:

- Aprendizagem não supervisionada;
- Aprendizagem por reforço;
- Aprendizagem supervisionada.

A primeira é a aprendizagem não supervisionada. Neste tipo o agente aprende os padrões dos dados de entrada mesmo que nenhum retorno explícito seja fornecido. A tarefa mais comum para este tipo é o agrupamento. Outro tipo é a aprendizagem por reforço, nesse tipo o agente aprende a partir de recompensas ou punições, sendo o agente responsável por decidir qual das ações anteriores ao reforço foram as maiores responsáveis. O terceiro tipo é aprendizagem supervisionada, nesse tipo o agente aprende com os exemplos de dados de entrada e dados de saída, aprendendo a função que faz o mapeamento do dado de entrada para o de saída (RUSSEL; NORVIG, 2016). Neste trabalho será utilizado tipo de aprendizagem supervisionada.

2.4.1 Redes Neurais Artificiais

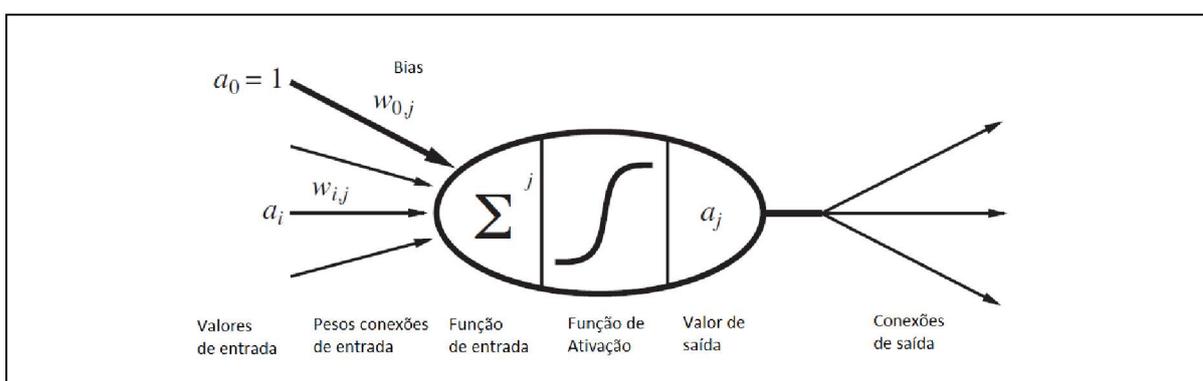
O foco deste trabalho será nas redes neurais artificiais. O modelo matemático das redes neurais tem como inspiração as descobertas da neurociência, em particular

a hipótese que a atividade mental consiste principalmente da atividade eletroquímica em redes de células chamadas de neurônios (RUSSEL; NORVIG, 2016).

Desde 1943, modelos mais detalhados e realísticos foram desenvolvidos, tanto para neurônios como sistemas mais complexos, o que levou para o campo da neurociência computacional moderna. Por outro lado, pesquisadores da IA e estatística se interessaram pelas propriedades mais abstratas das redes neurais, como a capacidade de executar computação paralela, tolerância aos ruídos dos dados de entrada e para aprender. As redes neurais permanecem como uma das formas mais populares e eficazes de aprendizagem (RUSSEL; NORVIG, 2016).

Na figura 28 é ilustrado o modelo matemático simplificado para um neurônio artificial ou unidade.

FIGURA 28 – Modelo matemático simplificado para um neurônio artificial.



Fonte: Adaptado de Russel e Norvig (2016)

Um neurônio artificial recebe as ativações a , que então são somadas de forma ponderada utilizando os pesos das conexões w_i e a bias b :

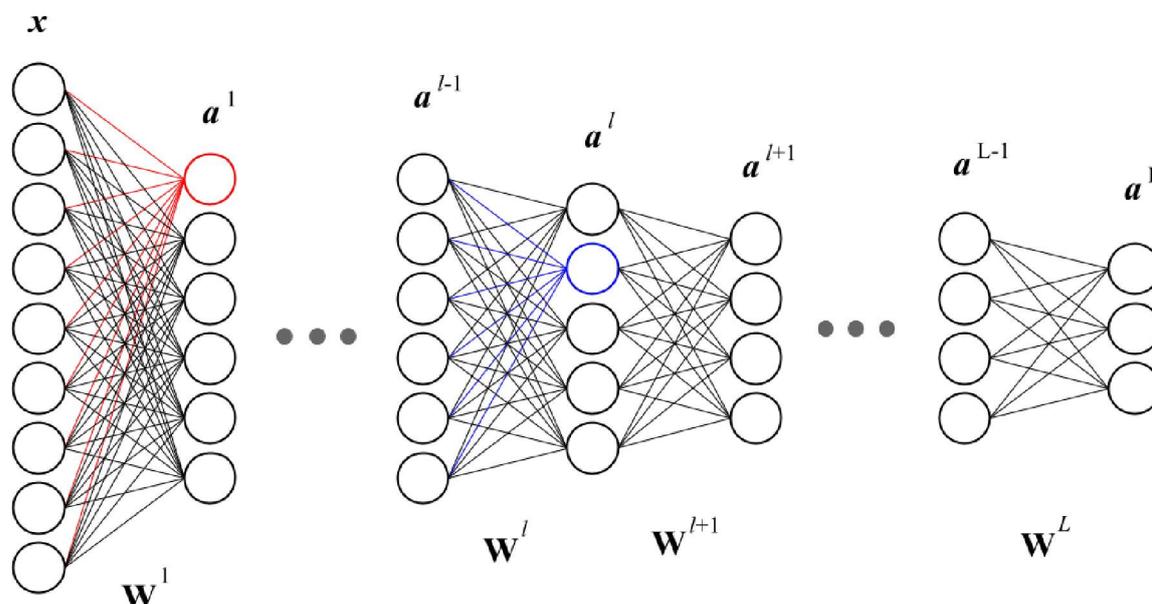
$$z = \sum_{n=1}^N w_n a_{n-1} + b \quad (2.87)$$

A ativação de saída a é utilizada para os próximos neurônios e é calculada por:

$$a = \sigma(z) \quad (2.88)$$

Os neurônios são organizados em camadas. O comportamento de uma rede neural varia conforme a sua arquitetura, que pode ser definida em função do número de neurônios, o número de camadas e o tipo de conexão entre as camadas. A arquitetura mais simples é a rede neural multicamadas *feedforward*, ilustrada na figura 29.

FIGURA 29 – Ilustração de uma rede neural multicamadas.



Fonte: Hallström (2016)

Esta arquitetura possui uma única camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas, e uma camada de saída. Além disso, o neurônio de uma camada é conectado a todos os neurônios de uma outra camada adjacente.

Por meio da camada de **entrada** é que a rede neural recebe os sinais. Nas redes neurais clássicas *feedforward* essa camada é totalmente conectada com a primeira camada oculta, já que dependendo da arquitetura da rede, essa camada pode não ser totalmente conectada com a próxima. Em uma rede neural pode haver uma ou mais camadas **ocultas**. Na camada de **saída** se obtém as respostas ou a predição do modelo. O valores de saída têm relação direta com os valores de entrada e dependendo da configuração da rede, podem ser valores reais no caso de uma regressão ou um conjunto de probabilidades no caso de uma classificação. Esse comportamento depende da função de ativação utilizada nessa última camada.

Os **pesos** nas conexões entre os neurônios de duas camadas consecutivas são os coeficientes que podem amplificar ou minimizar o sinal para um dado neurônio. Nas representações comuns de redes neurais são as linhas que ligam dois neurônios e são geralmente representados pela letra w . Ainda segundo, Patterson e Gibson (2017), os valores dos pesos nas conexões entre as camadas são como as redes neurais codificam as informações extraídas dos dados de treinamento e as camadas ocultas são a chave para permitir que redes neurais modelem funções não lineares.

Biases são valores escalares que são adicionados na soma dos sinais de entrada ponderados pelos pesos das conexões com a camada anterior de um neurônio. A notação comum para as *biases* é b .

As **ativações** são os valores passados para a próxima camada. Esses valores são os resultados em cada neurônio após aplicar a função de ativação na soma das ativações provenientes da camada anterior.

As funções de ativação são responsáveis por transformar a combinação das ativações da camada anterior, os pesos das ligações e as *biases* na ativação que será passada para a próxima camada em cada neurônio. Elas também são utilizadas para alterar o comportamento da rede, principalmente ao introduzir a não linearidade no modelo. Algumas das funções utilizadas são as funções sigmóide, softmax e unidade linear retificada (ReLU).

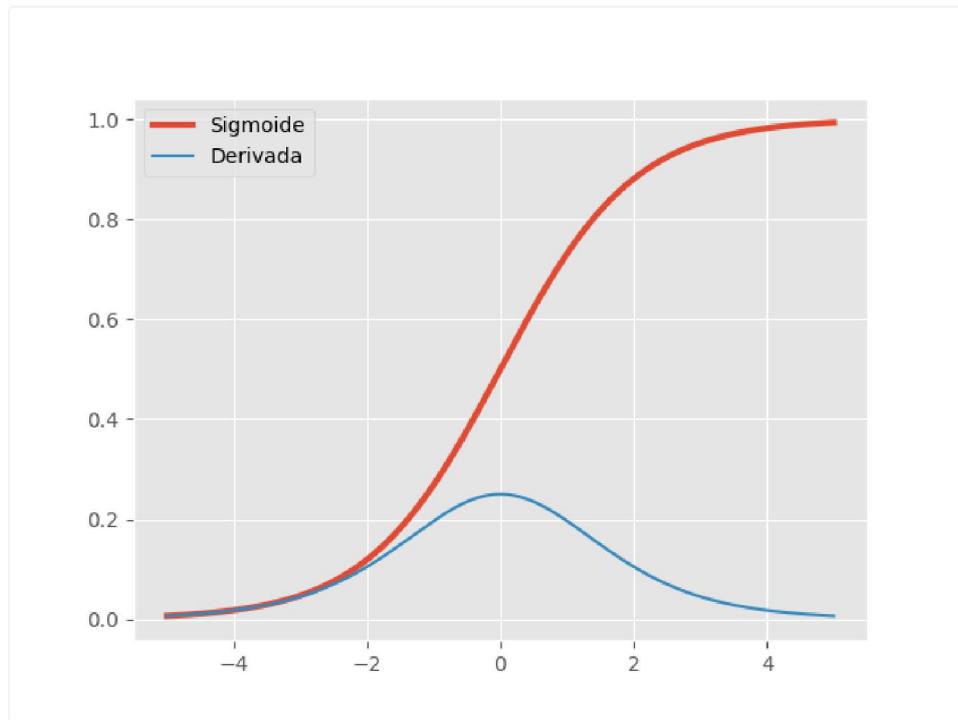
a) Função sigmóide

A função sigmóide foi muito utilizada em redes neurais devido à sua semelhança com a forma binária em que os neurônios biológicos funcionam, pois apenas assume valores entre 0 e 1. No entanto, a sua derivada tende a zero para valores fora do intervalo de -5 a 5, causando dificuldades no treinamento da rede neural. Os gráficos da função e de sua derivada estão ilustrados na figura 30. A função e sua derivada podem ser calculadas por:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (2.89)$$

$$\sigma'(x) = \sigma(x)(1 - \sigma(x)) \quad (2.90)$$

FIGURA 30 – Gráfico da função sigmóide e a sua derivada.



Fonte: Facure (2017)

b) Softmax

A função de ativação *softmax* é utilizada quando se deseja representar uma distribuição de probabilidade em um número finito de valores, sendo utilizada principalmente na camada de saída quando o objetivo da rede neural seja a classificação. A função é calculada por:

$$\text{softmax}(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_j e^{z_j}} \quad (2.91)$$

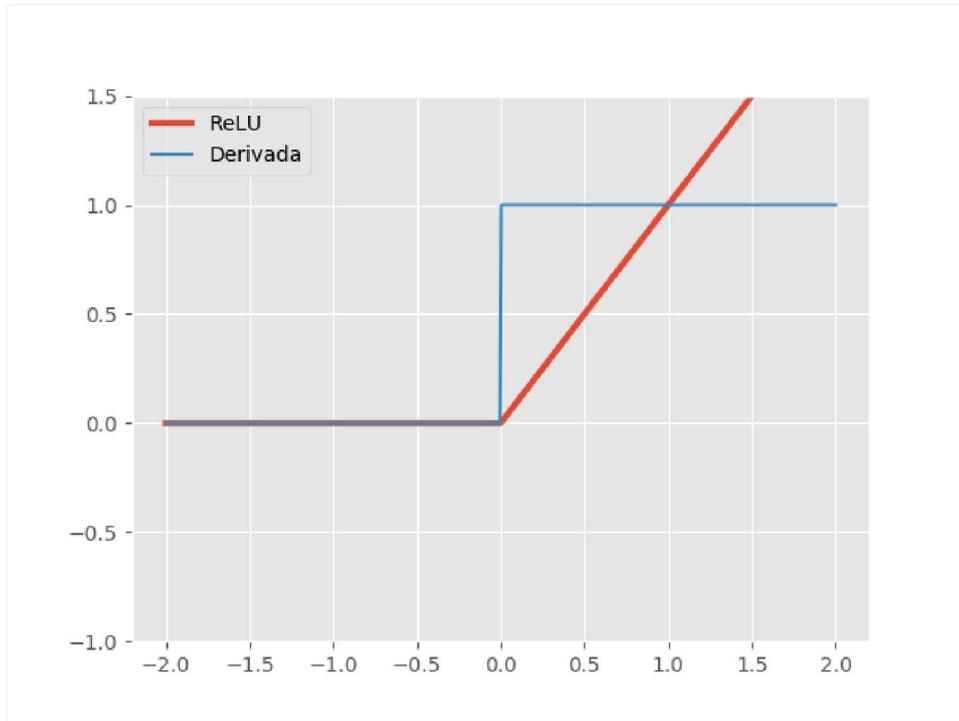
c) ReLU

Outro tipo de função de ativação, é a linear retificada (ReLU). Segundo Patterson e Gibson (2017) as redes que utilizam essa função apresentam uma maior facilidade durante o treinamento. Essa função é semelhante à função linear, porém ela é nula para valores menores que zero. A consequência é que a derivada é diferente de zero enquanto a unidade estiver ativa. Os gráficos da função e de sua derivada estão ilustrados na figura 31. A função e sua derivada podem ser calculadas por:

$$\sigma(x) = \max(0, x) \quad (2.92)$$

$$\sigma'(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2.93)$$

FIGURA 31 – Gráfico da função ReLU e a sua derivada.



Fonte: Facure (2017)

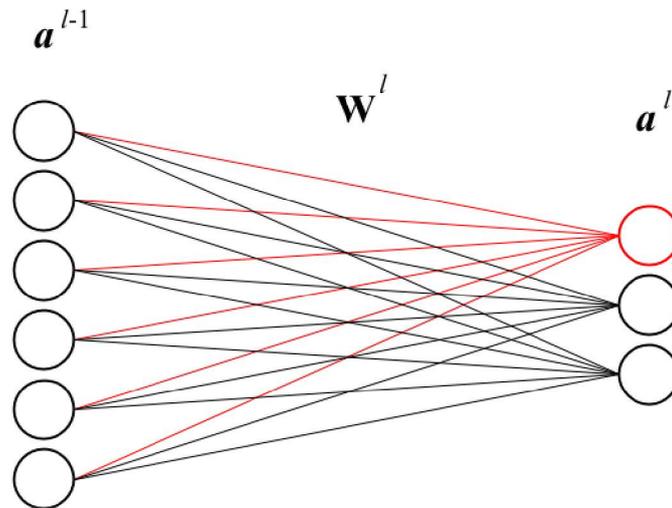
2.4.2 Treinando a rede neural

A formulação que será apresentada neste item para a rede neural artificial está de acordo com o apresentado por Hallström (2016). Considerando uma rede neural com L camadas, totalmente conectadas, com um número qualquer de neurônios em cada camada, as ativações dos neurônios de uma camada l podem ser representadas pelo vetor \mathbf{a}^l . Os pesos de cada conexão entre os neurônios de uma camada $l - 1$ e uma camada l pode ser representada pela matriz \mathbf{W}^l . Já as *biases* para cada neurônio em uma camada são representadas pelo vetor \mathbf{b}^l . O vetor \mathbf{a}^l pode ser calculado por:

$$\mathbf{a}^l = \sigma(\mathbf{W}^l \mathbf{a}^{l-1} + \mathbf{b}^l) \quad (2.94)$$

Na figura 32 são ilustrados os neurônios de uma camada anterior que influenciam na ativação de um neurônio na próxima camada.

FIGURA 32 – Ilustração dos neurônios que influenciam na ativação de um neurônio em uma rede totalmente conectada.



Fonte: Hallström (2016)

Considerando que os pesos e as *biases* de uma rede neural foram escolhidos de forma aleatória, ao passar um vetor de valores x como parâmetro de entrada em uma rede neural, será obtido um vetor de valores de saída a^L . No entanto, para o vetor de valores x também se tem o vetor de valores y que é a resposta esperada. O conjunto dos vetores x e do vetor y é definido como uma amostra de treinamento.

Certamente haverá uma diferença entre a^L e y , e uma forma de medir essa diferença é utilizando uma função Custo (C). A função custo depende basicamente da matriz de pesos W , das *biases* b e dos valores de entrada x , podendo ser definida como:

$$C = f(W, b, x) \quad (2.95)$$

onde N é número unidades da camada de saída.

O treinamento de uma rede neural será dado ao minimizar a função de custo que representa o erro entre os valores calculados e os valores esperados. Uma das funções custo mais utilizadas é o erro médio quadrado (EQM), podendo ser calculado por:

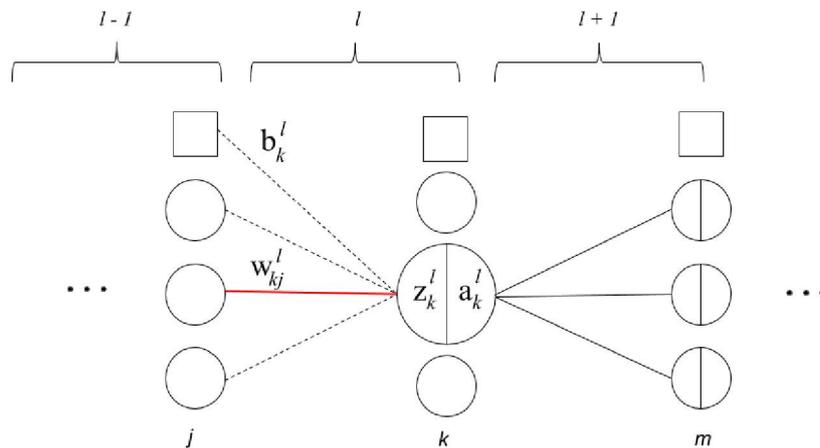
$$C = f(W, b, x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (a_n^L - y_n)^2 \quad (2.96)$$

Backpropagation é um dos algoritmos utilizados para minimizar o erro, sendo que é utilizando como otimizador o método do gradiente descendente estocástico.

No método estocástico, em vez de calcular as alterações dos pesos para todos os conjuntos de exemplos de dados de entrada e saída, o conjunto de exemplos é dividido em grupos e para cada grupo é feita a atualização dos pesos.

Para aplicar o algoritmo são consideradas três camadas $l - 1$, l e $l + 1$ de uma rede e o índice dos neurônios sendo respectivamente j , k e m , conforme ilustrado na figura 33.

FIGURA 33 – Esquema para o cálculo da derivada da função custo em relação ao peso w^l em uma camada l



Fonte: Hallström (2016)

A soma dos valores de entrada z_k^l de um neurônio k na camada l é calculado de acordo com equação:

$$z_k^l = \sum_j w_{kj}^l a_j^{l-1} + b_k^l \quad (2.97)$$

a ativação a_k^l é calculada utilizando:

$$a_k^l = \sigma(z_k^l) \quad (2.98)$$

e a soma dos valores de entrada z_m^{l+1} de um neurônio m em uma camada $l + 1$ de acordo com:

$$z_m^{l+1} = \sum_k w_{mk}^{l+1} a_k^l + b_m^{l+1} \quad (2.99)$$

Utilizando as equações 2.97, 2.98 e 2.99 se tem um passo para frente nessas camadas, desde a ativação na camada $l - 1$ até a soma dos valores de entrada dos neurônios em uma camada $l + 1$. Dada a função de erro C , a sua derivada em relação a uma camada l pode ser calculada por:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C}{\partial w_{kj}^l} &= \frac{\partial C}{\partial z_k^l} \frac{\partial z_k^l}{\partial w_{kj}^l} \\
&= \frac{\partial C}{\partial a_k^l} \frac{\partial a_k^l}{\partial z_k^l} \frac{\partial z_k^l}{\partial w_{kj}^l} \\
&= \left(\sum_m \frac{\partial C}{\partial z_m^{l+1}} z_m^{l+1} \partial a_k^l \right) \frac{\partial a_k^l}{\partial z_k^l} \frac{\partial z_k^l}{\partial w_{kj}^l} \\
&= \left(\sum_m \frac{\partial C}{\partial z_m^{l+1}} w_{mk}^{l+1} \right) \sigma'(z_k^l) a_j^{l-1}
\end{aligned} \tag{2.100}$$

A soma na equação 2.100 é devido à regra da cadeia, todas as contribuições dos neurônios da camada $l + 1$ devem ser levadas em consideração devido a influência no valor final do erro.

O **signal de erro** δ_k^l de um neurônio k em uma camada l pode ser definido como a fração da variação do erro total quando a soma dos valores de entrada do neurônio é alterada, sendo calculada por:

$$\delta_k^l \equiv \frac{\partial C}{\partial z_k^l} \tag{2.101}$$

Todo neurônio na rede tem seu sinal de erro definido, ao expandir a relação 2.101 é obtido:

$$\frac{\partial C}{\partial z_k^l} = \left(\sum_m \frac{\partial C}{\partial z_m^{l+1}} w_{mk}^{l+1} \right) \sigma'(z_k^l) \tag{2.102}$$

Substituindo a relação 2.101 na equação 2.102 é obtida a fórmula recursiva para os sinais de erro:

$$\delta_k^l = \left(\sum_m \delta_m^{l+1} w_{mk}^{l+1} \right) \sigma'(z_k^l) \tag{2.103}$$

Calculando a derivada parcial da função custo c em relação a *biases* b_k^l se obtém:

$$\frac{\partial C}{\partial b_k^l} = \frac{\partial C}{\partial z_k^l} \frac{\partial z_k^l}{\partial b_k^l} = \frac{\partial C}{\partial z_k^l} 1 = \delta_k^l \tag{2.104}$$

Propagando o erro da última camada para a camada inicial

Para utilizar a equação 2.103 é necessário se obter o primeiro sinal de erro δ^L na camada L . Após calcular o erro utilizando a equação 2.105, é possível propagá-lo *backwards* calculando todos os demais sinais de erro:

$$\delta_j^L = \frac{\partial C}{\partial z_j^L} = \frac{\partial C}{\partial a_j^L} \frac{\partial a_j^L}{\partial z_j^L} = \frac{\partial C}{\partial a_j^L} \sigma'(z_j^L) \quad (2.105)$$

Como os sinais de erro são calculados de forma recursiva para todos os neurônios da rede neural, é possível obter a derivada da função de custo em relação a todos os pesos. O treinamento da rede neural é feito somando ou subtraindo de cada peso uma pequena parcela correspondendo à derivada. Este processo é chamado de regra *delta*.

O cálculo dos sinais de erro de forma matricial é dado por:

$$(\mathbf{W}^{l+1})^T \boldsymbol{\delta}^{l+1} = \begin{bmatrix} w_{1,1}^{l+1} & \cdots & w_{m,1}^{l+1} & \cdots & w_{M,1}^{l+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ w_{1,k}^{l+1} & \cdots & w_{m,k}^{l+1} & \cdots & w_{M,k}^{l+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ w_{1,K}^{l+1} & \cdots & w_{m,K}^{l+1} & \cdots & w_{M,K}^{l+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{1,1}^{l+1} \\ \vdots \\ w_{1,k}^{l+1} \\ \vdots \\ w_{1,K}^{l+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \delta_m^{l+1} w_{m,1}^{l+1} \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M \delta_m^{l+1} w_{m,k}^{l+1} \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M \delta_m^{l+1} w_{m,K}^{l+1} \end{bmatrix} \approx \boldsymbol{\delta}^l \quad (2.106)$$

onde M o número de neurônios na camada $l+1$ e K o número de neurônios na camada l .

As equações para o cálculo do gradiente da função custo em relação aos pesos estão apresentadas a seguir¹:

$$\boldsymbol{\delta}^L = \nabla_{a^L} C \odot \sigma'(z^L) \quad (2.107)$$

$$\boldsymbol{\delta}^l = (\mathbf{w}^{l+1})^T \boldsymbol{\delta}^{l+1} \odot \sigma'(z^l) \quad (2.108)$$

$$\frac{\partial C}{\partial b_j^l} = \delta_j^l \quad (2.109)$$

$$\frac{\partial C}{\partial w_{kj}^l} = \delta_k^l a_j^{l-1} \quad (2.110)$$

¹ Foi adotado para representar o produto de Hadamard, ou a operação de multiplicação elemento a elemento de uma matriz, o símbolo \odot em que $\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = A_{ij} B_{ij}$.

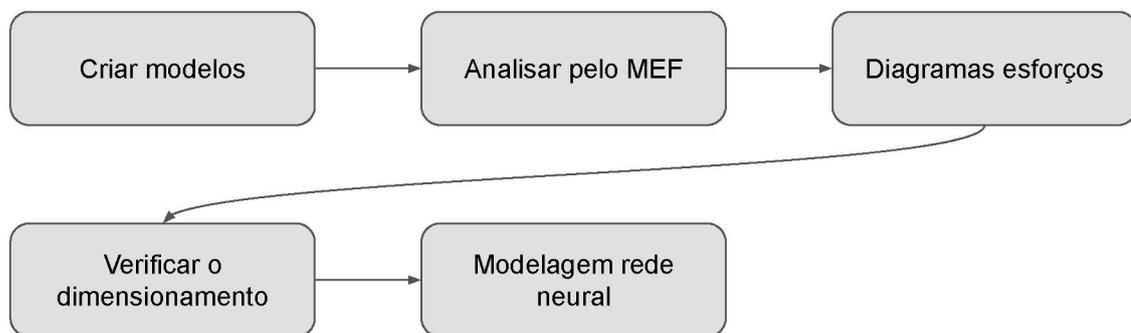
De forma resumida, o algoritmo para o treinamento de uma rede neural é dado pelos seguintes passos:

1. Propagação *forwards*, calcular a soma dos valores de entrada e a ativação para cada neurônio.
2. Calcular o sinal de erro da última camada, obtendo o gradiente da função custo em relação aos valores de saída da rede neural.
3. Propagação *backwards*, calcular os sinais de erro dos neurônios para cada camada.
4. Calcular as derivadas da função custo em relação aos pesos.
5. Calcular as derivadas da função custo em relação às *biases*.
6. Atualizar os pesos e as *biases* de acordo com a regra *delta*.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentadas as etapas que foram necessárias para a modelagem das redes neurais. A primeira etapa foi a elaboração do conjunto de configurações para a viga com os seus elementos de ligação que serão utilizados como exemplos para o treinamento das redes neurais. As configurações foram analisadas utilizando o método de elementos finitos e com os seus resultados foram obtidos os diagramas de esforços internos do perfil da viga. Com os valores dos esforços internos solicitantes foram verificados os critérios de dimensionamento do perfil da viga e dos elementos de ligação de acordo com a ABNT (2008). Por último foram preparados os exemplos para o treinamento das redes neurais. Na figura 34 é apresentado o fluxograma com a sequência dessas etapas.

FIGURA 34 – Fluxograma dos objetivos específicos



Fonte: O autor (2020)

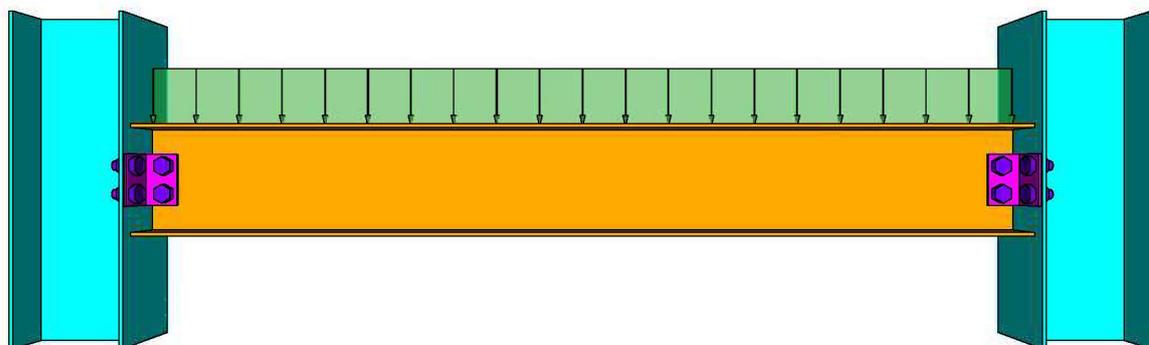
A criação do conjunto de configurações, a análise pelo método dos elementos finitos, a obtenção dos esforços internos e a verificação de dimensionamento foram implementadas pelo autor na linguagem Python. O treinamento da rede neural foi realizado utilizando a biblioteca TensorFlow para o Python, e para as saídas gráficas a biblioteca Plotly.

3.1 CONFIGURAÇÃO DE VIGA

Uma configuração é composta por uma viga conectada em ambas as extremidades a colunas por meio de ligações do tipo cantoneira dupla. Os perfis utilizados para a viga e para as colunas são de seção dos tipos I e H. O perfil de cantoneira utilizado na ligação é do tipo de abas iguais. Outros parâmetros são o diâmetro e a quantidade de parafusos, os espaçamentos entre parafusos e entre parafusos e as

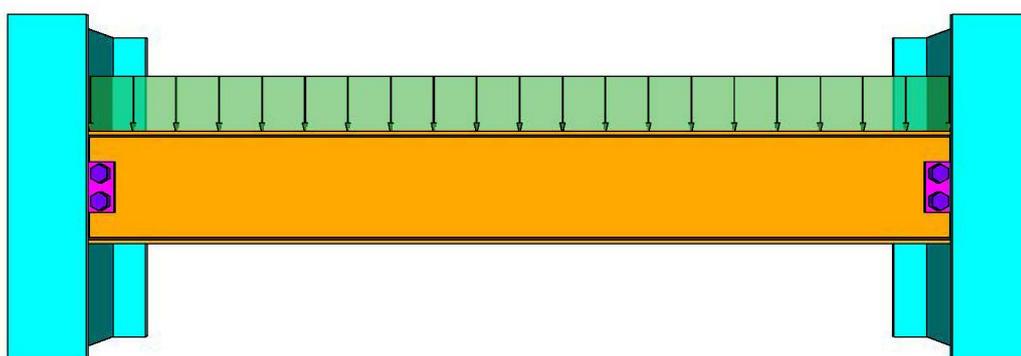
bordas dos perfis. Em todo o comprimento da viga é aplicada uma carga constante no centro da mesa superior do perfil. Em uma configuração, a viga pode ser conectada tanto na mesa, como na alma do perfil da coluna. Os dois tipos de configuração estão ilustrados nas figuras 35 e 36.

FIGURA 35 – Ilustração de uma configuração de viga e os seus elementos de ligação com a mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 36 – Ilustração de uma configuração de viga e os seus elementos de ligação com a alma da coluna.

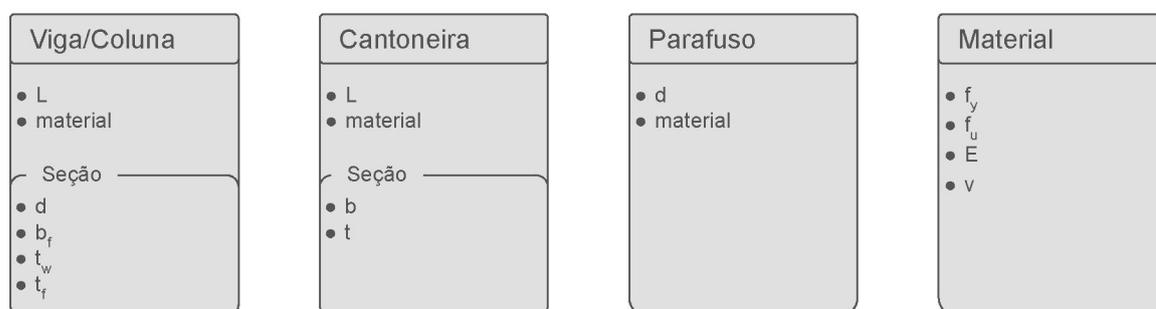


Fonte: O autor (2020)

Os principais dados para os elementos de uma configuração estão apresentados na figura 37. Para o perfil da viga e da coluna os principais dados são o comprimento do perfil L e o material. Para a seção destes perfis os principais dados são a altura d , a largura da mesa b_f , a espessura da alma t_w e a espessura da mesa t_f . Para o perfil cantoneira os principais dados são o comprimento L e o material. Para a seção deste perfil os principais dados são a largura da aba b e a espessura da aba t . Para o parafuso, os dados são o diâmetro e o material. Os dados para o material são a tensão

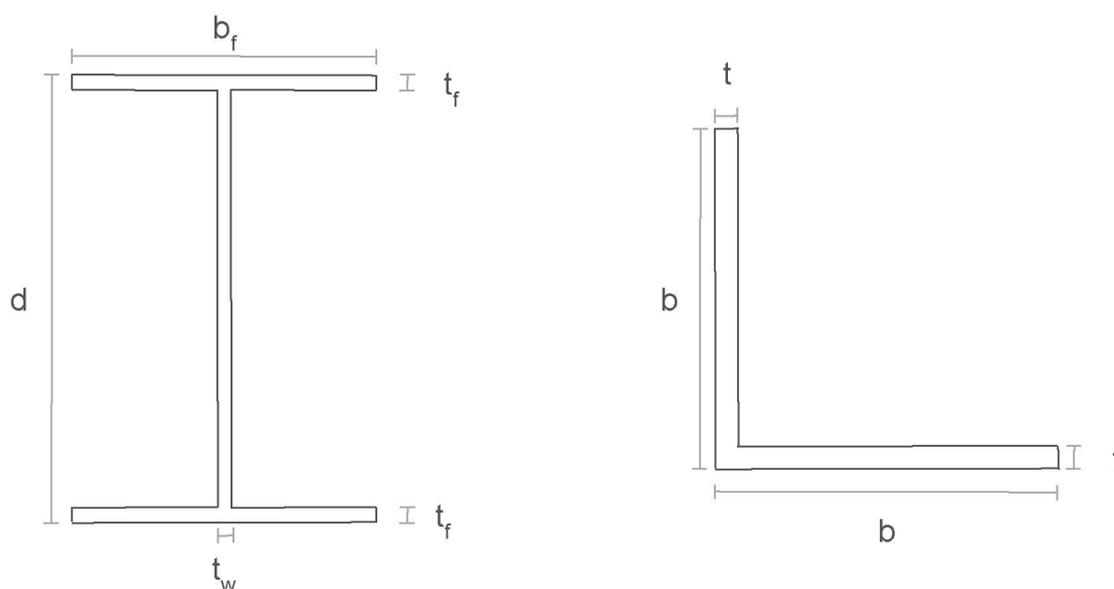
de escoamento f_y , a tensão de ruptura f_u , o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν . As ilustrações das seções I e H e da cantoneira estão apresentadas na figura 38.

FIGURA 37 – Principais dados de um modelo.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 38 – Seções I e cantoneira de abas iguais.



Fonte: O autor (2020)

3.2 ELABORAÇÃO DO CONJUNTO DE CONFIGURAÇÕES

Para se obter o conjunto de configurações de viga que foram utilizadas para o treinamento das redes neurais foram adotadas do catálogo de perfis estruturais com seções dos tipos I e H da Gerdau as seções que estão listadas na tabela 2. O conjunto adotado de comprimentos L para a viga foi de 300 a 600 *cm* com um intervalo de 50 *cm*. Já para a carga distribuída q o conjunto adotado foi de 0,05 a 0,25 *kN/cm* com um intervalo de 0,05 *kN/cm*.

TABELA 2 – Tabela de perfis adotados para a viga e coluna das configurações.

Perfil (<i>mm x kg/m</i>)	<i>d</i> (<i>mm</i>)	<i>b_f</i> (<i>mm</i>)	<i>t_w</i> (<i>mm</i>)	<i>t_f</i> (<i>mm</i>)
W 150 x 13,0	148	100	4,3	4,9
W 150 x 18,0	153	102	5,8	7,1
W 150 x 22,5 (H)	152	152	5,8	6,6
W 150 x 24,0	160	102	6,6	10,3
W 200 x 15,0	200	100	4,3	5,2
W 200 x 35,9 (H)	201	165	6,2	10,2
W 200 x 86,0 (H)	222	209	13,0	20,6
W 200 x 100,0 (H)	229	210	14,5	23,7
W 250 x 25,3	257	102	6,1	8,4
W 250 x 28,4	260	102	6,4	10,0

Em seguida, para cada seção utilizada para a viga, foram definidas as configurações dos elementos de ligação. Uma configuração consiste na seção da cantoneira, a quantidade e o número de parafusos. Foram adotadas as cantoneiras de abas iguais do catálogo da Gerdau.

As configurações foram obtidas respeitando os seguintes critérios:

- a soma das medidas das abas das cantoneiras com a espessura da alma da viga deve ser menor que a dimensão da mesa do perfil da coluna quando conectada na mesa ou menor que a medida entre as faces internas das mesas quando conectada na alma da coluna.
- a medida da aba da cantoneira deve permitir a utilização do parafuso com os espaçamentos mínimos recomendados pela ABNT (2008).

Seguindo esses critérios, os perfis de cantoneira utilizados para as configurações estão listados na tabela 3.

TABELA 3 – Tabela de cantoneiras adotadas para o conjunto de configurações.

Cantoneira (<i>mm x mm x kg/m</i>)	<i>b</i> (<i>mm</i>)	<i>t</i> (<i>mm</i>)
L 45 x 3 x 2,12	45,0	3,0
L 45 x 4 x 2,77	45,0	4,0
L 45 x 5 x 3,38	45,0	5,0
L 50 x 3 x 2,36	50,0	3,0
L 50 x 4 x 3,09	50,0	4,0
L 50 x 5 x 3,77	50,0	5,0
L 50 x 6 x 4,47	50,0	6,0
L 60 x 4 x 3,64	60,0	4,0
L 60 x 5 x 4,57	60,0	5,0
L 60 x 6 x 5,42	60,0	6,0
L 65 x 4 x 3,96	65,0	4,0

Os parafusos adotados nas configurações estão listados na tabela 4. Foram adotadas configurações com 2 e 3 parafusos por aba da cantoneira. Os diâmetros e as quantidades de parafusos foram determinados com base nos espaçamentos mínimos recomendados pela ABNT (2008) e nas restrições devido as dimensões dos perfis.

TABELA 4 – Tabela de parafusos adotados para o conjunto de configurações.

Parafuso	d (mm)
ASTM A325 1/2"	12,70
ASTM A325 5/8"	15,88
ASTM A325 3/4"	19,05

O aço adotados foram o ASTM A36 para os perfis e o ASTM A325 para os parafusos . Os valores das propriedades destes aços estão apresentados na tabela 5.

TABELA 5 – Valores das propriedades dos aços adotados nas configurações.

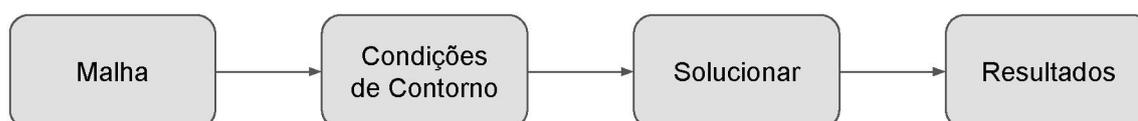
Aço	E (kN/cm ²)	ν	f_y (kN/cm ²)	f_u (kN/cm ²)
ASTM A36	20.000,00	0,30	25,0	40,0
ASTM A325	20.000,00	0,30	63,5	82,5

Ao combinar os perfis para a viga com os elementos de ligação, foram geradas 1456 configurações para a viga conectada à mesa do perfil da coluna e mais 1456 configurações para a viga conectada à alma do perfil da coluna.

3.3 ANÁLISE PELO MEF

O procedimento adotado para a análise pelo método de elementos finitos está ilustrado na figura 39. As etapas foram a criação da malha, aplicação das condições de contorno, solucionar o sistema de equações e por fim calcular os demais resultados.

FIGURA 39 – Fluxograma geral da análise pelo MEF.

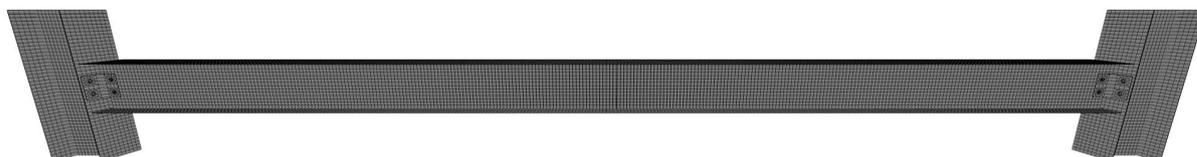


Fonte: O autor (2020)

A malha de elementos finitos foi gerada utilizando o elemento de casca plano com os efeitos de estado plano e de placa e o elemento de pórtico. O elemento de casca plano foi utilizado para modelar os perfis de viga, colunas e cantoneiras. O elemento de pórtico foi utilizado para modelar os parafusos. A malha de elementos

finitos para uma configuração de viga conectada à mesa da coluna é ilustrada pela figura 40 e de uma configuração de viga conectada à alma da coluna pela figura 41. As alturas dos perfis das colunas foram fixadas em 3 vezes a altura do perfil, não sendo analisado a influência dessa medida nos resultados.

FIGURA 40 – Malha de elementos finitos da configuração de viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 41 – Malha de elementos finitos da configuração de viga conectada à alma da coluna.

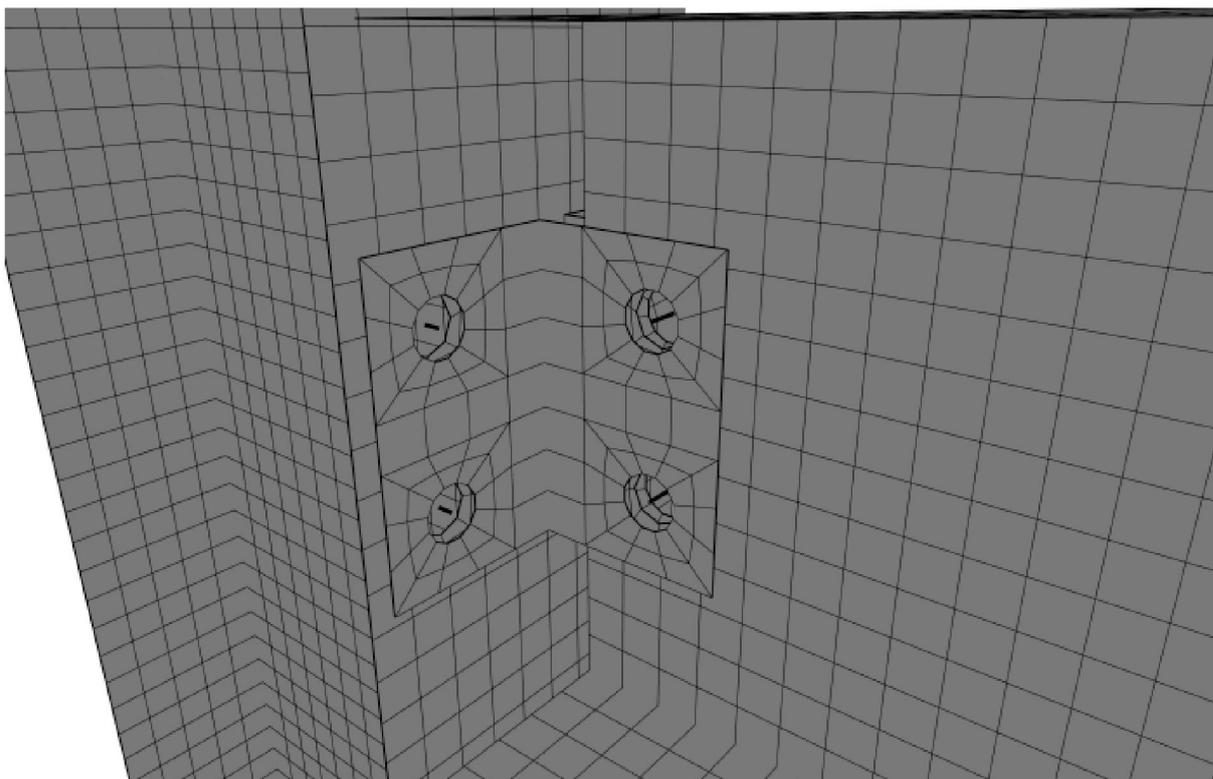


Fonte: O autor (2020)

Os elementos de casca planos foram construídos com suas bordas medindo aproximadamente 10mm, sendo que esta medida foi determinada para garantir a convergência dos resultados. A configuração com o perfil de viga W 150 x 13,0, cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2" e dois parafusos por aba possui a menor malha com 14.431 nós, 13.748 elementos e 86.586 graus de liberdade. Já a configuração com o perfil de viga W 200 x 100,0, cantoneira L 60 x 4 x 3,64, parafuso de 3/4" e três parafusos por aba possui a maior malha com 48.308 nós, 46.964 elementos e 289.848 graus de liberdade.

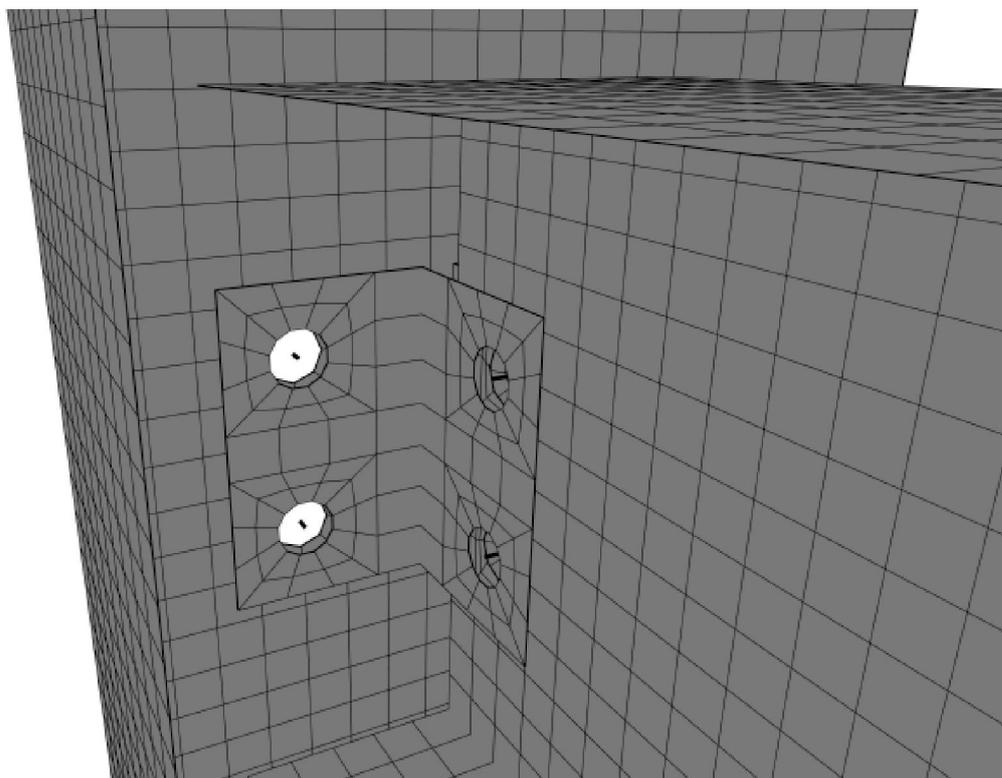
A malha na região da ligação entre a viga e a coluna está ilustrada na figura 42 para a viga a conectada à mesa da coluna e na figura 43 para a viga conectada à alma da coluna.

FIGURA 42 – Detalhe da malha da região da ligação para a viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

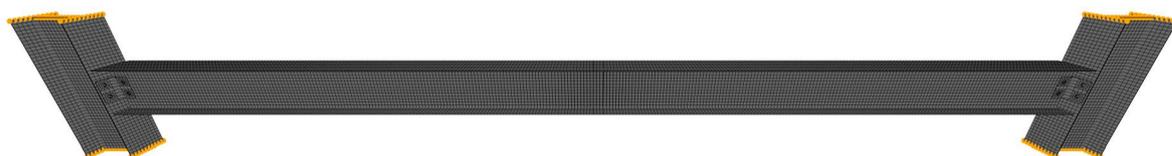
FIGURA 43 – Detalhe da malha da região da ligação para a viga conectada à alma da coluna.



Fonte: O autor (2020)

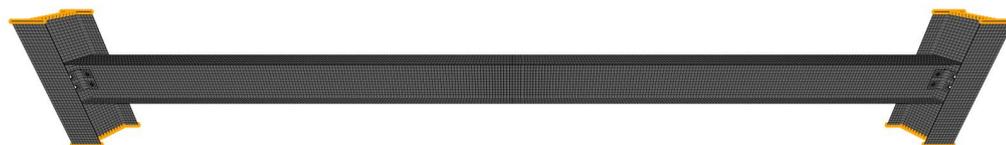
Com a malha criada, o próximo passo foi inserir as condições de contorno do modelo, como os apoios e as cargas. Os nós de ambas as extremidades dos perfis das colunas foram considerados como apoios, como ilustra as figuras 44 e 45. Todos os graus de liberdade desses nós foram restringidos.

FIGURA 44 – Ilustração dos nós da malha que foram restringidos para a viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

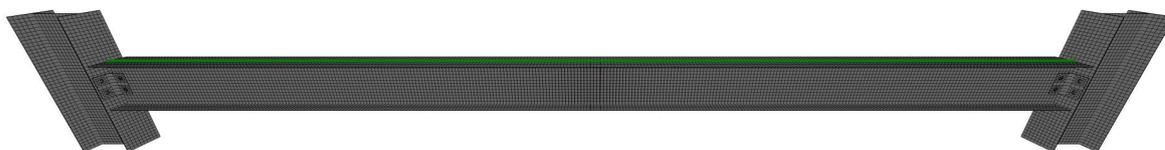
FIGURA 45 – Ilustração dos nós da malha que foram restringidos para a viga conectada à alma da coluna.



Fonte: O autor (2020)

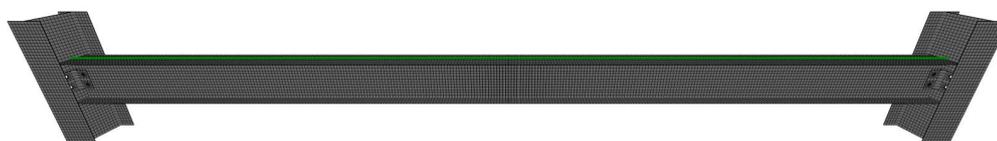
O valor da carga distribuída foi aplicado de forma concentrada nos nós do encontro da mesa superior com a alma do perfil da viga. O peso próprio dos elementos foi aplicado de forma concentrada em seus nós. Os nós em que a carga distribuída foi aplicada estão ilustrados nas figuras 46 e 47.

FIGURA 46 – Ilustração dos nós da malha em que foram aplicados a carga distribuída para a viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

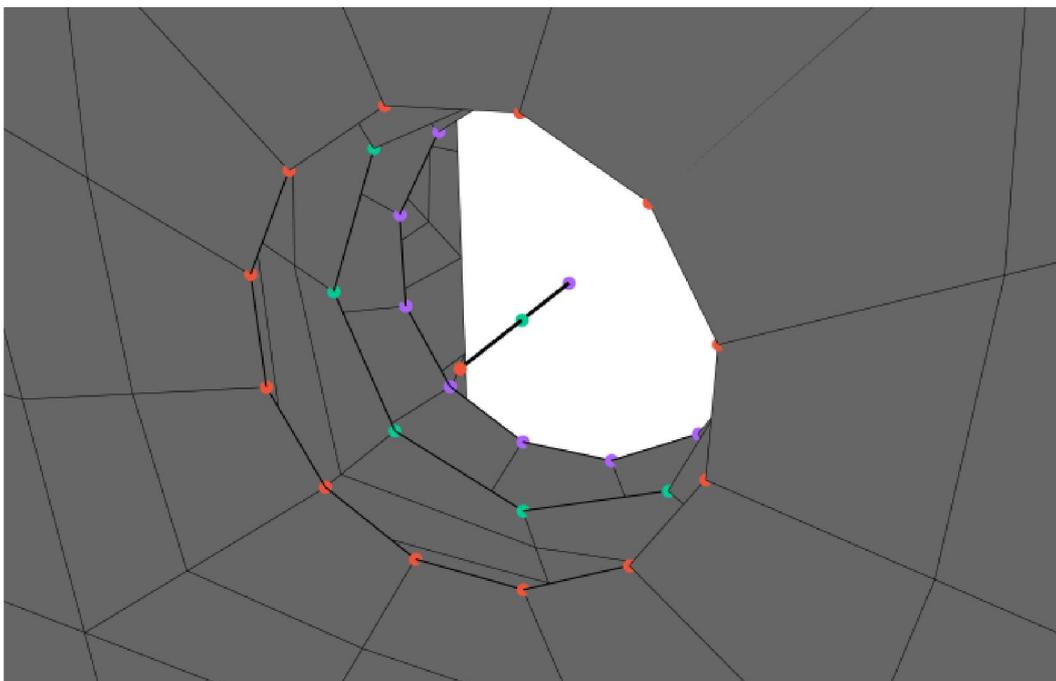
FIGURA 47 – Ilustração dos nós da malha em que foram aplicados a carga distribuída para a viga conectada à alma da coluna.



Fonte: O autor (2020)

O contato entre os elementos representando os parafusos e os elementos representando os perfis foi implementado de forma simplificada. No centro geométrico de cada furo foi posicionado um nó para o elemento do parafuso. Os nós dos elementos do parafuso são formados pelos nós centrais de cada furo. Durante a solução foi considerado que os nós da borda de um furo e seu respectivo nó do elemento do parafuso possuem os mesmos graus de liberdade. Dessa maneira não foi simulada a situação em que apenas uma região da borda do furo está sobre compressão e que em outras regiões da borda do furo não há contato. A figura 48 ilustra os nós da borda do perfil e do parafuso, sendo que os nós que possuem os mesmos graus de liberdade estão agrupados em uma mesma cor.

FIGURA 48 – Detalhe do contato entre os elementos dos perfis e dos elementos do parafuso. Nós com a mesma cor indicam que foram considerados os mesmos graus de liberdade durante a solução.



Fonte: O autor (2020)

Em seguida as equações do sistema linear do método de elementos finitos para o cálculo dos deslocamento foram resolvidas com o solucionador para sistemas esparsos. Após a solução, em cada nó foram calculados no sistema global de coordenadas o deslocamento total d , a deformação ϵ_x na direção x , a deformação ϵ_y na direção y , a deformação ϵ_z na direção z , a deformação de cisalhamento γ_{xy} no plano xy , a deformação de cisalhamento γ_{xz} no plano xz , a deformação de cisalhamento γ_{yz} no plano yz , a tensão σ_x na direção x , a tensão σ_y na direção y , a tensão σ_z na direção z , a tensão de cisalhamento τ_{xy} no plano xy , a tensão de cisalhamento τ_{xz} no plano xz , a tensão de cisalhamento τ_{yz} no plano yz e o critério de escoamento de von Mises σ_v .

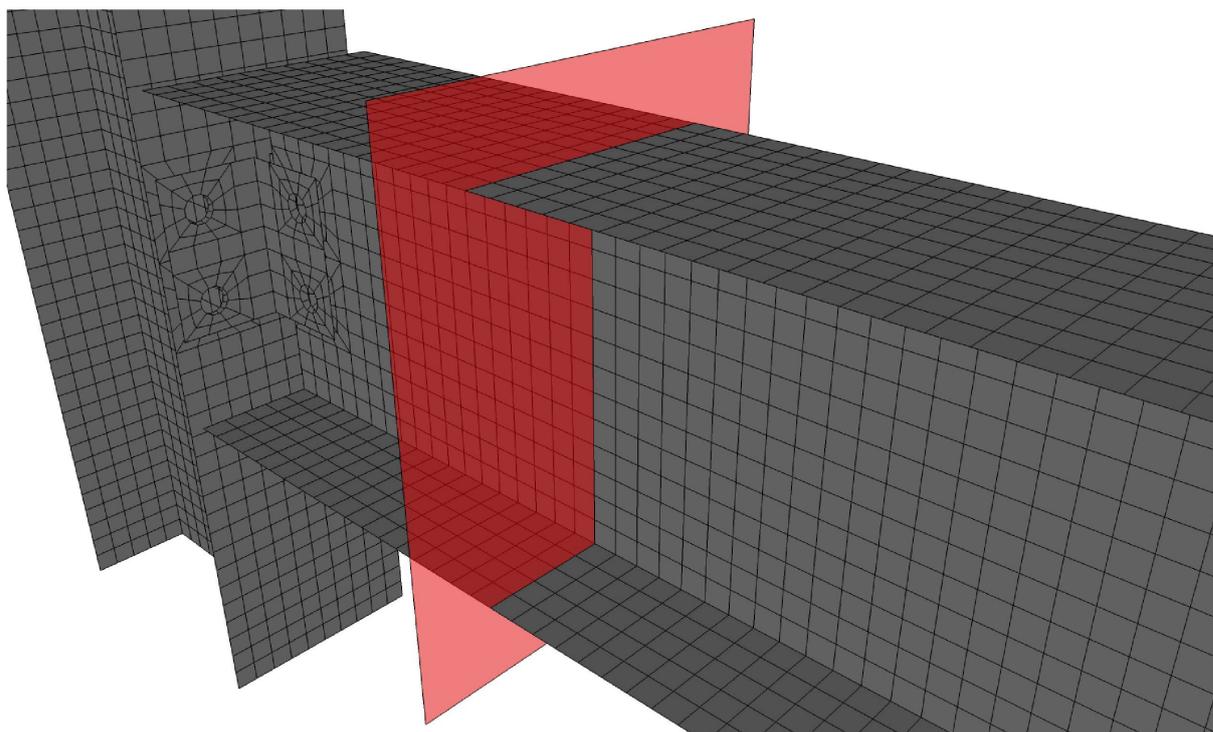
3.4 ESFORÇOS INTERNOS

Para cada configuração de viga e os elementos de ligação foram obtidos os diagramas de esforços internos para a viga. Foram obtidos os diagramas para os esforços normal, cortante e de flexão. Os diagramas foram obtidos a partir do cálculo dos esforços resultantes para seções pré determinadas com os resultados de tensões da análise pelo método de elementos finitos.

Para cada uma das seções ao longo da viga como ilustrado na figura 49, foram utilizados os valores de tensão calculados para os elementos em que seus nós fazem parte da seção. No elemento os valores das tensões foram calculadas para os pontos

de gauss.

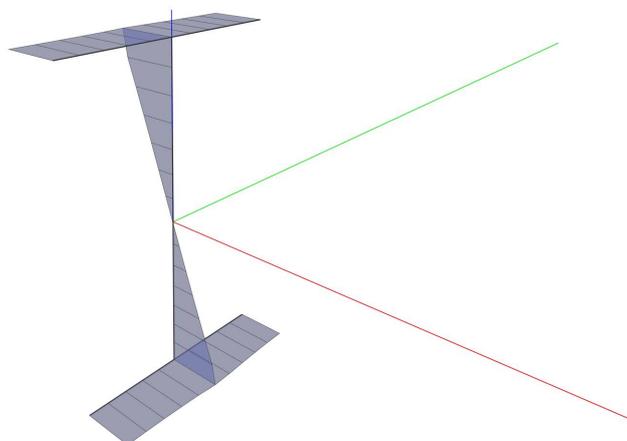
FIGURA 49 – Ilustração de uma seção para cálculo dos esforços internos da viga.



Fonte: O autor (2020)

O diagrama de tensões (σ_x) na direção longitudinal de uma seção da viga está ilustrada de forma genérica na figura 50.

FIGURA 50 – Ilustração de forma genérica do diagrama de tensões na direção longitudinal (σ_x) de uma seção da viga.



Fonte: O autor (2020)

Para cada seção o valor resultante do esforço normal foi calculado de acordo com a equação 2.43, o valor resultante do esforço cortante na direção do eixo z global

calculado de acordo com equação 2.46 e o valor resultante do momento de flexão em torno do eixo y global calculado de acordo com a equação 2.44.

3.5 VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO

Para cada configuração de viga e dos elementos de ligação foram feitas as verificações de dimensionamento de acordo com os critérios presentes na norma ABNT (2008). A verificação consiste em duas etapas, a primeira é a verificação do perfil da viga e a segunda a verificação dos elementos da ligação.

Para as verificações de dimensionamento são necessários os valores dos esforços a que a viga está submetida. Os esforços solicitantes foram extraídos dos diagramas de esforços para a viga que foram obtidos como resultado da análise pelo método de elementos finitos, considerando que as cargas aplicadas já são valores de cálculo.

Os esforços solicitantes de cálculo são o esforço normal de tração $N_{t,Sd}$, o esforço normal de compressão $N_{c,Sd}$, o esforço cortante V_{Sd} e o momento de flexão M_{Sd} . O valor de $N_{t,Sd}$ foi obtido como o maior valor maior que zero do diagrama de esforço normal, o valor de $N_{c,Sd}$ foi obtido como o maior valor absoluto dos valores menores que zero do diagrama de esforço normal, o valor de V_{Sd} foi obtido como o maior valor absoluto do diagrama de esforço cortante e o valor M_{Sd} foi obtido como o maior valor absoluto do diagrama de esforço de flexão.

Além de se obter os esforços solicitantes de cálculo, também foram calculados os esforços resistentes de cálculo de acordo com os critérios da ABNT (2008). Os esforços resistentes são o esforço normal de compressão $N_{c,Rd}$, o esforço normal de tração $N_{t,Rd}$, o esforço cortante V_{Rd} e o esforço de flexão M_{Rd} . Para se obter os esforços resistentes de cálculo foi considerado que a viga possui o comprimento de flambagem igual ao seu comprimento L , não é contida lateralmente e não possui enrijecedores de alma.

Com os valores de esforços solicitantes F_{Sd} e resistentes F_{Rd} é possível calcular o fator de utilização f como:

$$f = \frac{F_{Sd}}{F_{Rd}} \quad (3.1)$$

O fator de utilização f_{viga} máximo para a viga pode ser calculado como:

$$f_{viga} = \max\left(\frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}}, \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}}, \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}, \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right) \quad (3.2)$$

sendo que não foi considerado o efeito combinado como é apresentado na ABNT (2008).

Para a verificação da ligação são necessários os valores de esforços solicitantes de cálculo de tração no parafuso $N_{tb,Sd}$, esforço de cisalhamento no parafuso $N_{vb,Sd}$, esforço devido a pressão de contato do parafuso com a borda do furo $F_{c,Sd}$ e o esforço para o colapso por rasgamento $F_{f,Sd}$. Esses valores foram obtidos a partir dos diagramas de esforços internos da viga.

Além de se obter os esforços solicitantes de cálculo, também foram calculados os esforços resistentes de cálculo de acordo com os critérios da ABNT (2008). Os esforços resistentes são esforço de tração no parafuso $N_{tb,Rd}$, esforço de cisalhamento no parafuso $N_{vb,Rd}$, esforço devido a pressão de contato do parafuso com a borda do furo $F_{c,Rd}$ e o esforço para o colapso por rasgamento $F_{f,Rd}$.

O fator de utilização máximo para a ligação $f_{ligacao}$ pode ser calculado como:

$$f_{ligacao} = \max\left(\frac{N_{tb,Sd}}{N_{tb,Rd}}, \frac{N_{vb,Sd}}{N_{vb,Rd}}, \frac{F_{c,Sd}}{F_{c,Rd}}, \frac{F_{f,Sd}}{F_{f,Rd}}\right) \quad (3.3)$$

Os fatores de utilização para a viga f_{viga} e para ligação $f_{ligacao}$ calculados durante a etapa de verificação de dimensionamento serão utilizados durante o treinamento das redes neurais.

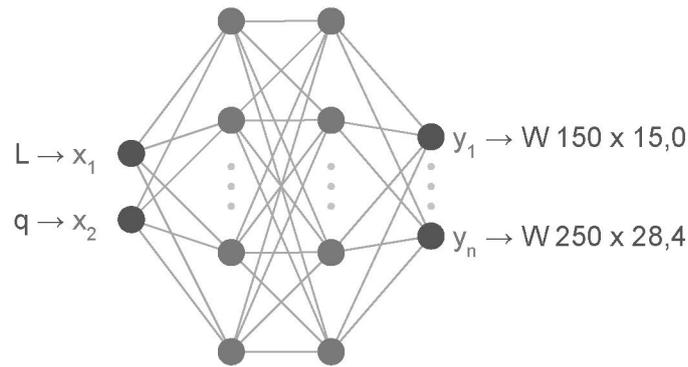
3.6 MODELAGEM DAS REDES NEURAIIS

Na modelagem das redes neurais foram adotados como parâmetros de entrada o comprimento da viga L e o valor da carga distribuída q para que se deseja obter as sugestões de configuração para a viga e os elementos de sua ligação com a coluna.

A estratégia adotada para a modelagem foi separar em quatro redes neurais, sendo duas para a viga conectada à mesa da coluna e duas para a viga conectada à alma da coluna. Para cada caso, a primeira rede neural é responsável por definir o perfil da viga, já a segunda rede neural é responsável por definir os elementos da ligação.

A primeira rede neural tem como parâmetros de entrada o comprimento L da viga e o valor da carga distribuída q . A sua arquitetura é de múltiplas camadas, com camadas totalmente conectadas. Para as camadas internas foi utilizada a função de ativação Relu e na camada de saída foi utilizada a função de ativação sigmóide. A tarefa dessa rede é de classificação, sendo o número de unidades da camada de saída é o mesmo número de seções utilizadas para a viga no conjunto de configurações. O objetivo dessa rede neural é indicar o perfil para a viga e está ilustrada na figura 51.

FIGURA 51 – Ilustração da rede neural para indicar o perfil da viga.



Fonte: O autor (2020)

O valores de entrada x_1 e x_2 para a rede neural foram normalizados utilizando:

$$x_1 = \frac{l - l_{min}}{l_{max} - l_{min}} \quad (3.4)$$

$$x_2 = \frac{q - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} \quad (3.5)$$

sendo que l é comprimento da viga, l_{min} é o menor comprimento de viga no conjunto de configurações para o treinamento, l_{max} é o maior comprimento de viga no conjunto de configurações para o treinamento, q é o valor da carga aplicada na viga, q_{min} é o menor valor de carga aplicada na viga no conjunto de configurações para o treinamento e q_{max} é o maior valor de carga aplicada na viga no conjunto de configurações para o treinamento.

Os valores do vetor de saída y foram calculados utilizando:

$$f_{m,i} = \begin{cases} 1 & f_{viga,i} \geq 1 \\ \frac{m_{max} - m_i}{m_{max} - m_{min}} & f_{viga,i} < 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

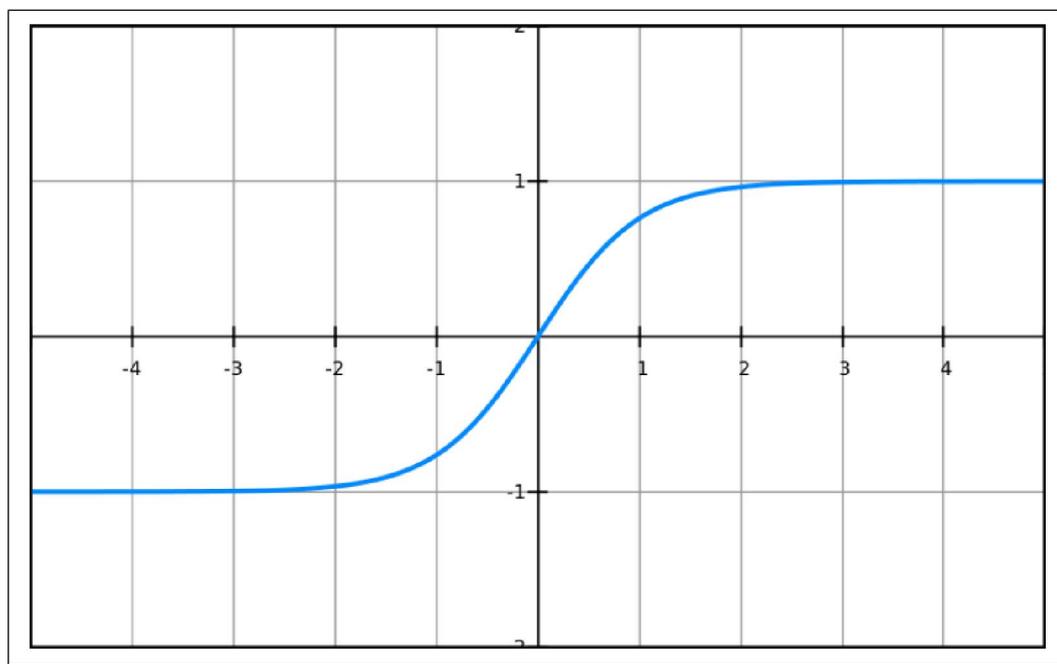
$$y_i = \tanh(f_{viga,i} f_{m,i}) \quad (3.7)$$

sendo que $f_{m,i}$ é o fator de massa para o perfil i , m_i é o valor da massa do perfil, m_{min} é o menor valor das massas dos perfis, m_{max} é o maior valor das massas dos perfis, $f_{viga,i}$ é valor do fator de utilização para o perfil e y_i é o valor de saída esperado da rede neural para o perfil i .

A função \tanh foi utilizada para a normalização pois o valor dela para $x = 0$ é igual a zero e possui limite superior igual a 1, sendo uma boa representação para

o valores dos fatores de utilização que são valores maiores que zero e que há um maior interesse nos valores de x no intervalo entre 0 e 1. O gráfico da função está apresentado na figura 52.

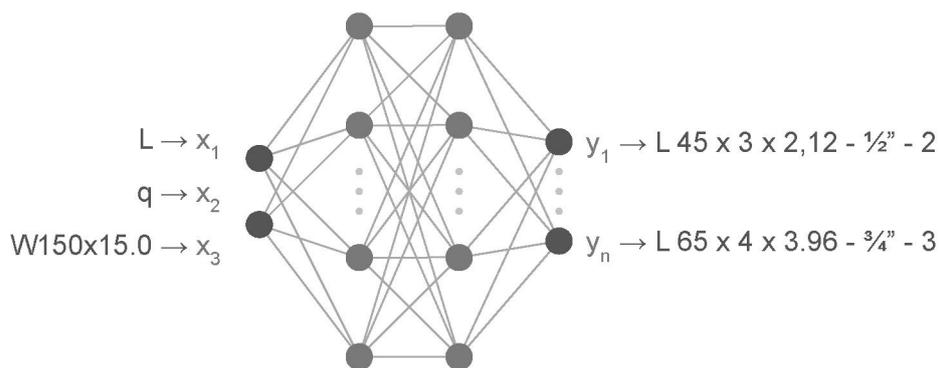
FIGURA 52 – Gráfico da função tangente hiperbólica.



Fonte: Patterson e Gibson (2017)

Da mesma forma que a primeira rede, a segunda rede neural tem como parâmetros o comprimento L e a carga q , mas ainda inclui como parâmetro de entrada o perfil indicado como resultado da primeira rede neural. Esta rede possui a mesma arquitetura e as mesmas funções de ativação da primeira. De forma semelhante a primeira, essa rede também possui a tarefa de classificação. A camada de saída indica a configuração de cantoneira, o diâmetro e a quantidade de parafusos. A quantidade de unidades da camada de saída possui a mesma quantidade de configurações dos elementos de ligação agrupadas por cantoneira, diâmetro e quantidade de parafusos. Na figura 53 está a ilustração desta rede neural. Por exemplo, a primeira unidade da camada de saída representa a configuração com a cantoneira L 45 x 3 x 2,12 com o parafuso ASTM A325 de 1/2" e com dois parafusos por aba da cantoneira.

FIGURA 53 – Ilustração da rede neural para indicar a configuração da ligação.



Fonte: O autor (2020)

O valores de entrada x_1 , x_2 para a rede neural são calculados de forma igual a primeira rede neural e o valor de x_3 pode ser obtido a partir dos valores adotados na tabela 6.

TABELA 6 – Valores adotados para x_3 de acordo com o perfil.

Perfil	x_3
W 150 x 13,0	0,000
W 150 x 18,0	0,111
W 150 x 22,5 (H)	0,222
W 150 x 24,0	0,333
W 200 x 15,0	0,444
W 200 x 35,9 (H)	0,556
W 200 x 86,0 (H)	0,667
W 200 x 100,0 (H)	0,778
W 250 x 25,3	0,889
W 250 x 28,4	1,000

Os valores do vetor de saída y foram calculados utilizando:

$$f_{m,i} = \begin{cases} 1 & f_{ligacao,i} \geq 1 \\ \frac{m_{max} - m_i}{m_{max} - m_{min}} & f_{ligacao} < 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$y_i = \tanh(f_{ligacao,i} f_{m,i}) \quad (3.9)$$

sendo que $f_{m,i}$ é o fator de massa para a configuração i , m_i é o valor da massa das cantoneiras, m_{min} é o menor valor das massas das cantoneiras, m_{max} é o maior valor das massas das cantoneiras, $f_{ligacao,i}$ é valor do fator de utilização para a ligação e y_i é o valor de saída esperado da rede neural para a configuração i .

O algoritmo Adam foi utilizado como otimizador para a o treinamento de ambas as redes neurais (KINGMA; BA, 2014). Em ambas as redes foram utilizadas, de forma experimental, 32 unidades para a primeira camada oculta, 64 para segunda e 32 para a última camada oculta. A duas redes neurais foram treinadas utilizando 50 épocas, sendo que para a primeira o tamanho do *batch* foi de 4 e para a segunda 8.

3.7 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES NEURAIIS

Para verificar as configurações para a viga e os elementos de ligação indicadas pelas redes neurais, foi adotado o critério do número de configurações indicadas que não atendem os critérios de dimensionamento. Esse critério foi adotado pois as redes neurais foram treinadas de maneira que os valores de saída maiores que 1 não atendem os critérios de dimensionamento e devem ser descartados. Porém, pode acontecer de as redes neurais indicarem configurações com valores de saída pouco menores que do que 1 e que na realidade não atendem os critérios de dimensionamento. Por essa razão, para avaliar o desempenho das redes neurais foi adotado o critério de configurações indicadas que não atendem os critérios de dimensionamento.

Para a avaliação dos resultados foram preparados dois conjuntos de testes, um para as redes neurais que indicam as configurações para as vigas conectadas à mesa da coluna e outro conjunto para as redes neurais que indicam as configurações para as vigas conectadas à alma da mesa da coluna. Para cada conjunto foram gerados de forma aleatória 100 casos de teste com valores de dados de entrada L e q . Para cada caso de teste foram obtidas configurações utilizando as redes neurais da mesma forma que o apresentado nos exemplos de aplicação, sendo que para cada perfil foram indicadas apenas duas configurações para os elementos de ligação.

Da mesma forma que o apresentado anteriormente, para cada configuração foram obtidos os diagramas dos esforços internos. Com os valores dos esforços solicitantes foram verificados os critérios de dimensionamento segundo a ABNT (2008). Da verificação de dimensionamento foram obtidos os fatores de utilização para a viga f_{viga} e para a ligação $f_{ligacao}$. A configuração atende os critérios de dimensionamento se ambos os fatores foram iguais ou inferiores a 1.

4 RESULTADOS

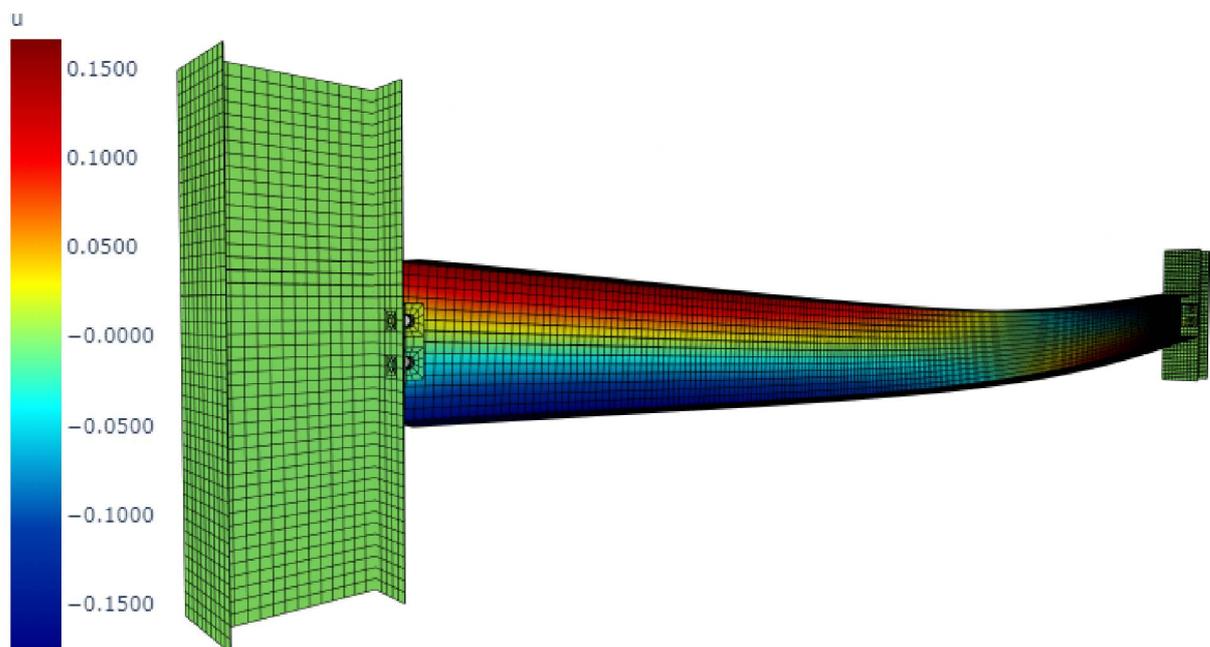
No primeiro item deste capítulo serão apresentados os resultados das análises realizadas pelo método de elementos finitos. Em seguida os resultados do treinamento das redes neurais. Nos itens seguintes serão apresentados exemplos de aplicação utilizando as redes neurais. Em seguida será descrita a validação dos resultados obtidos pelos modelos das redes neurais.

4.1 MEF

Neste item serão apresentados os resultados do método de elementos finitos para uma configuração de viga conectada na mesa e outra na alma da coluna. Além disso serão apresentados os diagramas de esforços internos para essas configurações. Ao final serão apresentados os gráficos de tempo de execução da análise pelo MEF.

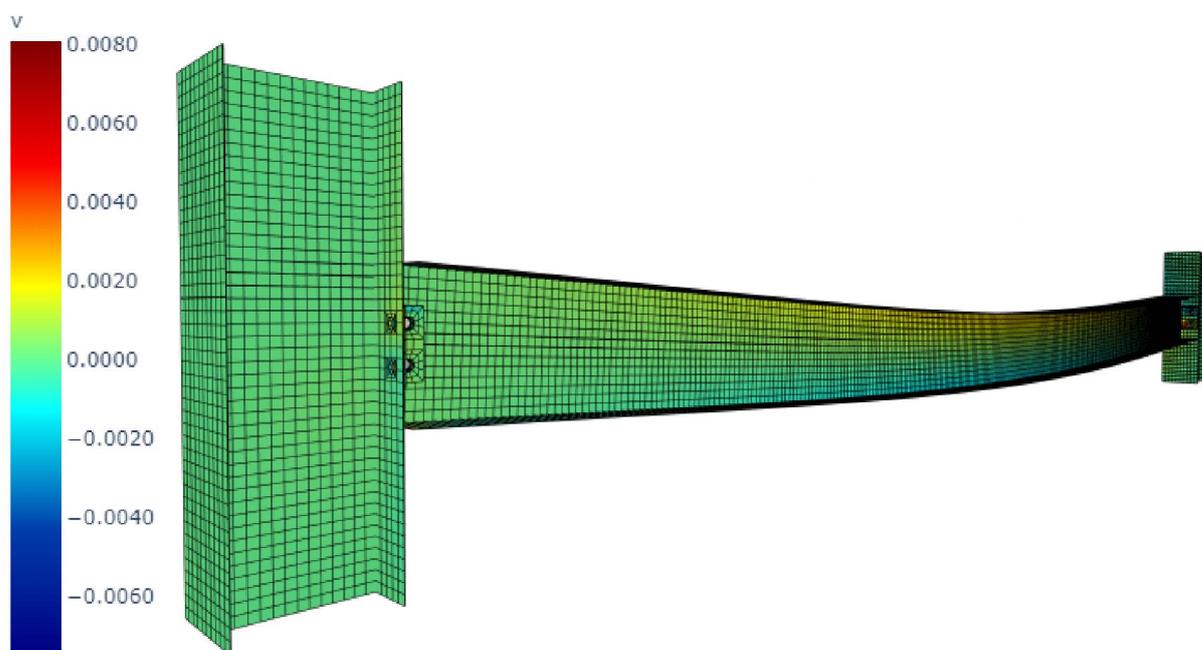
Para a configuração de viga de comprimento 300 cm, com perfil W 150 x 13,0, cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira, viga conectada à mesa da coluna e com a carga aplicada de 0,05 kN/cm, os gráficos dos deslocamentos u na direção x , v na direção y e w na direção z no sistema global de coordenadas estão ilustrados nas figuras 54, 55 e 56.

FIGURA 54 – Ilustração do resultado u em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna).



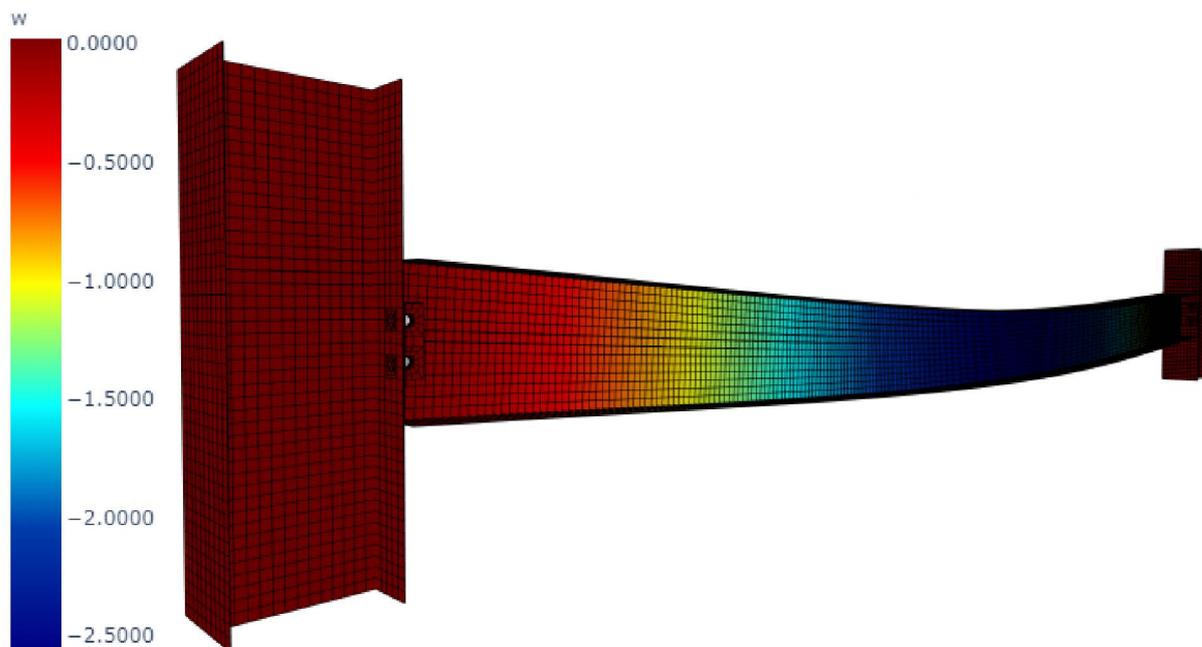
Fonte: O autor (2020)

FIGURA 55 – Ilustração do resultado v em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna).



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 56 – Ilustração do resultado w em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à mesa da coluna)

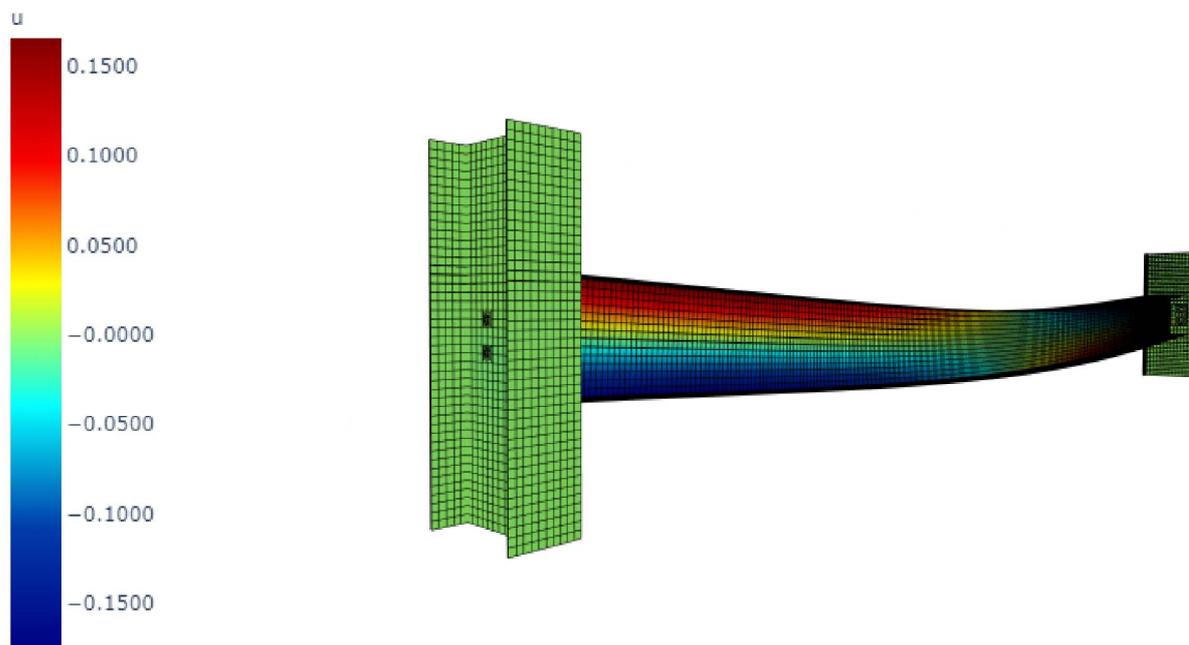


Fonte: O autor (2020)

Já para a configuração de viga de comprimento 300 cm, com perfil W 150 x 13,0, cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira,

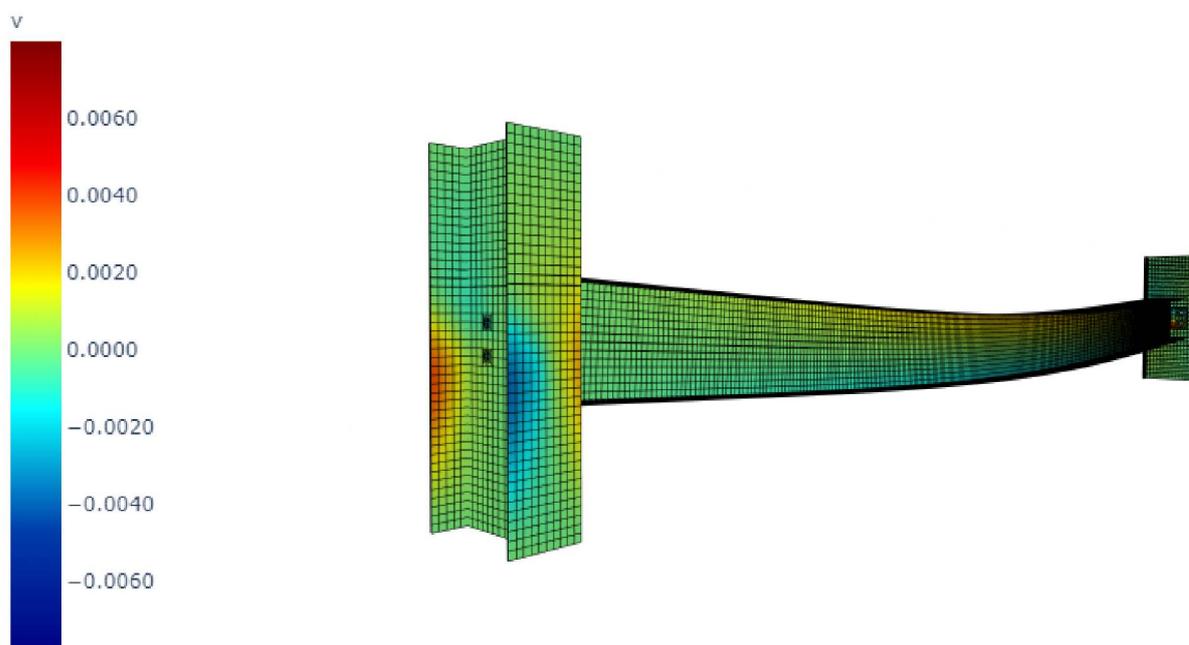
viga conectada à alma da coluna e com a carga aplicada de 0,05 kN/cm, os gráficos dos deslocamentos u na direção x , v na direção y e w na direção z no sistema global de coordenadas estão ilustrados nas figuras 57, 58 e 59.

FIGURA 57 – Ilustração do resultado u em mm com a deformação ampliada em 20x. (viga conectada à alma da coluna)



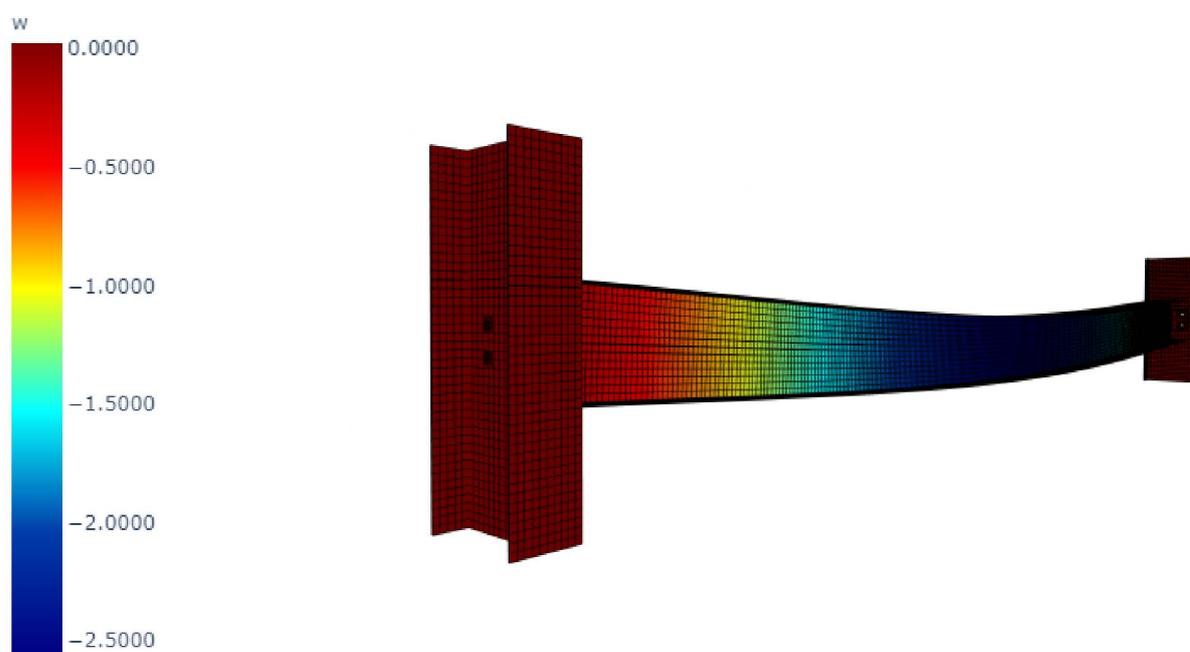
Fonte: O autor (2020)

FIGURA 58 – Ilustração do resultado v em mm com a deformação ampliada em 20x. (viga conectada à alma da coluna)



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 59 – Ilustração do resultado w em mm com a deformação ampliada em 20x (viga conectada à alma da coluna).

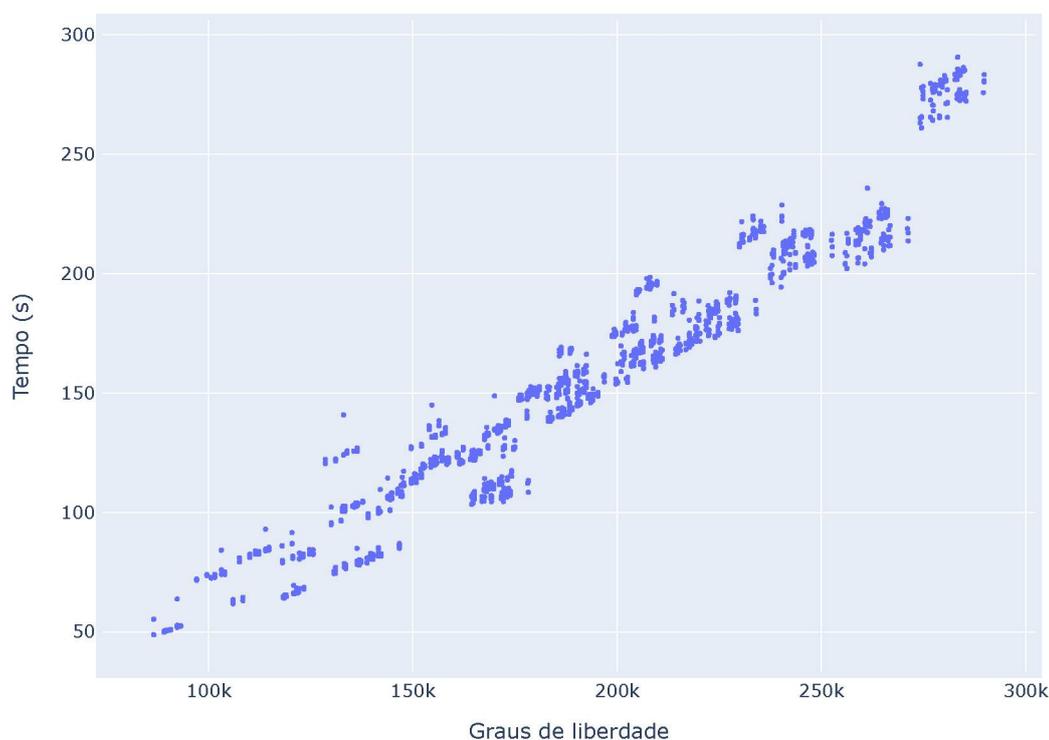


Fonte: O autor (2020)

Na análise dos resultados dos deslocamentos na direção y do sistema global de coordenadas foram encontradas pequenas variações não esperadas, essas alterações pode ser devido a erros numéricos durante a solução do sistema de equações. Essas pequenas variações não influenciam os diagramas de esforços internos da viga.

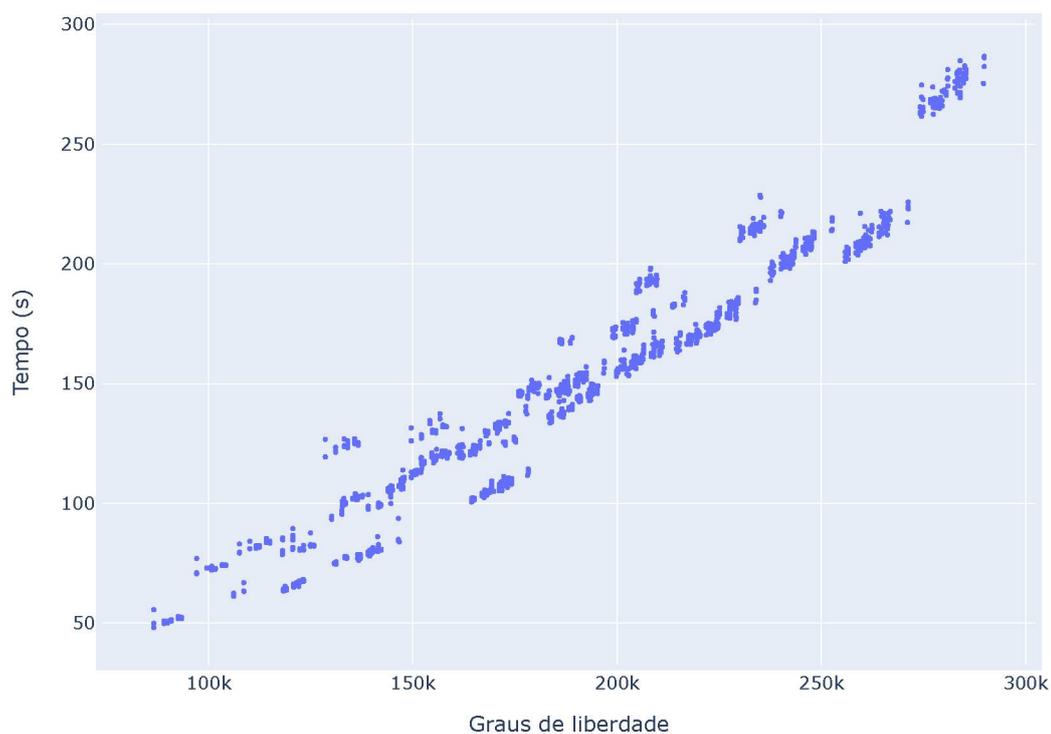
Durante a análise das configurações pelo método de elementos finitos, foram medidos os tempos de execução para cada configuração. O tempo médio de execução inclui gerar a malha, solucionar o sistema de equações e calcular os resultados necessários para os diagramas de esforços internos das seções da viga. Para as configurações de vigas conectadas na mesa da coluna o tempo médio foi de 156,23 s. Já para as configurações de vigas conectadas na alma da coluna o tempo médio foi de 153,27 s. Para as configurações de viga conectadas na mesa da coluna, o gráfico do tempo de execução de cada configuração pelo número de graus de liberdade de sua malha está apresentado na figura 60 e para as configurações de viga conectadas na alma da coluna o gráfico está apresentado na figura 61.

FIGURA 60 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 61 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna.

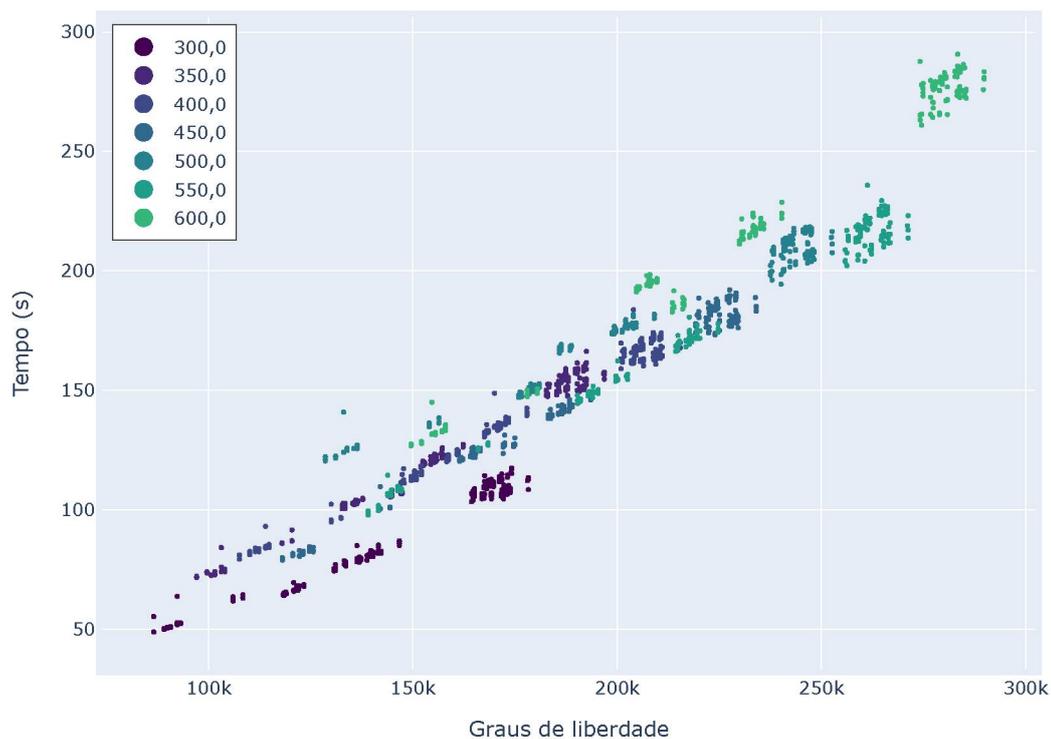


Fonte: O autor (2020)

Os gráficos do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna agrupados por seções e comprimentos estão apresentados nas figuras 62 e 63.

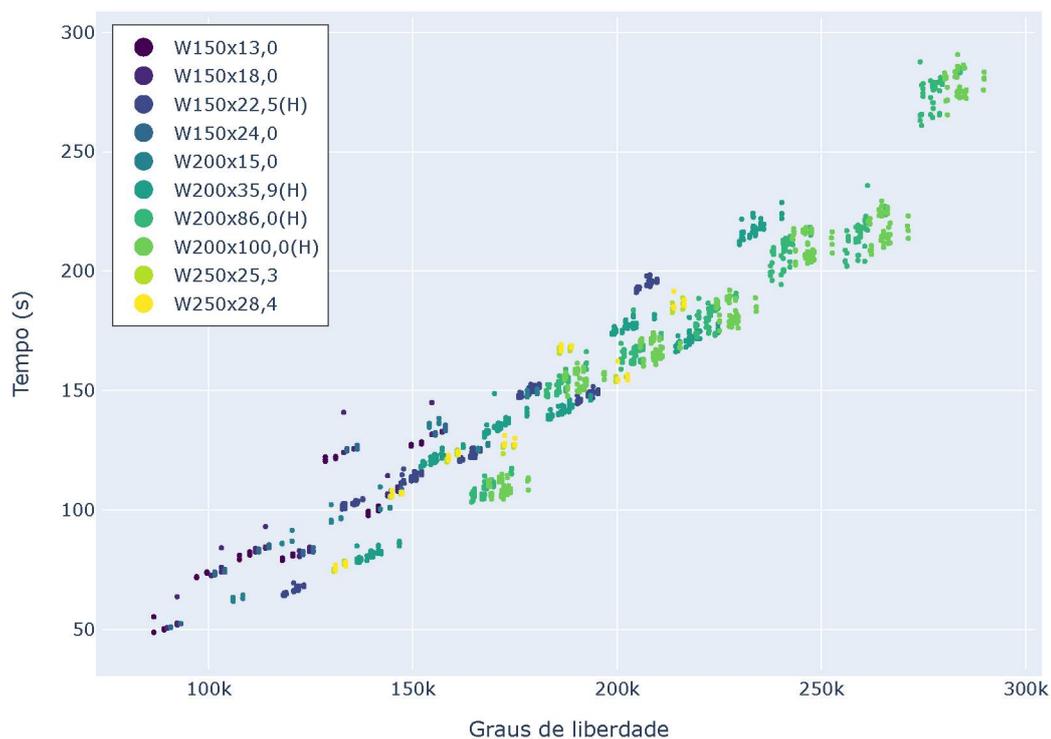
Os gráficos do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna agrupados por seções e comprimentos estão apresentados nas figuras 64 e 65.

FIGURA 62 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna, agrupado por comprimento.



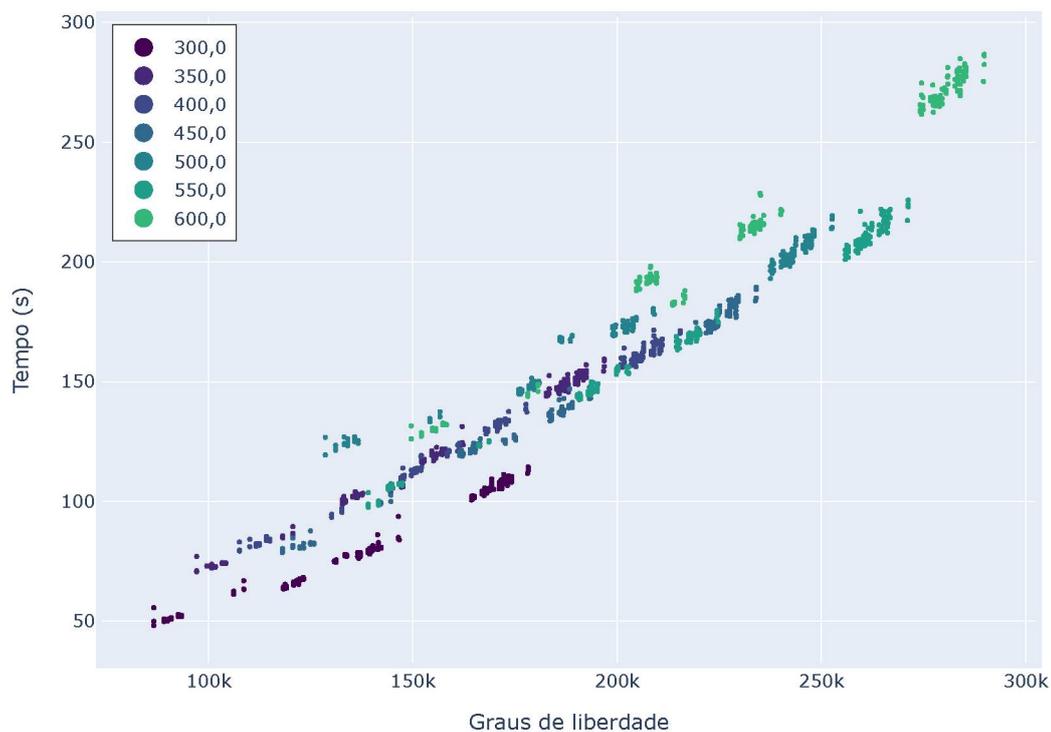
Fonte: O autor (2020)

FIGURA 63 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à mesa da coluna, agrupado por seção.



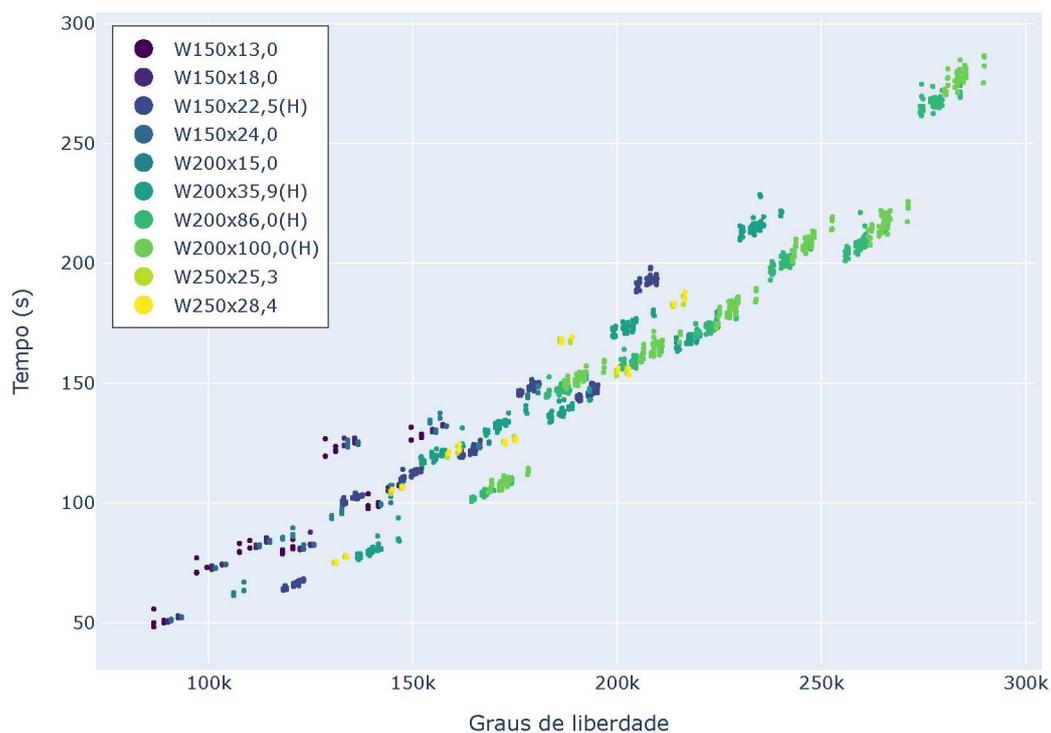
Fonte: O autor (2020)

FIGURA 64 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna, agrupado por comprimento.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 65 – Gráfico do tempo de execução do MEF pelo número de graus de liberdade para as vigas conectadas à alma da coluna, agrupado por seção.

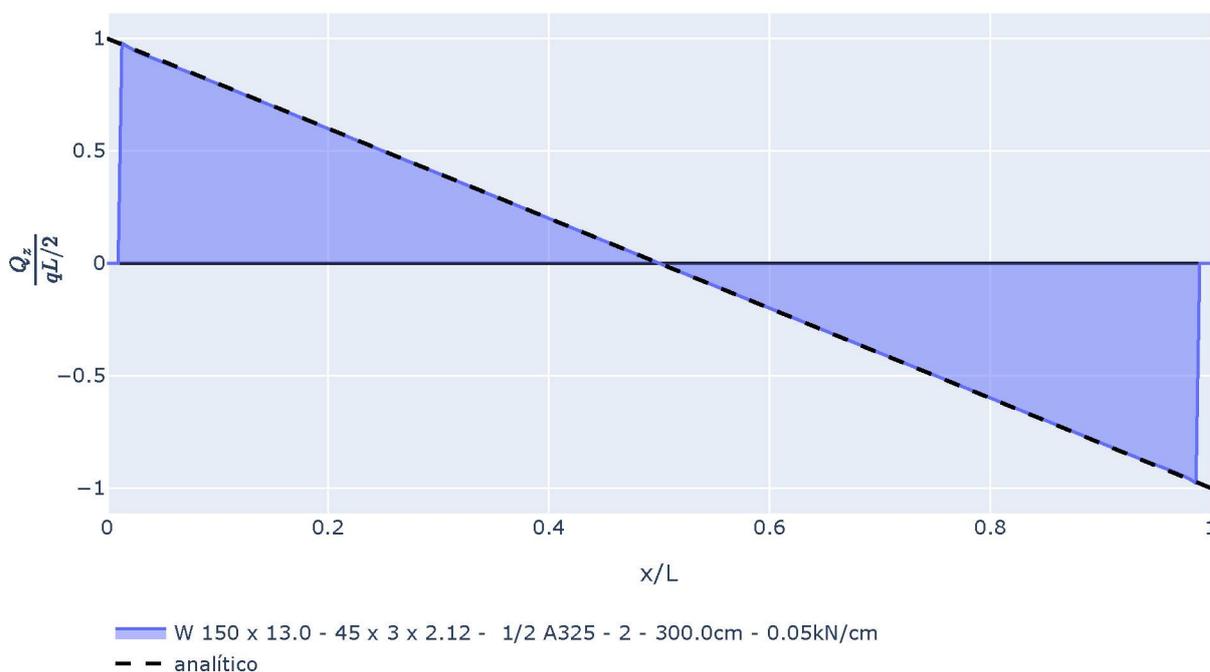


Fonte: O autor (2020)

Os gráficos das figuras 62 e 64 apresentam que quanto maior o comprimento da viga maior é número de elementos e conseqüentemente é maior o tempo de solução do MEF. Já os gráficos das figuras 63 e 65 apresentam que quanto maiores as dimensões da seção, é maior o número de nós em uma seção transversal e conseqüentemente é maior o número de elementos da malha.

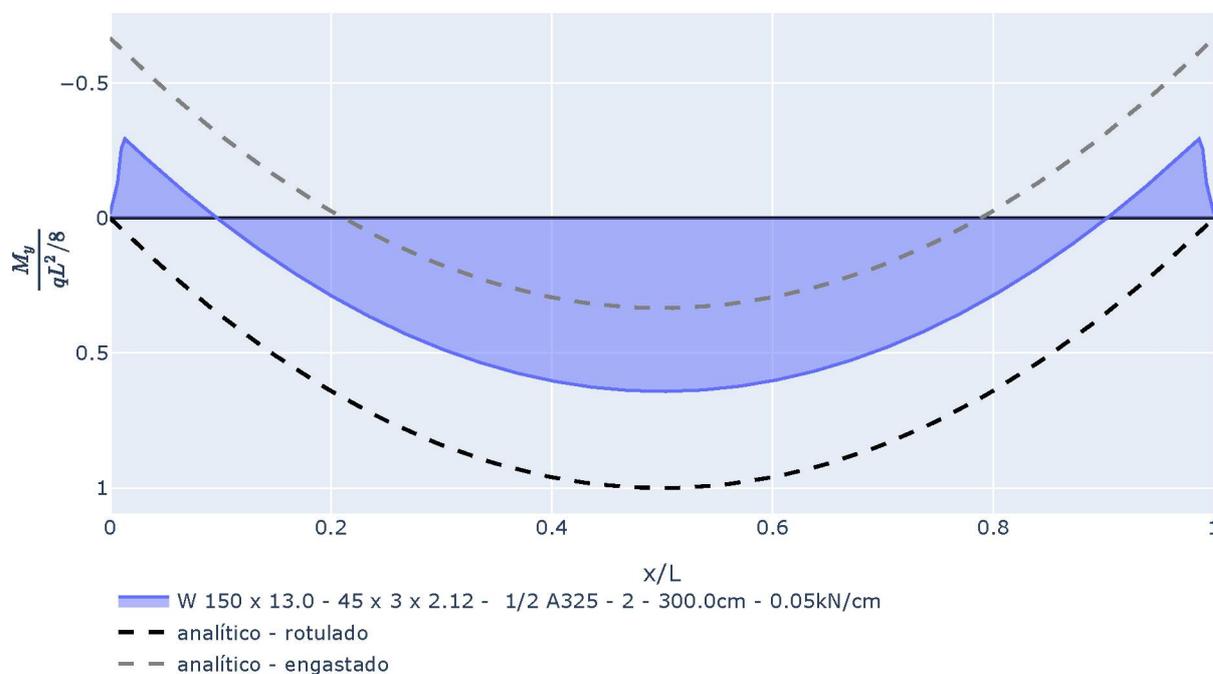
Para a configuração de viga de comprimento 300 cm, com perfil W 150 x 13,0, cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira, viga conectada à mesa da coluna e com a carga aplicada de 0,05 kN/cm, os diagramas de esforço cortante e momento fletor estão ilustrados nas figuras 66 e 67. Os diagramas foram obtidos com o cálculo das forças resultantes para seções espaçadas em 10 mm em todo o comprimento da viga. Em tracejado é apresentado as soluções analíticas para os diagramas, sendo que no diagrama de momento fletor são apresentadas as soluções ideais de ligação rotulada e de ligação totalmente engastada.

FIGURA 66 – Diagrama de esforço cortante para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

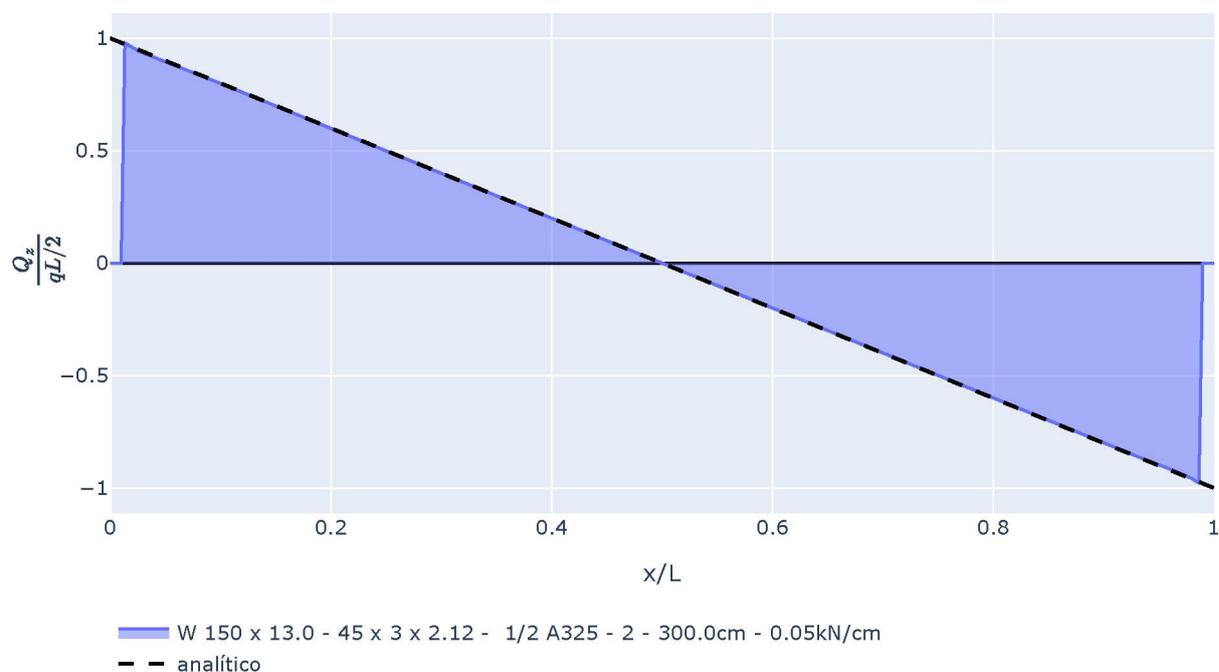
FIGURA 67 – Diagrama de momento fletor para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à mesa da coluna.



Fonte: O autor (2020)

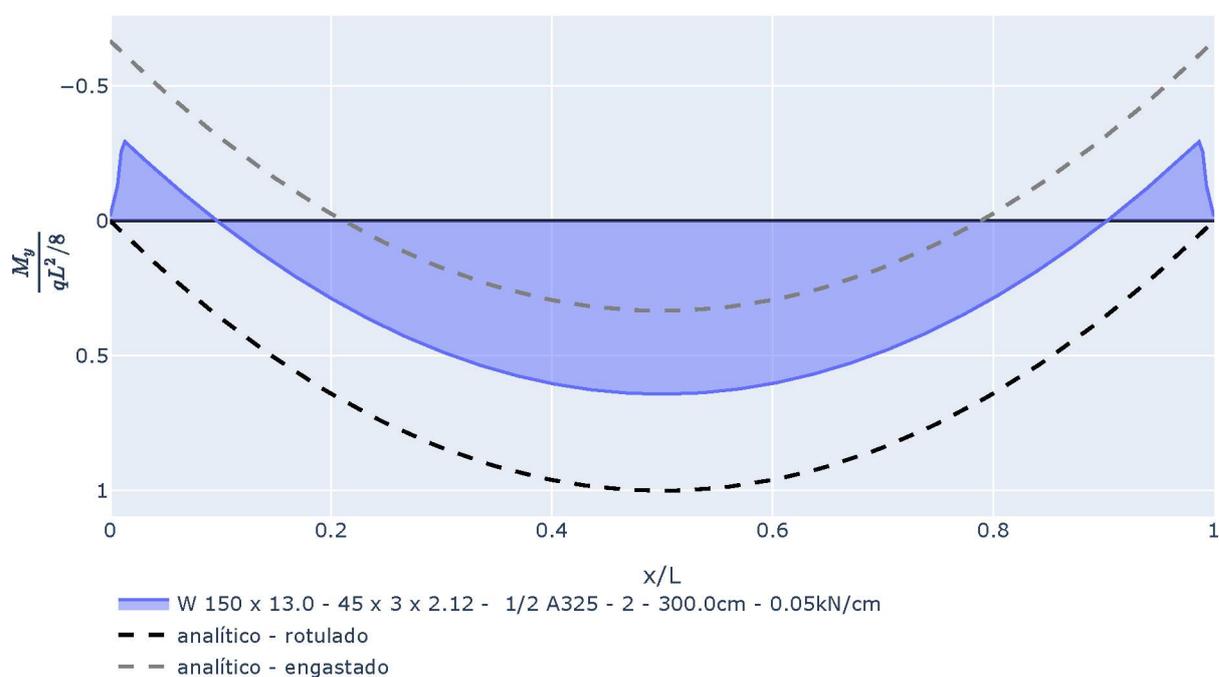
Já para a configuração de viga de comprimento 300 cm, com perfil W 150 x 13,0, cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira, viga conectada à alma da coluna e com a carga aplicada de 0,05 kN/cm, os diagramas de esforço cortante e momento fletor estão ilustrados nas figuras 66 e 67.

FIGURA 68 – Diagrama de esforço cortante para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à alma da coluna.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 69 – Diagrama de momento fletor para o modelo que possui o perfil W 150 x 13,0 para a viga e coluna, o perfil cantoneira L 45 x 3 x 2,12, parafuso de 1/2", 2 parafusos por aba da cantoneira e viga conectada à alma da coluna.

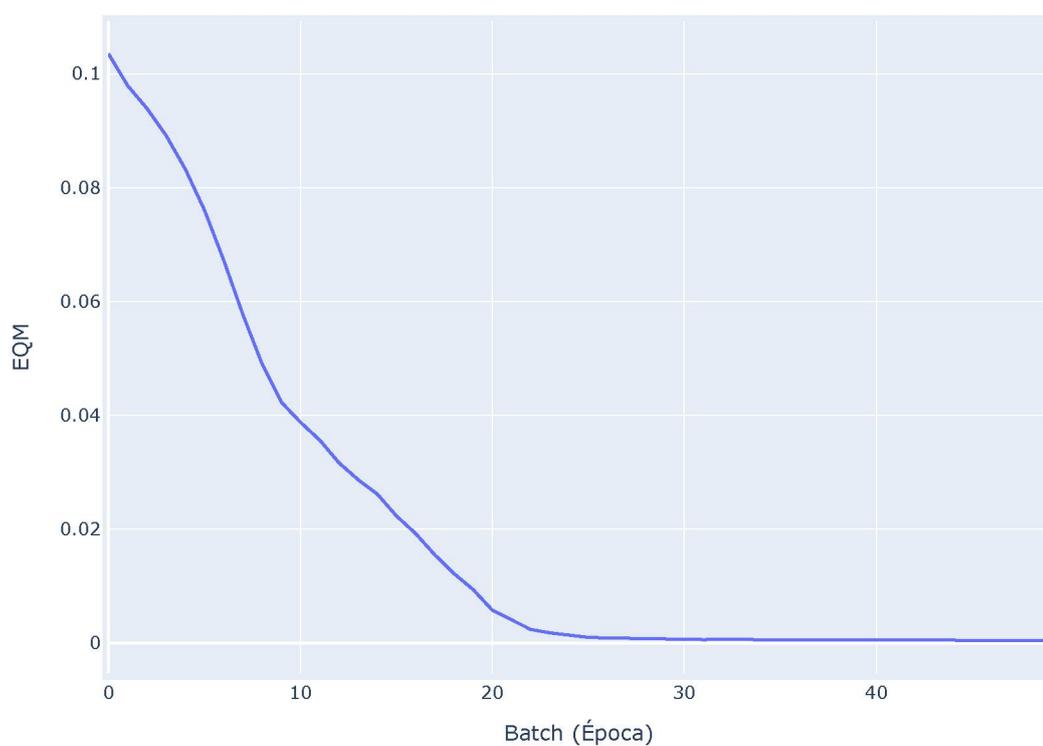


Fonte: O autor (2020)

4.2 REDES NEURAIS

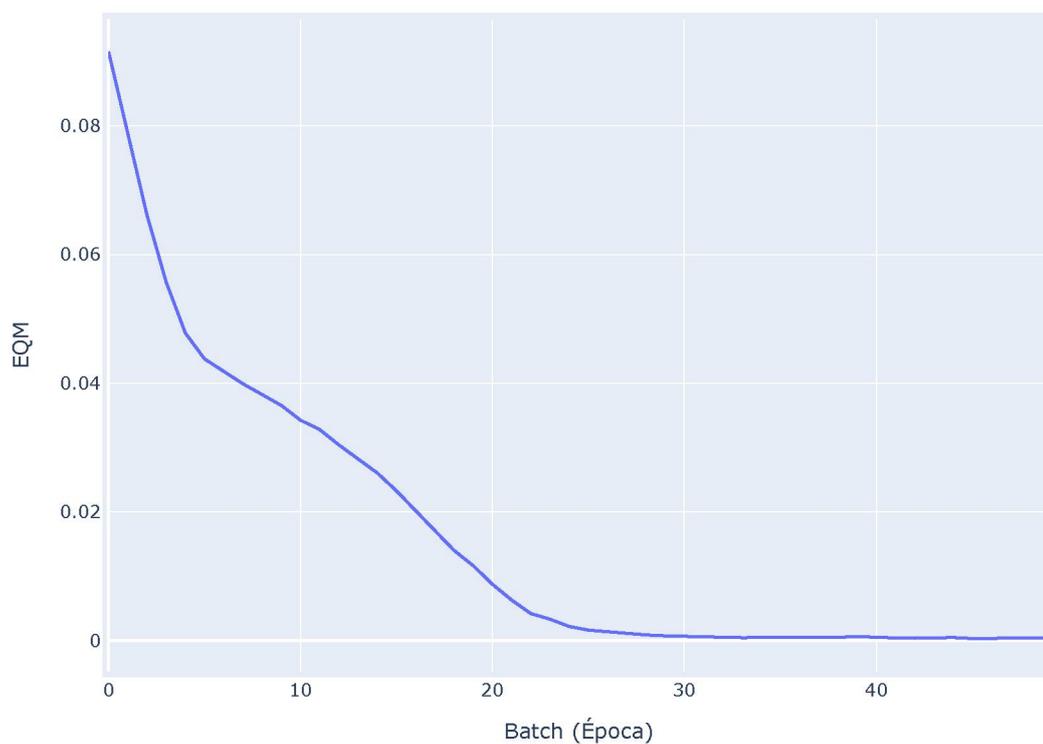
Como resultados do treinamento das redes neurais estão as curvas de erro quadrado médio por época. As curvas de erro quadrado médio por época durante o treinamento das redes neurais que indicam o perfil para viga estão apresentadas nas figuras 70 para a viga conectada na mesa da coluna e na figura 71 para a viga conectada na alma da coluna.

FIGURA 70 – Curva EQM por época para a rede neural que indica o perfil para a viga conectada à mesa.



Fonte: O autor (2020)

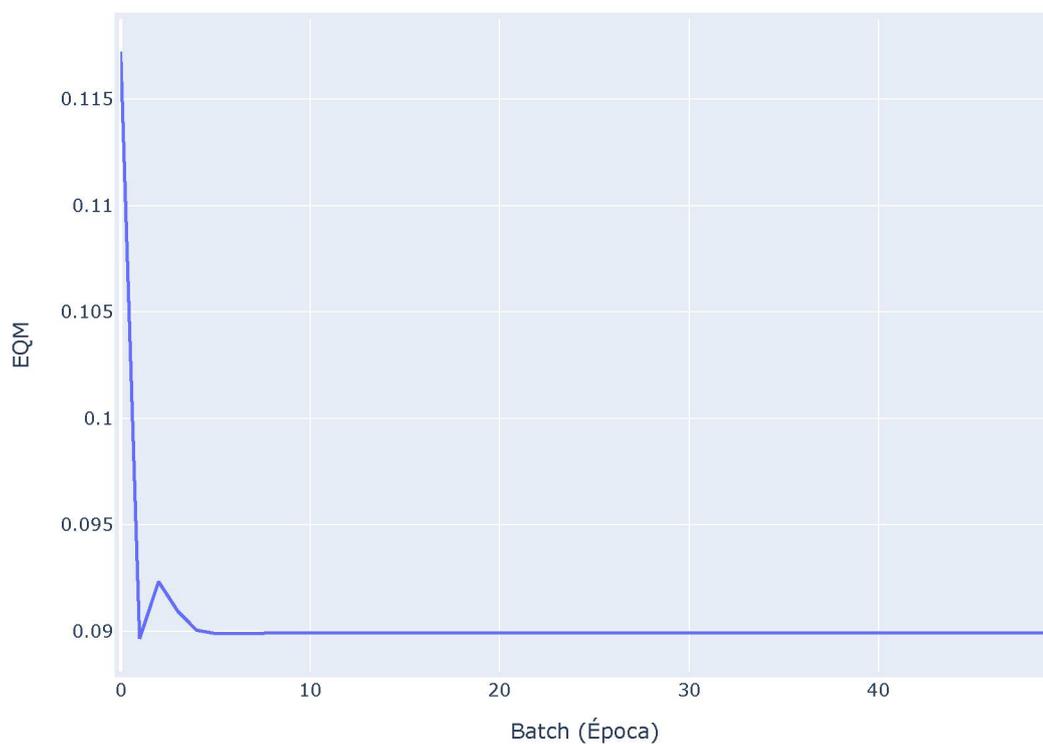
FIGURA 71 – Curva EQM por época para a rede neural que indica o perfil para a viga conectada à alma.



Fonte: O autor (2020)

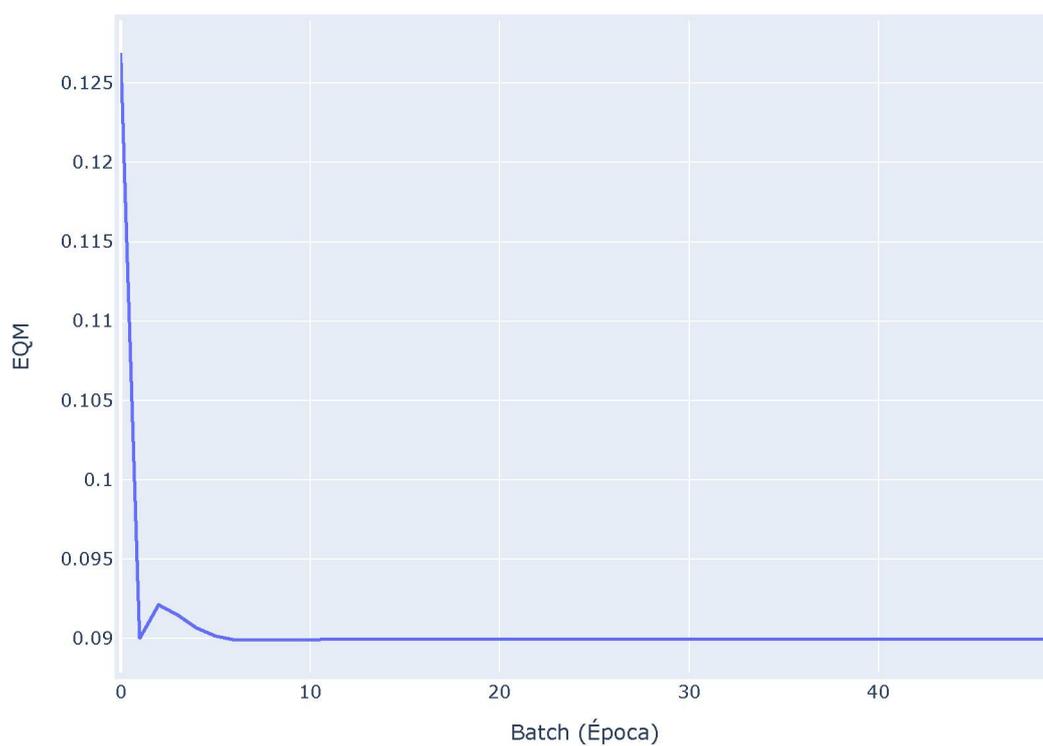
Já para as redes neurais que indicam os elementos de ligação, as curvas de erro quadrado médio por época durante o treinamento estão apresentadas nas figuras 72 para a viga conectada na mesa da coluna e na figura 73 para a viga conectada na alma da coluna.

FIGURA 72 – Curva EQM por época para a rede neural que indica os elementos de ligação para a viga conectada à mesa.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 73 – Curva EQM por época para a rede neural que indica os elementos de ligação para a viga conectada à alma.



Fonte: O autor (2020)

Também foram medidos os tempos de execução da elaboração dos conjuntos de treinamento e do treinamento das redes neurais. Para cada rede neural os tempos de execução da criação dos exemplos para o treinamento e o treinamento estão apresentados na tabela 7.

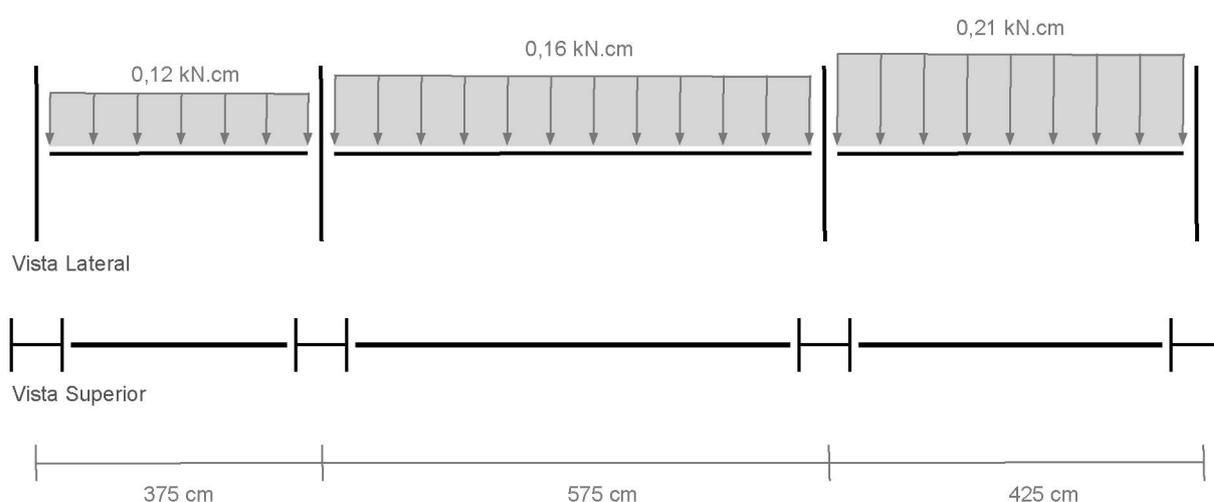
TABELA 7 – Tempos para a criação do conjunto de exemplo e para o treinamento das redes neurais.

Rede neural	Criar exemplos (s)	Treinar (s)	Total (s)
Indicar perfil (mesa)	0,03	1,98	2,02
Indicar elementos ligação (mesa)	0,13	14,55	14,67
Indicar perfil (alma)	0,03	2,89	2,92
Indicar elementos ligação (alma)	0,13	13,72	13,86

4.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO (A)

Para o primeiro exemplo de aplicação das redes neurais modeladas, foi adotada a viga apresentada de forma esquemática na figura 74. A viga possui o comprimento total de 1375 cm e é composta por três vãos. O primeiro vão possui o comprimento de 375 cm e está sujeito a uma carga distribuída de 0,120 kN/cm, o segundo vão possui 575 cm e está sujeito a uma carga distribuída de 0,160 kN/cm e o último vão possui o comprimento de 425 cm e está sujeito a uma carga de 0,210 kN/cm. O objetivo do exemplo é obter a melhor configuração de perfil e dos elementos de ligação para cada um dos vãos da viga.

FIGURA 74 – Esquema da viga para a o primeiro exemplo de aplicação.



Fonte: O autor (2020)

Os vãos com os seus valores de comprimento, valores de carga distribuída aplicada e o elemento da coluna em que está conectado estão apresentados na tabela

8.

TABELA 8 – Características dos vãos da viga do primeiro exemplo.

Vão	Comprimento (cm)	Carga (kN/cm)	Conectado ao elemento
V1	375	0,120	Mesa
V2	575	0,160	Mesa
V3	425	0,210	Mesa

Para cada vão, o primeiro passo foi obter os valores de entrada para a rede neural que indica o perfil para a viga. Os valores de entrada para cada vão estão apresentados na tabela 9, sendo que x_1 representa o valor do comprimento calculado pela equação 3.4 e x_2 representa o valor da carga aplicada calculado pela equação 3.5.

TABELA 9 – Valores de entrada para a rede neural que indica os perfis.

Vão	x_1	x_2
V1	0,250	0,350
V2	0,917	0,550
V3	0,417	0,800

Os valores de saída y_I obtidos da rede neural que indica o perfil para o vão V1 estão apresentados na tabela 10.

TABELA 10 – Valores de saída obtidos pela rede neural para o perfil do vão V1.

Vão	Perfil	y_I
V1	W 150x13,0	0,5526
V1	W 150x18,0	0,3538
V1	W 150x22,5 (H)	0,2880
V1	W 150x24,0	0,2504
V1	W 200x15,0	0,4029
V1	W 200x35,9 (H)	0,1464
V1	W 200x86,0 (H)	0,0085
V1	W 200x100,0 (H)	0,0020
V1	W 250x25,3	0,1950
V1	W 250x28,4	0,1719

Como a rede neural foi treinada de forma que quanto maior o valor de saída, maior é a indicação do perfil para os valores de entrada e que somente os perfis com valores de saída menores que 1 atendem os critérios de dimensionamento, dessa forma, ignorando os perfis com valores maiores que 1 e ordenando de forma decrescente, os perfis indicados pela rede neural para o vão V1 estão apresentados na tabela 11.

TABELA 11 – Valores de saída filtrados e ordenados para o perfil do vão V1.

Vão	Perfil	y_I
V1	W 150x13,0	0,5526
V1	W 200x15,0	0,4029
V1	W 150x18,0	0,3538
V1	W 150x22,5 (H)	0,2880
V1	W 150x24,0	0,2504
V1	W 250x25,3	0,1950
V1	W 250x28,4	0,1719
V1	W 200x35,9 (H)	0,1464
V1	W 200x86,0 (H)	0,0085
V1	W 200x100,0 (H)	0,0020

Para indicar os elementos da ligação da viga com a coluna foi utilizada a segunda rede neural. Os valores de entrada para essa rede neural são o comprimento da viga, a carga aplicada e o perfil indicado anteriormente. Dessa forma, para o vão V1 os valores de entrada para cada um dos perfis indicados estão apresentados na tabela 12. O valor de entrada x_3 que representa o perfil foi obtido a partir da tabela 6.

TABELA 12 – Valores de entrada para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1

Vão	Perfil	x_1	x_2	x_3
V1	W 150x13,0	0,250	0,350	0,000
V1	W 200x15,0	0,250	0,350	0,444
V1	W 150x18,0	0,250	0,350	0,111
V1	W 150x22,5 (H)	0,250	0,350	0,222
V1	W 150x24,0	0,250	0,350	0,333
V1	W 250x25,3	0,250	0,350	0,889
V1	W 250x28,4	0,250	0,350	1,000
V1	W 200x35,9 (H)	0,250	0,350	0,556
V1	W 200x86,0 (H)	0,250	0,350	0,667
V1	W 200x100,0 (H)	0,250	0,350	0,778

De forma semelhante a rede neural que indica o perfil para a viga, na rede neural que indica os elementos da ligação devem ser ignoradas as configurações com valores de saída maiores que 1, pois apresentam configurações que não atendem os critérios de dimensionamento, e quanto mais próximo de 1 mais indicada é a configuração. Para o perfil W 150x13,0 do vão V1, os valores de saída y_{II} da rede neural que indica as configurações dos elementos de ligação estão apresentados na tabela 23, já considerando os valores menores que 1 e ordenados de forma decrescente.

TABELA 13 – Valores de saída para a rede neural que indica os elementos da ligação - vão V1 - perfil W150x13,0

Vão	Perfil	Cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_{II}
V1	W 150x13,0	L 45x3x2,12	A325 1/2"	2	0,5796
V1	W 150x13,0	L 45x4x2,77	A325 1/2"	2	0,4256
V1	W 150x13,0	L 45x3x2,12	A325 1/2"	3	0,3670
V1	W 150x13,0	L 45x5x3,38	A325 1/2"	2	0,3397
V1	W 150x13,0	L 45x4x2,77	A325 1/2"	3	0,2706
V1	W 150x13,0	L 45x5x3,38	A325 1/2"	3	0,2144

Repetindo o mesmo processo para os outros perfis do vão V1, foram obtidas as configurações para o perfil da viga e os elementos de ligação como indicado na tabela 14. Foram consideradas no máximo as 2 primeiras configurações dos elementos de ligação para cada perfil da viga, sendo que y_I é o valor de saída da rede neural que indica o perfil da viga e y_{II} é o valor de saída da rede neural que indica os elementos de ligação. Os configurações foram ordenadas primeiro em relação ao y_I e em seguida pelo y_{II} . Foi ordenado desta maneira pois a viga possui uma massa maior em relação as massas das cantoneiras.

TABELA 14 – Configurações indicadas para o vão V1.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x13,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,5526	0,5796
2	W 150x13,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,5526	0,4256
3	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,4029	0,5839
4	W 200x15,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4029	0,4273
5	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,3538	0,5813
6	W 150x18,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3538	0,4268
7	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2880	0,5824
8	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2880	0,4272
9	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2504	0,5831
10	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2504	0,4272
11	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1950	0,5729
12	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1950	0,4180
13	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1719	0,5698
14	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1719	0,4152
15	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1464	0,5829
16	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1464	0,4261
17	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0085	0,5795
18	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0085	0,4234
19	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0020	0,5762
20	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0020	0,4207

Para o vão V2 com comprimento de 575 cm e carga aplicada de 0,160 kN/cm,

as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela 15.

TABELA 15 – Configurações indicadas para o vão V2.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,8422	0,8868
2	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,8422	0,7762
3	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,7352	0,8875
4	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,7352	0,7772
5	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,5856	0,8706
6	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,5856	0,7605
7	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4976	0,8630
8	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4976	0,7536
9	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4063	0,8874
10	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4063	0,7773
11	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0014	0,8831
12	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0014	0,7725
13	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0002	0,8783
14	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0002	0,7673

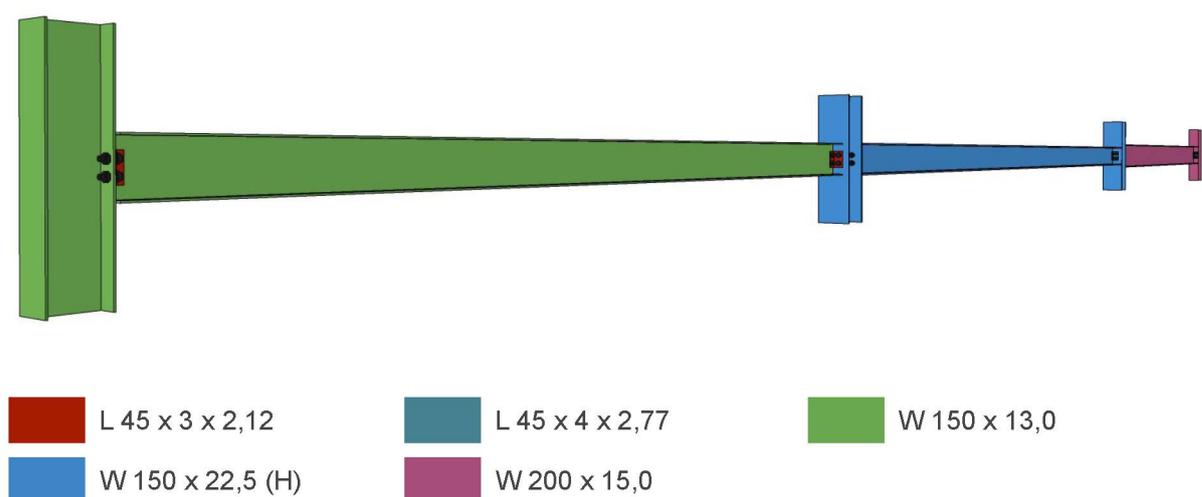
Para o vão V3 de comprimento de 425 cm e carga aplicada de 0,210 kN/cm, as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela 16.

TABELA 16 – Configurações indicadas para o vão V3.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 200x15,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,9541	0,8368
2	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,9541	0,7304
3	W 150x18,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,8475	0,8429
4	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,8475	0,7346
5	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,6748	0,8408
6	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,6748	0,7332
7	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,5845	0,8388
8	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,5845	0,7318
9	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4569	0,8289
10	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4569	0,7243
11	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3847	0,8270
12	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,3847	0,7226
13	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3163	0,8348
14	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,3163	0,7290
15	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0028	0,8328
16	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0028	0,7276
17	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0005	0,8309
18	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0005	0,7260

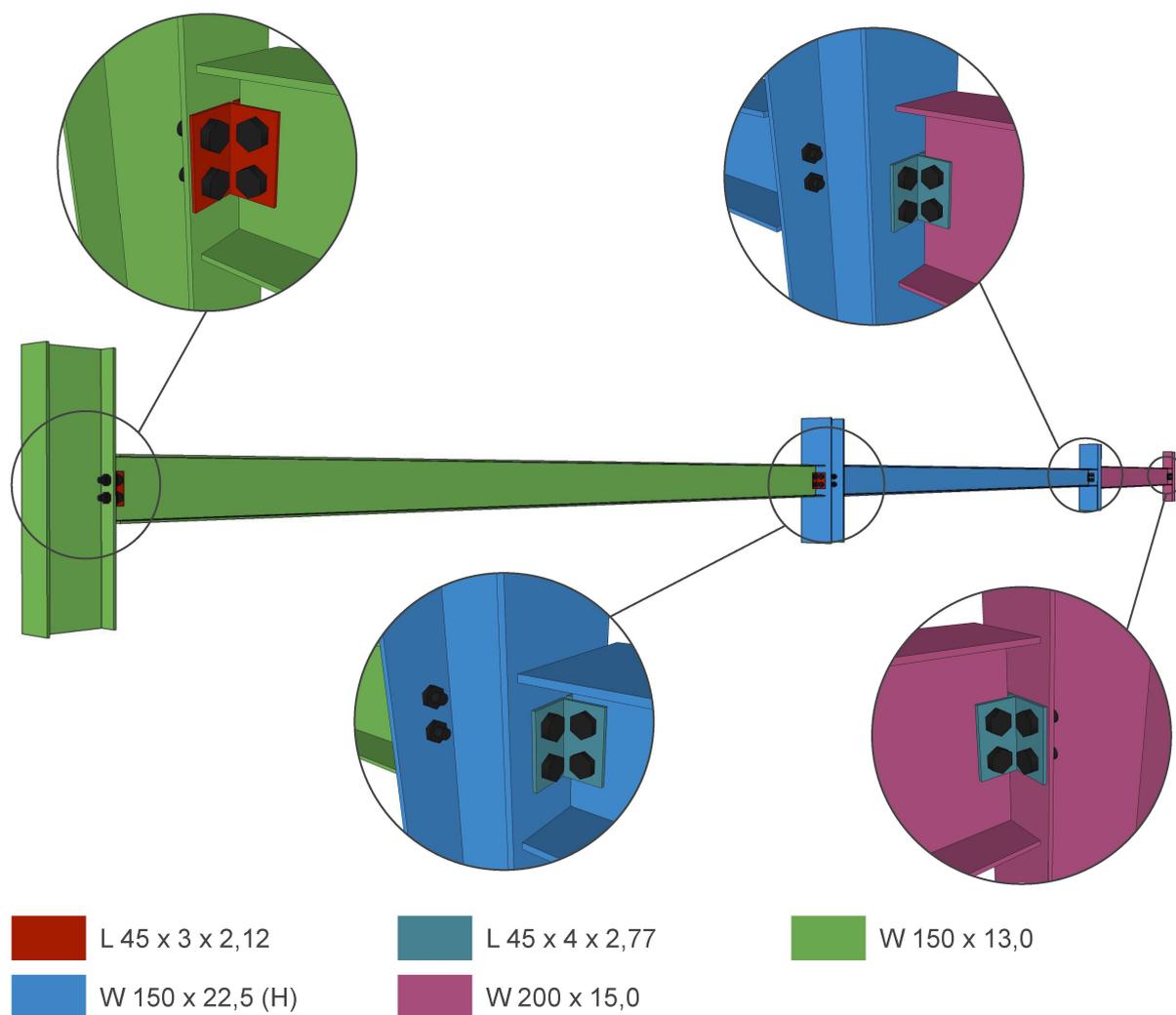
A figura 75 apresenta o desenho tridimensional para a viga adotando para cada vão a primeira configuração indicada para o perfil e os elementos de ligação. Já na figura 76 são apresentados os detalhes das ligações. Nos casos em que a coluna está conectada em mais de um vão, foi escolhido o perfil do vão que possuem as maiores espessuras, pois na verificação de pressão de apoio durante a verificação de dimensionamento é levado em consideração o elemento com a espessura mais crítica.

FIGURA 75 – Desenho tridimensional da viga utilizando a primeira configuração indicada para cada vão pelas redes neurais com a identificação dos perfis.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 76 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis e detalhes das ligações.



Fonte: O autor (2020)

Caso seja necessário escolher uma única configuração para todos os vãos da viga, podem ser utilizadas qualquer uma das configurações apresentadas na tabela 17, pois foram indicadas em comum para todos os vãos.

TABELA 17 – Configurações de perfis e elementos de ligação em comum para todos os vãos.

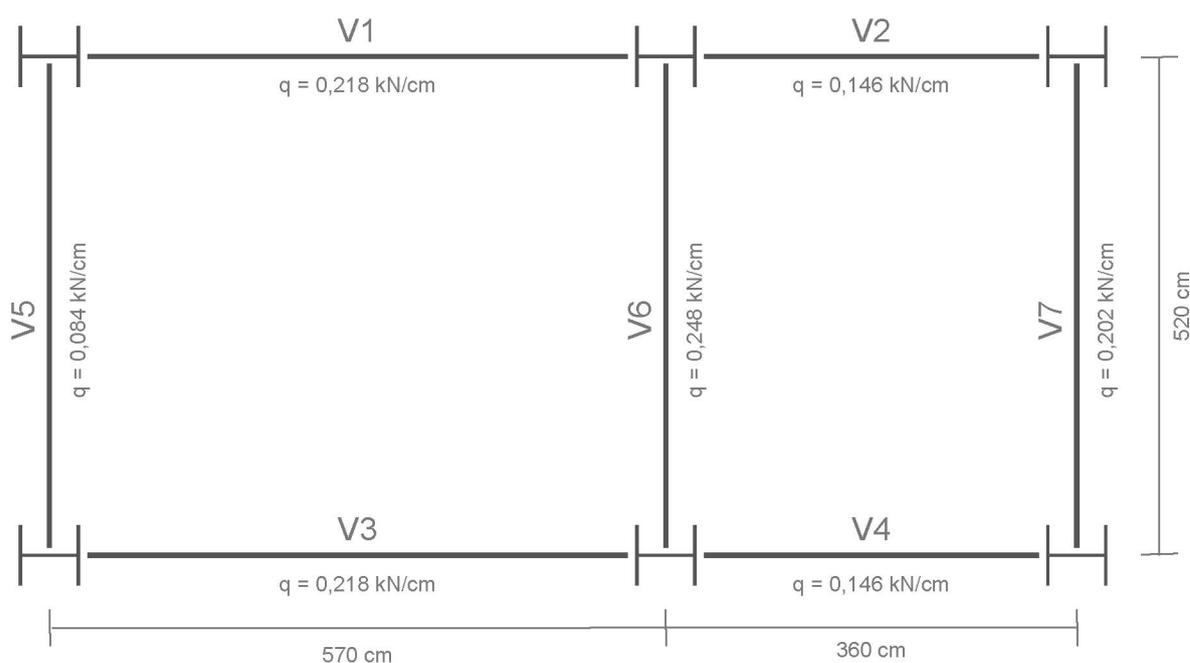
#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Quantidade parafusos
1	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
2	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
3	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
4	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
5	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
6	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2
7	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2

Neste exemplo o tempo total de execução para obter as indicações das configurações utilizando as redes neurais para os três vãos foi de 1,98 s.

4.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO (B)

Para utilizar as redes neurais modeladas para a ligação da viga tanto na mesa como na alma da coluna, foram adotadas as vigas apresentadas de forma esquemática na figura 77. Da mesma forma que o exemplo anterior, o objetivo é obter a melhor configuração para cada uma das vigas.

FIGURA 77 – Esquema das vigas para o segundo exemplo de aplicação.



Fonte: O autor (2020)

As vigas deste exemplo com os seus valores de comprimento, valores de carga distribuída aplicada e a qual elemento na coluna estão conectadas estão apresentadas na tabela 18.

TABELA 18 – Características das vigas do segundo exemplo.

Viga	Comprimento (cm)	Carga (kN/cm)	Elemento de conexão
V1	570	0,218	Mesa
V2	360	0,146	Mesa
V3	570	0,218	Mesa
V4	360	0,146	Mesa
V5	520	0,084	Alma
V6	520	0,248	Alma
V7	520	0,202	Alma

Para cada viga, o primeiro passo foi obter os valores de entrada para a rede neural que indica o perfil para a viga. Os valores de entrada estão apresentados na tabela 19, sendo que x_1 representa o valor do comprimento calculado de acordo com a equação 3.4 e x_2 representa o valor da carga aplicada calculado de acordo com a equação 3.5.

TABELA 19 – Valores de entrada para a rede neural que indica os perfis.

Viga	x_1	x_2
V1	0,900	0,840
V2	0,200	0,480
V3	0,900	0,840
V4	0,200	0,480
V5	0,733	0,170
V6	0,733	0,990
V7	0,733	0,760

Os valores de saída y_I obtidos da rede neural que indica o perfil para a viga V1 estão apresentados na tabela 20.

TABELA 20 – Valores de saída obtidos pela rede neural para o perfil da viga V1.

Viga	Perfil	y_I
V1	W 150x13,0	1,9759
V1	W 150x18,0	1,4084
V1	W 150x22,5 (H)	1,1584
V1	W 150x24,0	1,0251
V1	W 200x15,0	1,5640
V1	W 200x35,9 (H)	0,5902
V1	W 200x86,0 (H)	0,0010
V1	W 200x100,0 (H)	0,0002
V1	W 250x25,3	0,8373
V1	W 250x28,4	0,7104

Como a rede neural foi treinada de forma que quanto maior o valor de saída, maior é a indicação do perfil para os valores de entrada e que somente os perfis com valores de saída menores que 1 atendem os critérios de dimensionamento, dessa forma, ignorando os perfis com valores maiores que 1 e ordenando de forma decrescente, os perfis indicados pela rede neural para a viga V1 estão apresentados na tabela 21.

TABELA 21 – Valores de saída filtrados e ordenados para o perfil da viga V1.

Perfil	y_I
W 250x25,3	0,8373
W 250x28,4	0,7104
W 200x35,9 (H)	0,5902
W 200x86,0 (H)	0,0010
W 200x100,0 (H)	0,0002

Para indicar os elementos da ligação do perfil da viga com o perfil da coluna foi utilizada a segunda rede neural. Os valores de entrada para essa rede neural são o comprimento da viga, a carga aplicada e o perfil indicado anteriormente. Dessa forma, para a viga V1, os valores de entrada para cada um dos perfis indicados estão apresentados na tabela 22. O valor de entrada x_3 que representa o perfil pode ser obtido pela tabela 6.

TABELA 22 – Valores de entrada para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1

Viga	Perfil	x_1	x_2	x_3
V1	W 250x25,3	0,900	0,840	0,889
V1	W 250x28,4	0,900	0,840	1,000
V1	W 200x35,9 (H)	0,900	0,840	0,556
V1	W 200x86,0 (H)	0,900	0,840	0,667
V1	W 200x100,0 (H)	0,900	0,840	0,778

De forma semelhante a rede neural que indica o perfil para a viga, na rede neural que indica os elementos da ligação devem ser ignoradas as configurações com valores de saída maiores que 1, pois apresentam configurações que não atendem os critérios de dimensionamento, e quanto mais próximo de 1 mais indicado é a configuração. Para o perfil W 150x22,5 da viga V1, os valores de saída y_{II} da rede neural que indica as configurações dos elementos de ligação estão apresentados na tabela 23, já considerando os valores menores que 1 e ordenados de forma decrescente.

TABELA 23 – Valores de saída para a rede neural que indica os elementos da ligação - V1 - W250x25,3

Viga	Perfil	Cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_{II}
V1	W 250x25,3	L 45x5x3,38	A325 1/2"	2	0,9552
V1	W 250x28,4	L 45x4x2,77	A325 1/2"	3	0,7607
V1	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	A325 1/2"	3	0,6060

Repetindo o mesmo processo para os outros perfis da viga V1, foram obtidos as configurações para o perfil da viga e os elementos de ligação como indicado na tabela 24. Foram consideradas no máximo as 4 primeiras configurações dos elementos

de ligação para cada perfil para a viga. Os valores apresentados nessa tabela também valem para a viga V3, já que ambas possuem as mesmas características e os mesmos valores de entrada para as redes neurais.

TABELA 24 – Configurações indicadas para as vigas V1 e V3.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,8373	0,9552
2	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,8373	0,7607
3	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,8373	0,6060
4	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,7104	0,9540
5	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,7104	0,7602
6	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,7104	0,6052
7	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,5902	0,9554
8	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,5902	0,7596
9	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,5902	0,6056
10	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0010	0,9553
11	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0010	0,7599
12	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0010	0,6057
13	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0002	0,9552
14	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0002	0,7603
15	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0002	0,6059

Para as vigas V2 e V4 com comprimento de 360 cm e carga aplicada de 0,146 kN/cm, as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela 25.

TABELA 25 – Configurações indicadas para as vigas V2 e V4.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x13,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,6418	0,6784
2	W 150x13,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,6418	0,4976
3	W 150x13,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,6418	0,4293
4	W 150x13,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,6418	0,3943
5	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,4695	0,6833
6	W 200x15,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4695	0,4998
7	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4695	0,4320
8	W 200x15,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,4695	0,3950
9	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,4131	0,6803
10	W 150x18,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4131	0,4990
11	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4131	0,4304
12	W 150x18,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,4131	0,3947
13	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,3332	0,6816
14	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3332	0,4998
15	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,3332	0,4311
16	W 150x22,5 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,3332	0,3950
17	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2885	0,6825
18	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2885	0,4998
19	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,2885	0,4316
20	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,2885	0,3950
21	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2244	0,6781
22	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2244	0,4933
23	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,2244	0,4289
24	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,2244	0,3898
25	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1951	0,6730
26	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1951	0,4887
27	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,1951	0,4258
28	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,1951	0,3860
29	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1652	0,6841
30	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1652	0,4999
31	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,1652	0,4324
32	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,1652	0,3950
33	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0078	0,6850
34	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0078	0,4999
35	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0078	0,4329
36	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0078	0,3951
37	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0018	0,6832
38	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0018	0,4979
39	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0018	0,4319
40	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0018	0,3936

Para a vigas V5 de comprimento de 520 cm, carga aplicada de 0,084 kN/cm e conectadas à alma da coluna, as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela

26.

TABELA 26 – Configurações indicadas para a viga V5.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x13,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,7272	0,5940
2	W 150x13,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,7272	0,4315
3	W 150x13,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,7272	0,3573
4	W 150x13,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,7272	0,3311
5	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,5352	0,5799
6	W 200x15,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,5352	0,4232
7	W 200x15,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,5352	0,3509
8	W 200x15,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,5352	0,3232
9	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,4824	0,5904
10	W 150x18,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,4824	0,4297
11	W 150x18,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4824	0,3553
12	W 150x18,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,4824	0,3294
13	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,3744	0,5856
14	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3744	0,4271
15	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,3744	0,3528
16	W 150x22,5 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,3744	0,3270
17	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,3120	0,5824
18	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,3120	0,4250
19	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,3120	0,3515
20	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,3120	0,3250
21	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2608	0,5721
22	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2608	0,4154
23	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,2608	0,3473
24	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,2608	0,3150
25	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,2259	0,5723
26	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,2259	0,4141
27	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,2259	0,3464
28	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,2259	0,3131
29	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,1863	0,5775
30	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,1863	0,4214
31	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,1863	0,3502
32	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,1863	0,3214
33	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0048	0,5750
34	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0048	0,4196
35	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0048	0,3495
36	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0048	0,3195
37	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	2	0,0010	0,5733
38	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,0010	0,4176
39	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0010	0,3485
40	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0010	0,3174

Para a vigas V6 de comprimento de 520 cm, carga aplicada de 0,248 kN/cm e

conectadas à alma da coluna, as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela 27.

TABELA 27 – Configurações indicadas para a viga V6.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,9792	0,9933
2	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,9792	0,8076
3	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,9792	0,6471
4	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,8179	0,9643
5	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,8179	0,7746
6	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,8179	0,6243
7	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,7014	0,9580
8	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,7014	0,7675
9	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,7014	0,6195
10	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,5904	0,9830
11	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,5904	0,7954
12	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,5904	0,6384
13	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0013	0,9769
14	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0013	0,7889
15	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0013	0,6340
16	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0002	0,9706
17	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0002	0,7818
18	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0002	0,6291

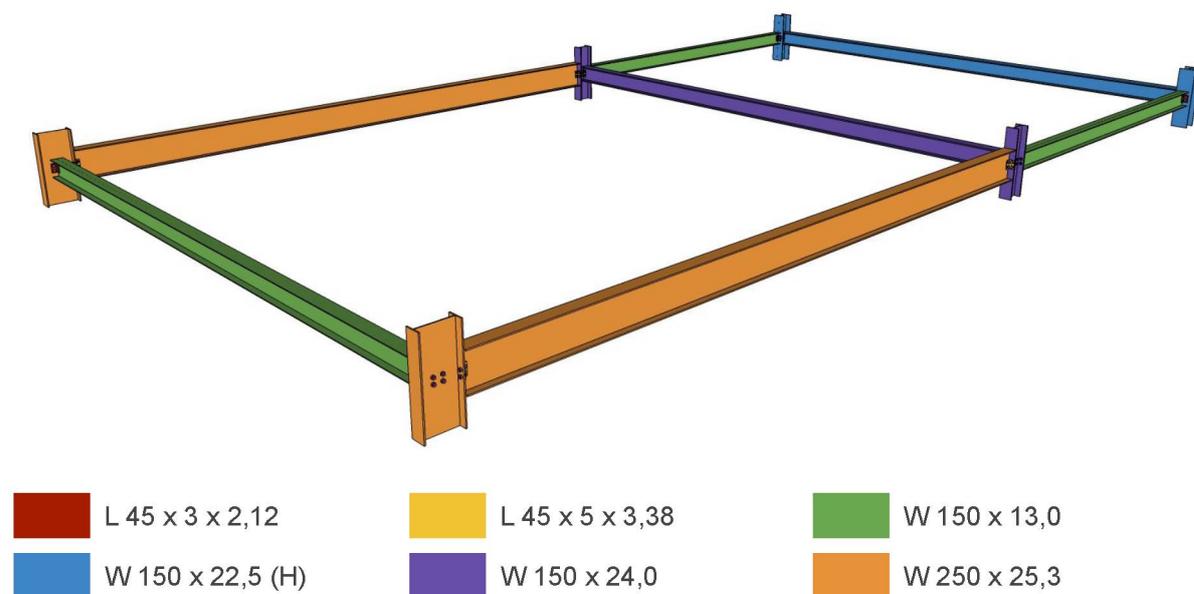
E por fim, para a viga V7 com comprimento de 520 cm e carga aplicada de 0,202 kN/cm, as configurações de perfis para a viga e dos elementos de ligação com a coluna indicadas pelas redes neurais estão apresentadas na tabela 28.

TABELA 28 – Configurações indicadas para a viga V7.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos	y_I	y_{II}
1	W 150x22,5 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,9637	0,8658
2	W 150x22,5 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,9637	0,8109
3	W 150x22,5 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,9637	0,6519
4	W 150x22,5 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,9637	0,5208
5	W 150x24,0	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,8247	0,8643
6	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,8247	0,8088
7	W 150x24,0	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,8247	0,6510
8	W 150x24,0	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,8247	0,5198
9	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,6841	0,9981
10	W 250x25,3	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,6841	0,8482
11	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,6841	0,7900
12	W 250x25,3	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,6841	0,6333
13	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	2	0,5846	0,9933
14	W 250x28,4	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,5846	0,8439
15	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,5846	0,7843
16	W 250x28,4	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,5846	0,6274
17	W 200x35,9 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,4944	0,8614
18	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,4944	0,8046
19	W 200x35,9 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,4944	0,6494
20	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,4944	0,5178
21	W 200x86,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0022	0,8573
22	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0022	0,8003
23	W 200x86,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0022	0,6447
24	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0022	0,5144
25	W 200x100,0 (H)	L 45x3x2,12	1/2 A325	3	0,0004	0,8526
26	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2	0,0004	0,7955
27	W 200x100,0 (H)	L 45x4x2,77	1/2 A325	3	0,0004	0,6391
28	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	3	0,0004	0,5106

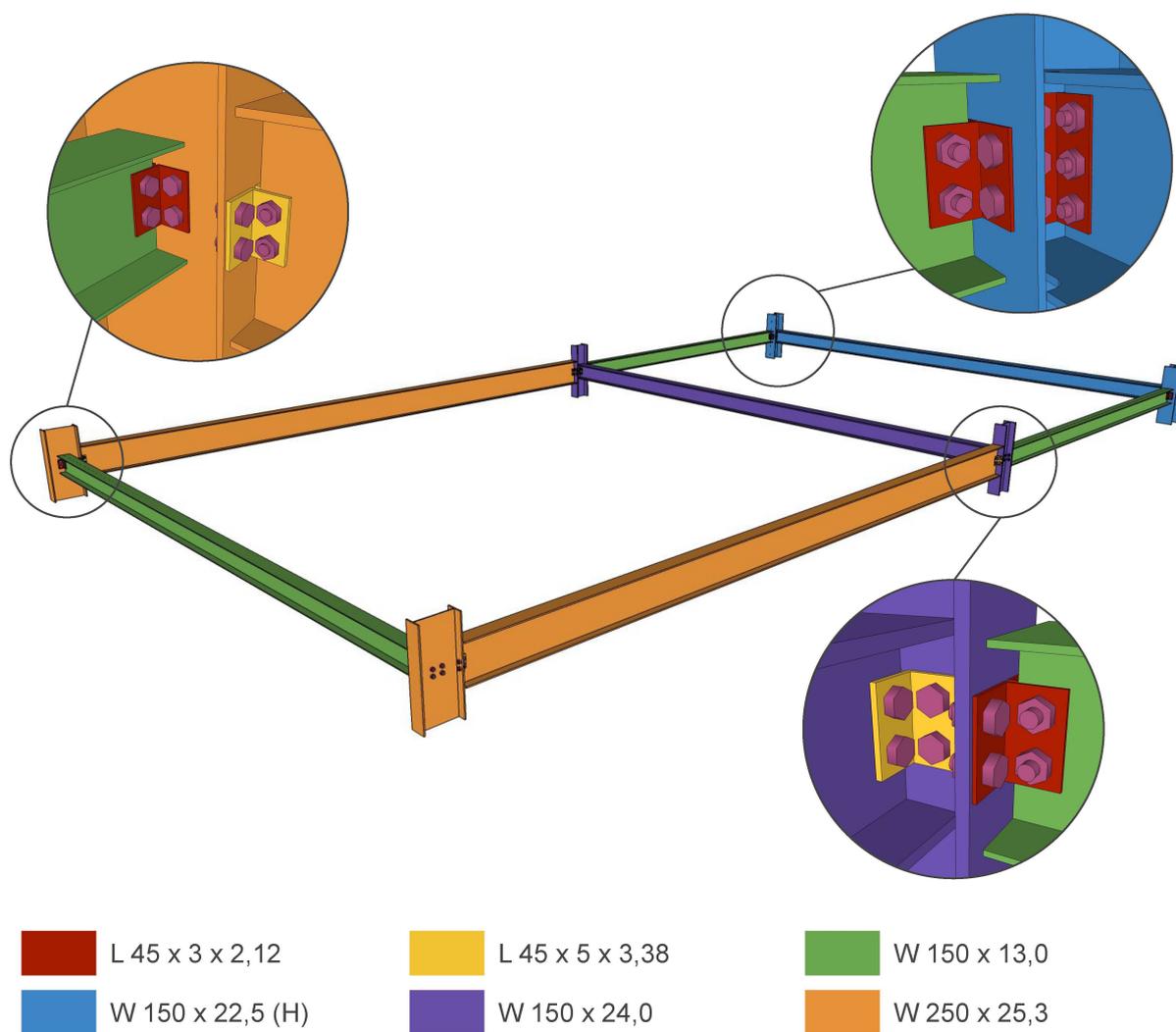
A figura 78 apresenta o desenho tridimensional para as vigas adotando a primeira configuração indicada para o perfil e os elementos de ligação. Já na figura 79 são apresentados os detalhes das ligações.

FIGURA 78 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis.



Fonte: O autor (2020)

FIGURA 79 – Desenho tridimensional do conjunto de vigas os perfis utilizando a primeira configuração indicada para cada viga pelas redes neurais com a identificação dos perfis.



Fonte: O autor (2020)

Caso seja necessário escolher uma única configuração para todas as vigas, pode ser utilizada qualquer uma das apresentadas na tabela 29, pois foram indicadas em comum para todas as vigas.

TABELA 29 – Configurações de perfis e elementos de ligação em comum para cada todas as vigas.

#	Perfil viga	Perfil cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos
1	W 250x25,3	L 45x5x3,38	1/2 A325	2
2	W 250x28,4	L 45x5x3,38	1/2 A325	2
3	W 200x35,9 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2
4	W 200x86,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2
5	W 200x100,0 (H)	L 45x5x3,38	1/2 A325	2

Neste exemplo o tempo de execução total para se obter as indicações de configurações para as vigas utilizando as redes neurais foi de 2,73 s.

4.5 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados da verificação dos resultados obtidos pelas redes neurais. Como descrito no capítulo anterior, foram gerados dois conjuntos de teste, um conjunto de teste com 100 casos para a viga conectada à mesa da coluna e outro conjunto de teste com 100 casos de testes para a viga conectada à alma da coluna.

Como exemplo, para o caso de teste com valores de L igual a 585 cm, q igual a 0,144 kN/cm e viga conectada à mesa da coluna, as configurações que foram analisadas durante o teste estão apresentadas na tabela 30.

TABELA 30 – Configurações analisadas no caso de teste de $L = 585$ cm, $q = 0,144$ kN/cm e conectada na mesa da coluna.

Ordem	L (cm)	q (kN/cm)	Perfil viga	Cantoneira	Parafuso	Qtd. parafusos
1	585	0,144	W150x13,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
2	585	0,144	W150x13,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3
3	585	0,144	W200x15,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
4	585	0,144	W200x15,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3
5	585	0,144	W150x18,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
6	585	0,144	W150x18,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3
7	585	0,144	W150x22,5	L45x4x2,77	1/2 A325	2
8	585	0,144	W150x22,5	L45x3x2,12	1/2 A325	3
9	585	0,144	W150x24,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
10	585	0,144	W150x24,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3
11	585	0,144	W250x25,3	L45x4x2,77	1/2 A325	2
12	585	0,144	W250x25,3	L45x3x2,12	1/2 A325	3
13	585	0,144	W250x28,4	L45x4x2,77	1/2 A325	2
14	585	0,144	W250x28,4	L45x3x2,12	1/2 A325	3
15	585	0,144	W200x35,9	L45x4x2,77	1/2 A325	2
16	585	0,144	W200x35,9	L45x3x2,12	1/2 A325	3
17	585	0,144	W200x86,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
18	585	0,144	W200x86,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3
19	585	0,144	W200x100,0	L45x4x2,77	1/2 A325	2
20	585	0,144	W200x100,0	L45x3x2,12	1/2 A325	3

Na tabela 31 são apresentados os fatores de utilização para a viga f_{viga} e para ligação $f_{ligacao}$ de cada configuração analisada, além dos resultados se atendem ou não os critérios de dimensionamento. Os fatores de utilização foram calculados com base nos diagramas de esforços internos obtidos pelo MEF. Nessa tabela também é apresentado se a configuração foi ou não indicada pelas redes neurais. A tabela

apresenta como resultado se é Verdadeiro Negativo (VN), Falso Negativo (FN), Falso Positivo (FP) e Verdadeiro Positivo (VP).

TABELA 31 – Resultados da análise do caso de teste de $L = 585$ cm, $q = 0,144$ kN/cm e conectada à mesa da coluna.

Ordem	L (cm)	q (kN/cm)	f_{viga}	$f_{ligacao}$	Atende	Indicada	Resultado
1	585	0,144	1,500	0,711	Não	Não	VN
2	585	0,144	1,421	0,604	Não	Não	VN
3	585	0,144	1,132	0,711	Não	Não	VN
4	585	0,144	0,994	0,604	Sim	Não	FN
5	585	0,144	1,038	0,711	Não	Sim	FP
6	585	0,144	0,967	0,604	Sim	Sim	VP
7	585	0,144	0,889	0,711	Sim	Sim	VP
8	585	0,144	0,753	0,604	Sim	Sim	VP
9	585	0,144	0,786	0,711	Sim	Sim	VP
10	585	0,144	0,668	0,604	Sim	Sim	VP
11	585	0,144	0,649	0,711	Sim	Sim	VP
12	585	0,144	0,571	0,604	Sim	Sim	VP
13	585	0,144	0,578	0,711	Sim	Sim	VP
14	585	0,144	0,513	0,604	Sim	Sim	VP
15	585	0,144	0,528	0,711	Sim	Sim	VP
16	585	0,144	0,463	0,604	Sim	Sim	VP
17	585	0,144	0,231	0,711	Sim	Sim	VP
18	585	0,144	0,211	0,604	Sim	Sim	VP
19	585	0,144	0,194	0,711	Sim	Sim	VP
20	585	0,144	0,177	0,604	Sim	Sim	VP

Para esse caso de teste, três configurações que não atenderam os critérios de dimensionamento também não foram indicadas pelas redes neurais, uma configuração que atendeu o critério de dimensionamento não foi indicada pelas redes neurais, uma configuração que não atendeu os critérios de dimensionamento foi indicada pelas redes neurais e as demais configurações atenderam os critérios de dimensionamento e foram indicadas pelas redes neurais.

A matriz de confusão para o modelo da viga conectada à mesa da coluna está apresentada na tabela 32 e a matriz de confusão para o modelo da viga conectada à alma da coluna está apresentada na tabela 33.

TABELA 32 – Matriz de confusão para o conjunto de teste para a viga conectada à mesa da coluna.

	Valor Verdadeiro	
	Positivo	Negativo
Valor previsto	Positivo	1784
	Negativo	18
		23
		175

TABELA 33 – Matriz de confusão para o conjunto de teste para a viga conectada à alma da coluna.

		Valor Verdadeiro	
		Positivo	Negativo
Valor previsto	Positivo	1774	6
	Negativo	33	187

Os valores de acurácia, precisão e F1 para o modelo da viga conectada à mesa da coluna e para o modelo da viga conectada à alma da coluna estão apresentados na tabela 34

TABELA 34 – Valores de acurácia, precisão e F1 para os modelos.

Modelo	Acurácia	Precisão	F1
Viga conectada à mesa da coluna	0,9795	0,9900	0,9886
Viga conectada à alma da coluna	0,9805	0,9966	0,9891

5 DISCUSSÃO

Neste trabalho foram geradas 1456 configurações de vigas com comprimentos e perfis diferentes, sendo que foram geradas tanto para a viga conectada na mesa, quanto para a viga conectada na alma da coluna. Para cada configuração foram considerados 5 casos de carregamento, no total foram obtidas 14560 configurações. Uma das razões para terem sido adotadas apenas configurações que utilizam o mesmo perfil para a coluna e para viga é não aumentar o número de configurações que precisariam ser analisadas.

Ainda como já apresentado, cada uma das configurações foram submetidas a análise pelo método de elementos finitos para se obter os valores de deslocamentos, deformações e tensões. Neste trabalho se optou pela formulação linear do MEF por não ser comum em projetos a não linearidade, pois é desejado que o material permaneça no regime elástico linear. Para o contato entre os elementos que representam os perfis e os parafusos se optou por um método aproximado pois não considera que regiões do furo podem não estar sujeitas a compressão. Como apresentado nos gráficos 60 e 61, o número de elementos da malha impacta no tempo de solução, e por essa razão as configurações não foram analisadas com malhas mais refinadas.

Devido ao grande número de configurações e de resultados obtidos durante a análise pelo MEF, foram apresentados somente os gráficos de deslocamentos de apenas duas configurações, como mostrado nas figuras de 54 à 59.

Já com os resultados das análises pelo método de elementos finitos foram obtidos os diagramas de esforços internos para a viga. Novamente, pela grande quantidade de configurações foram apresentados os diagramas para apenas duas das configurações. Os diagramas de esforço normal não foram apresentados devido aos seus valores serem inferiores à 0,10 kN. Neste trabalho não foram feitas as validações dos diagramas de momento fletor para vigas com ligações flexíveis com os demais trabalhos da literatura.

Entre os objetivos específicos estavam a implementação do método de elementos finitos utilizando o elemento de casca plano que combina os efeitos do estado plano e de placa segundo a formulação de Kirchhoff-Love e modelar e analisar pelo método de elementos finitos configurações de viga de seção do tipo I e H com ligação do tipo de cantoneira dupla, portanto esse objetivo foi alcançado.

Como apresentado anteriormente, para a verificação de dimensionamento de acordo com a **NBR8800:2008** foram utilizados os esforços solicitantes obtidos pelos diagramas de esforços internos das vigas. O objetivo específico de implementar as

verificações de dimensionamento segundo a norma NBR-8800 para o perfil da viga e os elementos da ligação também foi alcançado.

Já com os dados da verificação de dimensionamento foram obtidos os conjuntos de treinamento para as redes neurais. Como apresentado pela tabela 7, os tempos para se obter os conjuntos de treinamento e o treinamento das redes neurais foram bem menores quando comparados com o tempo de execução da análise pelo MEF. Isso destaca que a forma utilizada para se obter os dados para o treinamento das redes neurais utilizando o MEF é um fator limitante, uma vez que a maneira que foi utilizada para se obter os esforços internos possui um grande custo computacional.

Como mostrado pelas tabelas 14 à 16 para o primeiro exemplo de aplicação das redes neurais e pelas tabelas 24 à 28 para o segundo exemplo de aplicação, é possível notar que as redes neurais atenderam o objetivo de indicar configurações que atendem os critérios de dimensionamento e a prioridade por perfis mais leves, sendo que as redes neurais foram treinadas para que as configurações mais indicadas serem aquelas que os valores de saída estejam mais próximos de 1.

As redes neurais não foram treinadas considerando a influência de outras vigas conectadas nos perfis das colunas. Dependendo da rigidez da ligação e da coluna, outras vigas conectadas podem influenciar os resultados, portanto é importante levar em consideração que os resultados podem estar aproximados.

Outro fator importante para analisar os resultados obtidos pelas redes neurais é a capacidade de realmente indicar configurações que atendem os critérios de dimensionamento. Para essa análise foi utilizado o critério do número de configurações indicadas que atendem os critérios de dimensionamento para um determinado conjunto de testes. Como mostrado pela tabela 34, os modelos tiveram uma acurácia de 98%.

O algoritmo implementado para se obter as configurações indicadas pelas redes neurais tiveram tempos de execução de 1,98 s para o primeiro exemplo de aplicação e de 2,73 s para o segundo. Esses tempos de execução dependem em parte da biblioteca TensorFlow que foi utilizada para a modelagem das redes neurais. Para grandes conjuntos de vigas esse processo pode se tornar mais demorado, portanto, é importante verificar otimizações para o algoritmo e ou a utilização de outras bibliotecas para analisar grandes conjuntos de elementos estruturais.

Uma outra limitação do trabalho é o conjunto reduzido de perfis, comprimentos de vigas e de valores de cargas aplicadas, sendo que os comprimentos das vigas estão limitados ao intervalo de 300 a 600 *cm* e os valores das cargas distribuídas estão limitados ao intervalo de 0,05 a 0,25 *kN/cm*.

Além disso, outra limitação das redes neurais treinadas no trabalho é indicação de perfis pré determinados. Uma abordagem alternativa seria não indicar um perfil,

mas sim tornar as redes neurais mais genéricas, por exemplo indicando as dimensões necessárias para os perfis para em seguida definir os perfis. Os resultados das redes neurais também são limitados para apenas quando aplicados os critérios da NBR8800:2008 e para o estado limite último, podendo não ser válidos para outras normas.

Por fim, o objetivo específico de modelar redes neurais para indicar as configurações para a viga e os elementos de sua ligação com a coluna com base em parâmetros pré determinados também foi atendido.

De maneira geral, a utilização das redes neurais podem facilitar e tornar mais rápido o pré dimensionamento e o dimensionamento de vigas em estruturas metálicas, porém é necessário mais estudos antes de sua utilização em projetos.

Mesmo com as limitações já descritas anteriormente, pode se dizer que o objetivo geral do desenvolvimento de uma ferramenta para o auxílio no dimensionamento de vigas de estruturas metálicas com seção do tipo I e H conectadas a colunas de mesmo tipo de seção por meio de ligações do tipo cantoneira dupla foi alcançado.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal explorar o uso de redes neurais artificiais para o desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar no dimensionamento de vigas e suas ligações em estruturas metálicas. Considerando os resultados obtidos nos exemplos de aplicação e no resultado da validação em que mais de 98% das configurações indicadas pelas redes neurais atenderam os critérios de dimensionamento é possível afirmar que o objetivo foi alcançado. Em projetos, durante a etapa de pré-dimensionamento, uma grande vantagem de utilizar as redes neurais treinadas durante o trabalho está a possibilidade de obter os perfis e os elementos de ligação para as vigas que atendem os critérios de dimensionamento, utilizando somente os valores dos comprimentos dos vãos e dos valores das cargas aplicadas.

Mesmo alcançando o objetivo do trabalho, o uso das redes neurais treinadas neste trabalho estão limitadas a um pequeno conjunto de perfis e de carregamentos, portanto sugere-se para trabalhos futuros treinar as redes neurais para um conjunto mais amplo de perfis e situações de carregamento. Além disso, treinar as redes neurais para indicar perfis de uma forma mais genérica, permitindo assim a utilização de perfis de outros catálogos. E por fim, sugere-se ainda para trabalhos futuros o treinamento das redes neurais para o estado limite de serviço.

REFERÊNCIAS

- ARGENTA, Marco André. **Notas de Aula de Estruturas Metálicas**. [S.l.]: Universidade Federal do Paraná, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: 2008**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, ago. 2008.
- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. 6. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2016.
- FACURE, Matheus. **Funções de Ativação: Entendendo a importância da ativação correta nas redes neurais**. 2017. Disponível em: <<https://matheusfacure.github.io/2017/07/12/activ-func/>>. Acesso em: 1 jun. 2019.
- HALLSTRÖM, Erik. **Backpropagation from the beginning**. 2016. Disponível em: <<https://medium.com/@erikhallstrm/backpropagation-from-the-beginning-77356edf427d>>. Acesso em: 30 mai. 2019.
- JAWAD, Maan H. **Design of Plate and Shell Structures**. [S.l.]: ASME PRESS, 2004.
- KINGMA, Diederik P.; BA, Jimmy Lei. ADAM: A METHOD FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION, 2014.
- PATTERSON, Josh; GIBSON, Adam. **Deep Learning: A practioner's approach**. [S.l.]: O'Reilly, 2017.
- PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- RUSSEL, Stuart; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. [S.l.]: PEARSON, 2016.
- SALMON, Charles G.; JOHNSON, John E.; MALHAS, Faris A. **Steel Structures: Design and Behavior**. 5. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2008.
- SANPAZ. **Plane stress condition in a continuum body (object), showing an infinitesimal element and its stress components. For articles related to Continuum mechanics**. 2009. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plane_stress.svg>. Acesso em: 6 mai. 2019.
- SEGUI, William T. **Steel Design**. 5. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2013.

SILVA VELLASCO, Pedro Colmar Gonçalves da et al. **Modelagem de estruturas de aço e mistas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SORIANO, Humberto Lima. **Método De Elementos Finitos Em Análise De Estruturas**. [S.l.]: EDUSP, 2003.

ZIENKIEWICZ, Olgierd C.; TAYLOR, Robert L. **The Finite Element Method: Volume 1: The Basis**. 5. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2003.