

**CENTRO UNIVERSITÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ALTO VALE DO
ITAJAÍ – UNIDAVI
TALLES SCHARPF**

**ANÁLISE DA BASE METÁLICA DE SUPORTE PARA CALDEIRA:
ESTUDO DE CASO**

**RIO DO SUL
2017**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ALTO VALE DO
ITAJAÍ – UNIDAVI
TALLES SCHARPF**

**ANÁLISE DA BASE METÁLICA DE SUPORTE PARA CALDEIRA:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Área das Ciências Naturais, da Computação e das Engenharias, do Centro Universitário para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí, como condição parcial para a obtenção do grau de bacharel em engenharia civil.

Prof. Orientador: Leandro Rogel da Silva

**RIO DO SUL
2017**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ALTO VALE DO
ITAJAÍ – UNIDAVI
TALLES SCHARPF**

**ANÁLISE DA BASE METÁLICA DE SUPORTE PARA CALDEIRA:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Área das Ciências Naturais, da Computação e das Engenharias, do Centro Universitário para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí- UNIDAVI, a ser apreciado pela Banca Examinadora, formada por:

Professor Orientador: Leandro Rogel da Silva

Banca Examinadora:

Prof.

Prof.

Rio do Sul, 29 de junho de 2017.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”.
(Peter Drucker)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as conquistas, por proporcionar momentos especiais nesta jornada acadêmica e na minha vida.

Em especial a minha noiva Navana que soube compreender que, os momentos de ausência foram de extrema importância para minha vida profissional e acadêmica, assim como, para o nosso futuro.

Agradeço a toda minha família que sempre me apoiou nos momentos difíceis, onde eu mais precisava. Também a luta diária dos meus pais Ivo e Ivone que sempre buscaram o melhor para mim.

Sou muito grato por estudar nesta universidade que sempre buscou o melhor para os cursos, em destaque para o curso de engenharia civil, pois foram feitos laboratórios novos, melhorias na didática em sala, visitas técnicas e que sempre estive de portas abertas para nos ouvir.

E por fim, quero deixar a minha gratidão a todos meus professores nesta jornada acadêmica que foi totalmente válida os ensinamentos e direcionamentos para uma carreira profissional. Em especial ao professor Leandro Rogel da Silva pela orientação e auxílio na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar uma base estrutural metálica para suporte de uma caldeira e verificar os resultados considerando a norma vigente da ABNT NBR 8800:2008 que trata de projetos de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de Edifícios. Sendo assim, trata-se de uma pesquisa com finalidade descritiva e documental através de um estudo de caso. Desde o projeto mais simples até o mais moderno, a estrutura representa um dos principais elementos da construção. Este trabalho se justifica, afim de garantir a resistência da estrutura de sustentação da caldeira e evitando acidentes, danos materiais e pessoais. Como procedimento técnico para a realização e análise deste estudo de caso foi utilizado o *software SCIA Engineer*, onde foi possível analisar o fator máximo de verificação de cada elemento presente na estrutura. Foram analisados casos onde determinou-se a escolha de um pórtico mais adequado para a estrutura de suporte. Além disso, foi realizada uma segunda análise nos casos para otimização dos perfis utilizados e conseqüentemente a diminuição do peso da estrutura. Foi concluído com este estudo que a melhor base metálica de suporte para a caldeira em questão foi o caso B-02, pois foi o pórtico mais adequado para cada material, considerando o peso total da estrutura de 1.368,40 kg e seu preço final de R\$ 4.789,40, apesar do aço ASTM A572 Grau 50 ser menos resistente que o COR 500.

Palavras-Chave: Estrutura metálica, Pórticos, Suporte de caldeira.

ABSTRACT

The main objective of this concluding course research has been to analyse a metal structure base to support a boiler and to verify the results by considering an ABNT NBR 8800:2008 in force rule which refers to construction projects with steel, mixed and concrete structure. Therefore, it has been a documental, descriptive research carried out through a case study. Since the simplest to the most modern project, the structure represents one of the main elements of the building. So, this research has been justified aiming to guarantee the structure resistance of the boiler support and to avoid accidents as well as personal and material damage. The technical procedure used to carry out this case study has been the SCIA Engineer software, in which it has been possible to analyse the maximum verifying factor of each structure element. The criteria to determine the cases that have been analysed was the choice of a more suitable metal structure to the structure support. Besides that,, a second analysis of the case has been carried out aiming the optimization of the profiles used and consequently, the reduction of the weight of structure. This research has concluded that the best supporting metal base to the boiler analysed is the BO2 case because it is the most suitable metal structure for each material considering the structure 1,368,40 kg total weight and its R\$ 4,789,40 final price, despite the ASTM A572 50 degree steel being less resistant than COR 500.

Keywords: Steel structure, Metal structure, Boiler support.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de base da caldeira em concreto armado e estrutura metálica	16
Figura 2 - Esquema de laminação	19
Figura 3 - Fluxo simplificado de produção do aço	19
Figura 4 - Constantes físicas dos aços (faixa normal de temperaturas atmosféricas)	21
Figura 5- Diagrama de tensão-deformação	22
Figura 6- Trecho inicial dos diagramas tensão x deformação	22
Figura 7 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados	24
Figura 8 - Perfis laminados de abas paralelas série I e H	25
Figura 9 - Perfis estruturais laminados de abas paralelas (WF)	26
Figura 10 - Exemplo de pórticos	26
Figura 11 - Exemplo de pórticos contraventados	28
Figura 12 - Pórtico não-contraventado	28
Figura 13 - Pórtico indeslocável e deslocável	29
Figura 14 – Sistemas de contraventamento	30
Figura 15 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados	33
Figura 16 - Projeto estrutural com dimensionamento	38
Figura 17 - Projeto estrutural em 3D	38
Figura 18 - Verificação do cálculo caso A-01 com aço COR 500	41
Figura 19 - Verificação do cálculo caso A-02 com aço COR 500	41
Figura 20 - Verificação do cálculo caso A-03 com aço COR 500	42
Figura 21 - Verificação do cálculo caso A-04 com aço COR 500	42
Figura 22 - Verificação do cálculo caso A-05 com aço COR 500	43
Figura 23 - Verificação do cálculo caso A-06 com aço COR 500	43
Figura 24 - Verificação do cálculo caso A-07 com aço COR 500	44
Figura 25 - Verificação do cálculo caso B-02	45
Figura 26 - Verificação do cálculo caso B-07	46
Figura 27 - Verificação do cálculo caso A-02	47
Figura 28 - Verificação do deslocamento nos casos A-02 (COR 500) e B-02 (ASTM A572)	48
Figura 29 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de esforço normal) do caso A-02	48
Figura 30 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de esforço cortante) do caso A-02	49
Figura 31 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de momento fletor) do caso A-02	49

Figura 32 - Verificação do cálculo caso B-02	50
Figura 33 - Verificação do cálculo caso A-07 (Perfis não passam no cálculo).....	50
Figura 34 - Verificação do deslocamento no caso A-07 (Perfis não passam no cálculo)	51
Figura 35 - Verificação do cálculo caso A-07	52
Figura 36 - Verificação do deslocamento nos casos A-07 (COR 500) e B-07 (ASTM A572)	53
Figura 37 - Verificação do cálculo caso B-07	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipo de pórtico para cada caso	39
Quadro 2 - Lista de materiais para cada CASO.....	40
Quadro 3 – Resultado do fator de cálculo para o material COR 500	44
Quadro 4 – Resultado do fator de cálculo para o material ASTM A 572 Grau 50	46
Quadro 5 - Lista de materiais para os casos A-02 (COR 500) e B-02 (ASTM A572).....	47
Quadro 6 - Lista de materiais para o caso A-07 (Perfis não passam no cálculo)	51
Quadro 7 - Lista de materiais para os casos A-07 (COR 500) e B-07 (ASTM A572).....	52
Quadro 8 - Orçamento dos perfis para cada material	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da seção transversal, cm ²
I	Momento de inércia, cm ⁴
K	Coefficiente de flambagem de barras comprimidas
b	Largura, mm
b _f	Largura da mesa do perfil, mm
d	Altura da seção transversal, mm
d'	Altura livre da alma do perfil, mm
f _y	Resistência ao escoamento do aço
h	Altura geral, distância entre as faces internas das mesas dos perfis, mm
t	Espessura, mm
t _f	Espessura da mesa, mm
t _w	Espessura da alma, mm
m	Metros.
mm	Milímetros.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA.....	14
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO	14
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Geral	14
1.3.2 Específicos	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO	17
2.2 AÇOS ESTRUTURAIS	20
2.2.1 Propriedades dos aços estruturais	20
2.2.2 Produtos Siderúrgicos para Estruturas Metálicas	23
2.2.3 Perfis laminados com mesas de faces paralelas	24
2.3 PÓRTICOS.....	26
2.4 CÁLCULO DE PÓRTICOS METÁLICOS.....	30
2.4.1 Cálculo de membros submetidos à força axial pura	31
2.4.2 Cálculo de membros submetidos à flambagem.....	32
2.4.3 Cálculo de membros submetidos à flexão	33
2.4.4 Cálculo de membros submetidos ao cisalhamento	34
2.5 ORÇAMENTO.....	35
3. METODOLOGIA.....	36
4. DESENVOLVIMENTO.....	37
4.1 CARGAS CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO.....	37
4.2 PROJETO E MODELO ESTRUTURAL.....	37
4.3 LISTA DE MATERIAIS.....	40
4.4 VERIFICAÇÕES DO CÁLCULO COM AÇO COR 500	40
4.5 VERIFICAÇÕES DO CÁLCULO COM AÇO ASTM A 572 Grau 50	44
4.6 COMPARATIVO DOS CASOS A-02, B-02, A-07 e B-07.....	46
4.7 ORÇAMENTO DE PERFIS	54
5. CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

Desde o projeto mais simples até o mais moderno, a estrutura representa um dos principais elementos da construção, pois um mau projeto pode ocasionar danos materiais e também pessoais. Por isso sua correta execução é de extrema importância para o sucesso da construção. Uma boa estrutura tem como objetivo garantir a estabilidade da edificação, portanto, as cargas de diferentes intensidades e direções provocam ações que precisam ser equilibradas. Através do projeto estrutural as interferências são solucionadas, tornando a estrutura capaz de resistir aos esforços atuantes através de sistemas de ação e reação, o que garante o equilíbrio tanto dos componentes individuais, como da estrutura como um todo.

Como todos projetos estruturais, a base da caldeira também deve seguir normas de construção e garantir a segurança. Para caldeiras que não sejam fabricadas de forma seriada a análise estrutural deverá ser feita em todos os projetos.

A estrutura de suporte da caldeira é uma parte fria do equipamento, pois não tem contato com os gases de combustão nem vapor/água. A principal função da base/estrutura de suporte, como o próprio nome sugere, é suportar as partes sob pressão (vaso de pressão) que formam a caldeira propriamente dita e transmitir os esforços para o solo. A estrutura de suporte é um dos últimos projetos a serem realizados (projetos básico e detalhamento), pois somente será dado início neste após o projeto da parte termodinâmica de geração de vapor estiver definido.

As condições locais também interferem no projeto da estrutura de suporte da caldeira. Em regiões de clima frio como Europa e América do Norte é comum a instalação da caldeira dentro de um galpão, também chamado Casa da Caldeira. Em regiões de climas quentes e secos a caldeira é instalada externamente (costuma-se dizer instalada “ao tempo”) comum no Oriente Médio e África. Em regiões de clima quente e períodos chuvosos como China, Índia e América Latina, a instalada semi-externa com um telhado que usa a própria estrutura da caldeira. As instalações de caldeira interna ao galpão geralmente são estruturas mais leves e, portanto, mais econômicas, pois não estarão sujeitas à carga de ventos (RAYAPROLU, 2009).

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a estrutura de um pórtico em aço através da utilização do *software SCIA Engineer* e verificar as ações do carregamento de uma caldeira afim de dimensionar os perfis estruturais, conforme a NBR 8800:2008, assim como o melhor material a ser utilizado considerando os carregamentos predeterminados e obter a

melhor solução possível. Também será analisado o comportamento da estrutura para obtenção dos resultados finais.

Hoje em dia quando se pensa em construir, logo vem à mente o custo total da obra, por isso, é importante oferecer soluções econômicas para o cliente. Sendo assim neste estudo será possível visualizar qual o material mais adequado em relação ao custo benefício para a estrutura do pórtico metálico em questão.

1.1 TEMA

Análise da base metálica de suporte para caldeira: estudo de caso.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Para um pórtico em estrutura metálica para sustentação de uma caldeira temos que fazer um cálculo estrutural utilizando as normas específicas afim de evitar as consequências como danos materiais e danos pessoais.

Sendo assim, será utilizado o *software SCIA Engineer* de acordo com a norma NBR 8800:2008, afim de verificar a solução mais adequada para atingir os objetivos deste estudo.

1.3 OBJETIVOS

A seguir, estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso.

1.3.1 Geral

Analisar pórticos em estrutura metálica para sustentação de uma caldeira com o auxílio do *software SCIA Engineer* para análise, devido à dificuldade de solução analítica e tempo dispendido para a mesma.

1.3.2 Específicos

Para a análise do comportamento da estrutura será baseada em:

- Comparativo de diferentes tipos de materiais;
- Análise e comparativo de diferentes tipos de geometria;
- Análise de diferentes tipos configurações estruturais;
- Análise comparativa de custo dos perfis;

1.4 JUSTIFICATIVA

Hoje em dia quando se pensa em construir, logo vem à mente o custo total da obra. A função do engenheiro é oferecer uma solução segura e econômica para o cliente.

Sendo assim, este estudo se justifica visto que é de suma importância calcular e posteriormente analisar os resultados, bem como o material mais adequado e a relação custo benefício. Estes resultados serão obtidos através de um *software* específico, afim de garantir a resistência do pórtico, devido as cargas atuantes e ao peso próprio da estrutura, garantindo a sustentação da caldeira e evitando acidentes.

Atualmente apesar dos profissionais com conhecimento técnico de engenharia possuírem mais recursos tecnológico disponíveis, ainda há um grande déficit de profissionais especializados para acompanhar a demanda por qualidade do mercado da construção. Com a utilização de um *software* de cálculo específico é possível otimizar o tempo de trabalho das rotinas de cálculo, além de resultar em mais qualidade ao projeto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Desde o projeto mais simples até o mais moderno, a estrutura representa um dos principais elementos da construção, pois um mau projeto pode ocasionar danos materiais e também pessoais.

Assim como em outras aplicações, a estrutura de suporte da caldeira pode ser executada em perfis metálicos laminados ou em concreto armado, conforme mostra a figura 1. A escolha geralmente depende do custo dos materiais, mão de obra e tempo de execução.

Figura 1 - Exemplos de base da caldeira em concreto armado e estrutura metálica



Fonte: ICAVI (2013).

Os aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga tais como silício, manganês, fósforo, enxofre e outros elementos adicionados com o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material (PFEIL; PFEIL, 2014).

As propriedades mecânicas dos aços são bastante sensíveis ao teor de carbono. Segundo Chiaverini (1986) pode ser classificado como aços, ligas ferrosas cujo teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11%. Porém, o teor de carbono em aços nas aplicações cotidianas geralmente é inferior a 1,0%. O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis.

Atualmente as estruturas metálicas têm proporcionado como vantagens (Pinheiro, 2005):

- Fabricação das estruturas com precisão milimétrica, possibilitando maior controle do produto acabado;
- Garantia das dimensões e propriedades dos materiais;

- Material resistente à vibrações e choques;
- Possibilidade de execução de obras mais rápidas e limpas;
- Em caso de necessidade, possibilita a desmontagem das estruturas e posterior montagem em outro local;
- Alta resistência estrutural, possibilitando a execução de estruturas leves para vencer grandes vãos;
- Possibilidade de reaproveitamento dos materiais em estoque, ou mesmo, sobras de obra.

Como desvantagens (Pinheiro, 2005) é possível citar:

- Limitação de execução em fábrica, em função do transporte até o local de sua montagem final;
- Necessidade de tratamento superficial das peças contra oxidação, devido ao contato com o ar atmosférico;
- Necessidade de mão de obra e equipamentos especializados para fabricação e montagem;
- Limitação de perfis estruturais.

2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

Segundo Silva e Pannoni (2010, p.4): “O aço é obtido de minério de ferro (em geral, a hematita), de carvão mineral adequado ao processo siderúrgico (o chamado carvão metalúrgico) e de fundentes”.

Ainda segundo Silva e Pannoni (2010, p.4):

Os minérios de ferro são distribuídos por todo planeta e o Brasil é seu maior produtor. O carvão mineral adequado ao uso nas siderúrgicas só é encontrado em certos países; o Brasil possui reservas consideráveis de carvão metalúrgico, mas, para ser utilizado em grande escala em nossas usinas, é necessário um custoso beneficiamento para redução do teor de enxofre e de cinzas. Por isso, este insumo não tem sido utilizado, recorrendo-se a importação.

O processo de fabricação de ferro inicia-se no Alto-Forno, onde são carregados o minério, calcário e coque. O coque queima produzindo calor e monóxido de carbono. O calcário converte o pó do coque e a ganga (minerais terrosos do minério) em escória fundida. Pela parte inferior do forno são drenadas periodicamente a liga ferro-carbono e a escória continuamente. O produto de alto-forno chama-se ferro fundido ou gusa. Uma pequena parte

da gusa é refundida para se obter ferro fundido comercial e a maior parte é transformada em aço (PFEIL; PFEIL, 2014).

Em seguida o material passa pelo Conversor a Oxigênio ou Processo Linz-Donawitz (LD). Neste equipamento, uma lança introduz O₂ pela abertura superior do forno e este gás incide sobre o metal líquido presente no fundo do forno, promovendo assim a oxidação que minimiza os níveis de impurezas, convertendo o ferro rico em carbono em aço (MOURÃO; GENTILE, 2006).

Posteriormente, a matéria passa por um processo de refinamento onde é realizada uma desgaseificação adicionando-se alumínio e silício numa panela. Tais elementos reagem com o oxigênio para evitar a formação de vazios. Quanto ao grau de desgaseificação os aços podem ser (PFEIL; PFEIL, 2014):

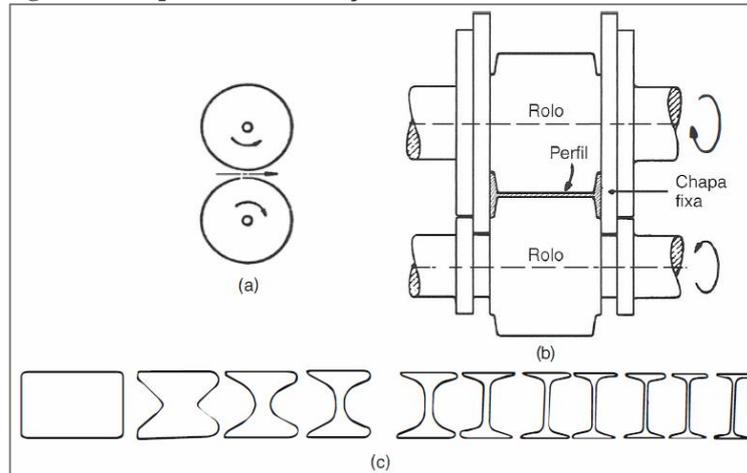
- Efervescentes: o aço da panela fica com gás suficiente para provocar alguma efervescência nas lingoteiras. Tais aços são comumente utilizados em chapas finas;
- Capeados: são análogos aos efervescentes, sustando-se o movimento dos gases pelo resfriamento rápido e solidificação da parte superior do lingote, e têm menor segregação que os primeiros;
- Semi acalmados: são parcialmente desoxidados, apresentando menor segregação que os capeados e são os mais utilizados nos produtos siderúrgicos correntes (perfis, barras, chapas grossas);
- Acalmados: todos os gases são eliminados, o que lhes confere melhor uniformidade de estrutura. São geralmente acalmados os aços-ligas, os aços de alto carbono (trilhos, barras, etc.), bem como aços de baixo carbono destinados à estampagem.

Da panela, o aço fundido é descarregado nas lingoteiras, que são fôrmas metálicas especiais permitindo a confecção de blocos, denominados lingotes, chegando aos laminadores em forma de placas com seção retangular ou tarugos, cortadas em segmentos de comprimento adequado, por meio de maçaricos (PFEIL; PFEIL, 2014).

Na próxima etapa do processo é realizada a laminação onde os lingotes são transformados em produtos siderúrgicos como chapas e perfis laminados. Neste processo, os metais passam por entre dois rolos giratórios que os comprimem, e têm sua espessura diminuída e seu comprimento aumentado. É um processo que permite obter alta produtividade e boa precisão dimensional, além de certa variedade de formas (MOURÃO; GENTILE,

2006). A Figura 2.a mostra o esquema dos rolos de um laminador. A peça metálica, aquecida ao rubro, é comprimida entre dois rolos giratórios, saindo no outro lado com espessura reduzida. Os laminadores dos produtos acabados têm seus rolos com as superfícies cortadas nas formas adequadas (Figura 2.b). A Figura 2.c mostra as sucessivas fases de laminação do perfil I a partir do perfil retangular produzido no laminador desbastador.

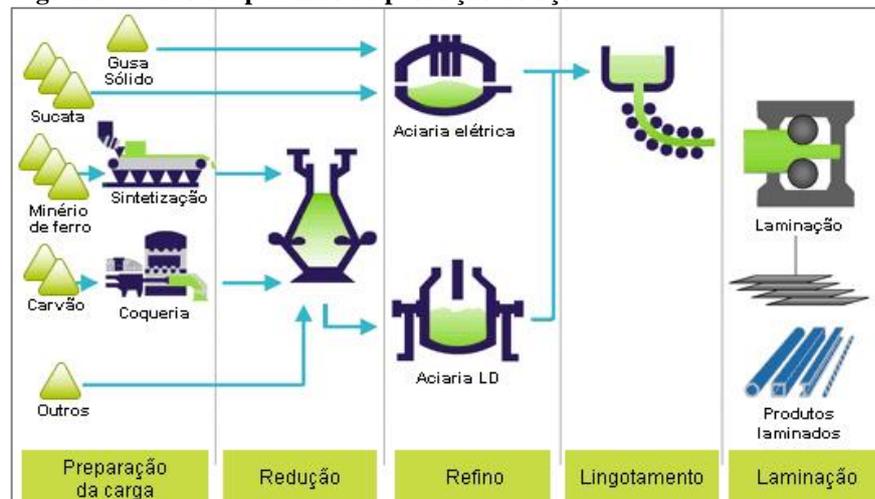
Figura 2 - Esquema de laminação



Fonte: Pfeil e Pfeil (2014, p.14).

Processamentos posteriores podem ser realizados tais como tratamentos térmicos a fim de melhorar determinadas propriedades dos aços (FERAZALVAREZ, 2016). A figura a seguir apresenta um resumo dos processos de fabricação dos aços.

Figura 3 - Fluxo simplificado de produção do aço



Fonte: Ferazalvarez (2016).

De acordo com Silva e Pannoni (2010) a produção inicial do aço é obtida através do minério de ferro, e esta transformação do minério em aço é executada em quatro estágios:

- Estágio 1: Tratamento do minério de ferro e do carvão metalúrgico.
- Estágio 2: Obtenção do ferro-gusa.
- Estágio 3: Obtenção do aço e seu enobrecimento.
- Estágio 4: Lingotamento e conformação do aço.

2.2 AÇOS ESTRUTURAIS

O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis. As resistências à ruptura por tração ou compressão dos aços utilizados em estruturas são iguais, variando entre amplos limites, desde 300 MPA até valores acima de 1200 MPA (PFEIL; PFEIL, 2014).

Ainda segundo Pfeil e Pfeil (2014), os aços são classificados em duas categorias, aços-carbonos e aços de baixa liga. Com o aumento na adição de carbono no aço que por sua vez aumenta sua resistência, porém diminui a sua ductilidade (podendo se deformar) e podem trazer problemas relacionados à soldagem na fabricação.

2.2.1 Propriedades dos aços estruturais

A seleção de materiais é uma das tarefas mais complexas na engenharia. A área de materiais está em constante desenvolvimento e frequentemente são desenvolvidos novos materiais para atender às necessidades cotidianas. O conhecimento do comportamento do material (e conseqüentemente as propriedades deste) sujeito aos tipos de carregamentos e diferentes ambientes proporciona ao engenheiro a escolha de maneira correta e decisiva na parte econômica de um projeto (CALLISTER, 2008). Ainda segundo Callister (2008), algumas propriedades importantes de aços estruturais estão listadas abaixo:

- Elasticidade: é a capacidade de retornar à forma original após o efeito de carregamento e descarregamento (tensões de tração ou compressão). O aço deve sempre trabalhar em sua fase elástica, onde a sua deformação é proporcional ao esforço aplicado;
- Plasticidade: é uma deformação permanente e não recuperável provocada pelo efeito de tensões iguais ou superiores ao limite de escoamento do aço.

Deve-se impedir que a tensão correspondente ao limite de escoamento seja atingida nos elementos estruturais, como forma de limitar a sua deformação;

- Ductilidade: é a capacidade de se deformar plasticamente sem se romper. Quanto mais dúctil o aço maior é o alongamento antes da ruptura. Materiais que apresentam uma pequena deformação plástica ou nenhuma até a ruptura são chamados de materiais frágeis;
- Tenacidade: é a capacidade de absorver energia até a fratura. No contexto estrutural pode ser entendido como capacidade de absorção de impactos. Quanto maior a capacidade de absorver cargas por impacto, mais tenaz é o material;
- Resiliência: é a capacidade do material absorver energia quando deformado elasticamente e depois permitir a recuperação de energia;
- Dureza: é a medida da resistência do material à deformação da sua superfície por endentação ou abrasão;

As seguintes características físicas podem ser adotadas em todos os tipos de aço estrutural na faixa normal de temperaturas atmosféricas de acordo com a figura 4 (PFEIL; PFEIL, 2014).

Figura 4 - Constantes físicas dos aços (faixa normal de temperaturas atmosféricas)

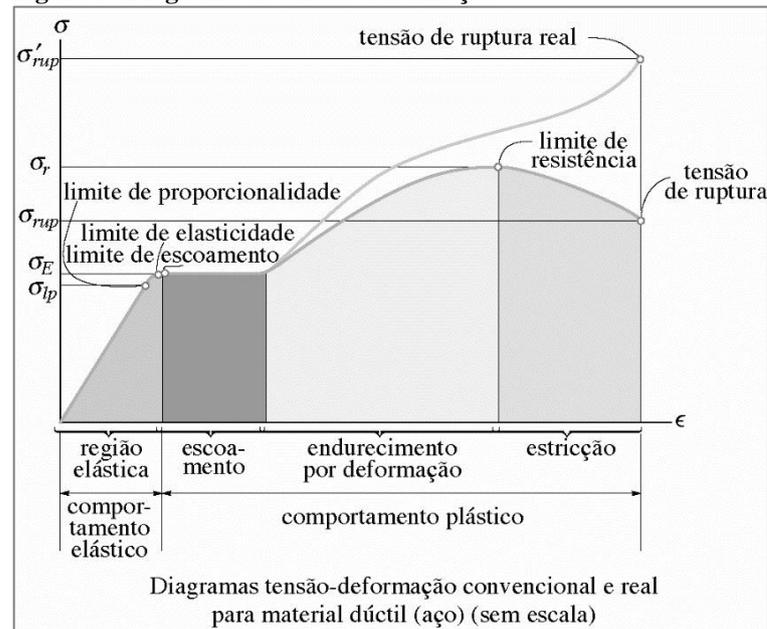
Constante Física	Valor
Módulo de deformação longitudinal, E	200.000–210.000* MPa
Coefficiente de Poisson, ν	0,3
Coefficiente de dilatação térmica, β	12×10^{-6} por °C
Massa específica, ρ	7 850 kg/m ³

*Faixa de variação dos valores médios de E : valor adotado pela NBR8800 = 200.000MPa.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2014, p. 307).

A partir dos dados obtidos em um ensaio de tração ou compressão, é possível construir um diagrama tensão-deformação. Através do diagrama podemos determinar algumas propriedades de interesse para o projeto, tais como módulo de elasticidade, a tensão de escoamento e a tensão de ruptura (HIBBELER, 2010). A figura 5 mostra um exemplo de diagrama tensão-deformação para um aço de baixo carbono e as propriedades possíveis de serem extraídas no ensaio.

Figura 5- Diagrama de tensão-deformação

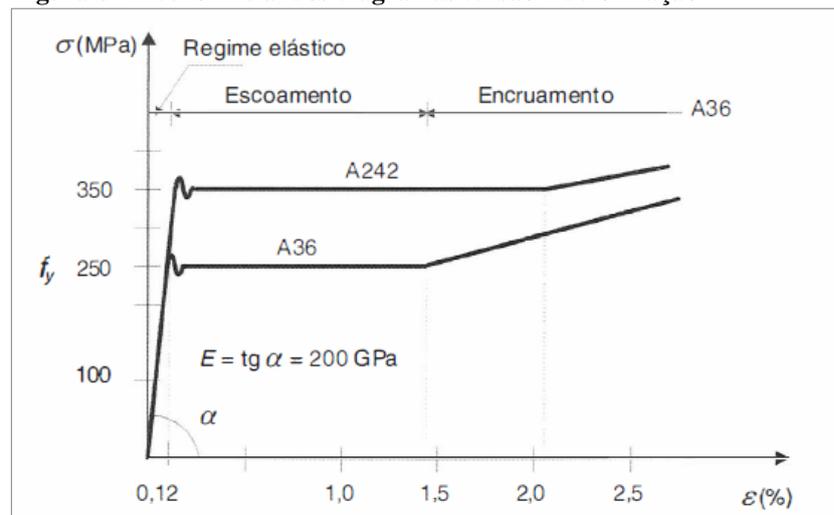


Fonte: Hibbeler (2010, p. 58).

Conforme demonstrado por Pfeil e Pfeil (2014, p.13), na figura 1 de tensão-deformação: “Se apresentarmos em abcissas os valores dos alongamentos unitários ϵ e em ordenadas os valores das tensões convencionais σ , teremos um diagrama tensão-deformação que reflete o comportamento do aço sob efeito de cargas estáticas”.

Pfeil e Pfeil (2014, p.12) definem: “O módulo de elasticidade E é praticamente igual para todos os tipos de aço, variando entre $200.000 < E < 210.000$ MPa”.

Figura 6- Trecho inicial dos diagramas tensão x deformação



Fonte: Pfeil e Pfeil (2014, p. 14).

Para Hibbeler (2010, p. 63):

[...] o diagrama tensão-deformação para a maioria dos materiais de engenharia exibe uma *relação linear* entre tensão e deformação dentro da região elástica. Por consequência, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. Esse fato foi descoberto por Robert Hooke, em 1676, para molas, e é conhecido como *lei de Hooke* e pode ser expresso matematicamente como

$$\sigma = E\epsilon$$

Segundo Hibbeler (2010), a partir dos dados obtidos em um ensaio de tração ou compressão, é possível calcular valores para tensão e deformação que correspondem ao corpo de prova e construir um gráfico. A curva que resulta deste gráfico é chamada diagrama tensão-deformação e normalmente pode ser descrita como convencional ou real. No diagrama tensão-deformação convencional podemos determinar a tensão nominal ou a tensão de engenharia, dividindo a carga aplicada P pela área original da seção transversal do corpo de prova A_0 . O cálculo considera a tensão como constante na seção transversal e em toda a região entre os pontos de calibragem conforme segue:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

2.2.2 Produtos Siderúrgicos para Estruturas Metálicas

Dentre os principais produtos siderúrgicos para estruturas metálicas podemos citar: chapas, perfis, fios trefilados, cordoalhas e cabos (PFEIL; PFEIL, 2014).

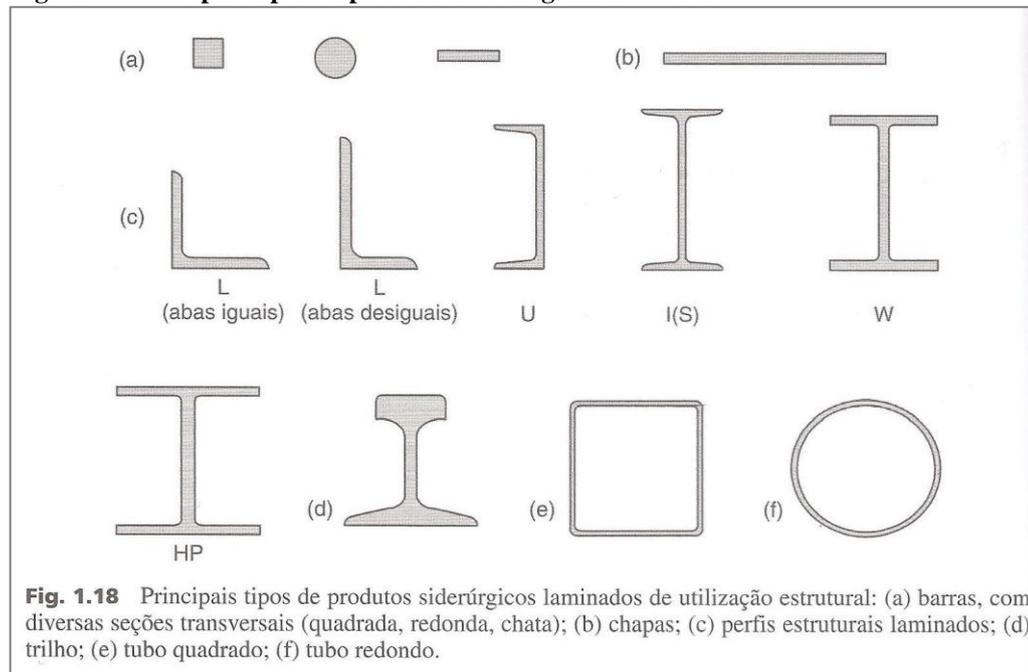
Os perfis são formas geométricas padronizadas de seções transversais de elementos estruturais. Os mais comumente empregados nas construções são: barras redondas, barras chatas, barras quadradas, cantoneiras, tubos circulares, tubos retangulares e perfis “I”, “H”, “T”, “C” (SANTOS, 1977).

De acordo com Hibbeler (2010), os perfis estruturais podem ser fabricados na própria siderúrgica pelo processo de laminação ou nas metalúrgicas pelos processos de dobramento de chapas e associações soldadas ou parafusadas.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2014), os perfis “C” podem também ser chamados de perfil “U”. Os perfis “L” são também denominados cantoneiras e podem ser de abas iguais ou desiguais. Os perfis “I” e “H” seguem a nomenclatura da indústria norte-americana. O perfil I, também chamado *S – Profile*, se caracteriza pelas abas não paralelas (inclinadas) e com altura da alma maior que a largura das abas. O perfil “H” por sua vez possui as mesas de faces paralelas e possui a largura das abas maior ou igual que a altura do perfil (TECEM, 2017). A

Figura 7 mostra os diferentes tipos de perfis e mais adiante será mostrada de forma mais nítida, a diferença entre os perfis “I” e “W”.

Figura 7 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados



Fonte: Pfeil e Pfeil (2014, p. 20).

De acordo com Borges (2015), os perfis laminados geralmente são especificados comercialmente de acordo com a norma americana ASTM A6/A6M (*American Society for Testing and Materials*) e que possuem especificações equivalentes na NBR 7007:2011, como apresenta a Tabela x. A NBR 7007 tem por objetivo estabelecer requisitos mínimos para os aços carbono e os chamados aços microligados, laminados a quente para aplicação em perfis para uso estrutural. Os aços abrangidos por essa norma são classificados segundo suas propriedades mecânicas, nos seguintes graus: o aço carbono NBR 7007 grau MR 250 e os aços microligados NBR 7007 grau AR 350, NBR 7007 grau AR 415 e NBR 7007 grau AR 350 COR.

2.2.3 Perfis laminados com mesas de faces paralelas

A produção dos perfis de abas paralelas da série WF (*Wide Flange*) foi iniciada no Brasil no ano de 2002 pela Gerdau Açominas, com isso mais de 80 bitolas com diferentes. Os perfis de abas paralelas produzidos pela Gerdau Açominas têm uma extraordinária flexibilidade comparando os antigos perfis americanos que, quando encontrados, são

ofertados em aço ASTM A 36, apenas nas alturas de 6, 8 e 10 polegadas e no máximo duas bitolas popularizadas como 1ª e 2ª almas (PEREIRA, 2014).

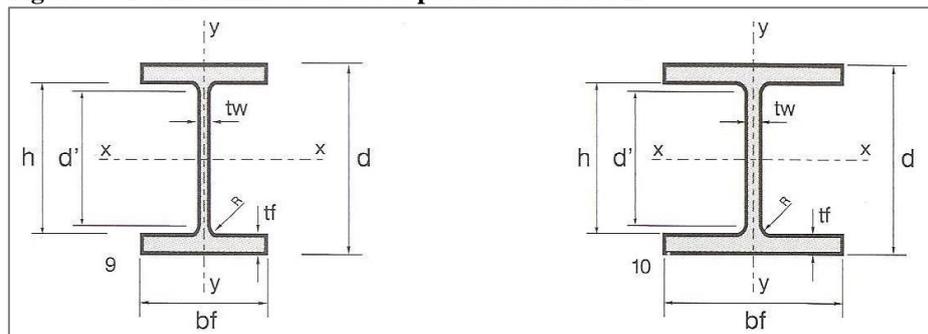
Em estruturas metálicas se utilizam vários tipos de componentes entre eles, parafusos, chumbadores, perfis e chapas de ligação. Entre estes componentes o mais importante para o projeto, fabricação e a montagem são os perfis estruturais (SILVA; PANNONI, 2010).

Silva e Pannoni (2010, p.30), descrevem algumas informações gerais relevantes para os perfis laminados com mesas de faces paralelas:

Os perfis laminados com mesas de faces paralelas [...] são produzidos de acordo com as tolerâncias dimensionais descritas na Norma ASTM A6/A6M, em aço de alta resistência mecânica descrito na Norma ASTM A572 Grau 50 (f_y mínimo de 350 MPa). Esses perfis também são fornecidos em aço resistente a corrosão atmosférica (f_y mínimo de 370 MPa). Esses perfis são oferecidos em várias medidas, compreendidas entre 150 mm e 610 mm de altura e comprimento-padrão de 12 m. Os perfis fabricados no Brasil dividem-se em duas séries: W e HP. Sua designação é dada pela série, seguida da altura e da massa por unidade de comprimento. Por exemplo: W 310 x 44,5 ou HP 250 x 62.

Já Dias (1997), menciona que as siderúrgicas: “Adotam nomenclatura da série americana WF (*wide flange*) os perfis de abas paralelas e largas medindo de 150 a 610 mm – ou de 6 a 24 polegadas – e comprimento padrão de 12 metros [...]”.

Figura 8 - Perfis laminados de abas paralelas série I e H



Fonte: Dias (1997, p.85).

Os perfis laminados de abas paralelas são produzidos sob encomenda, segundo as especificações da norma ASTM A 6/A 6M em aço de alta resistência ASTM A572 Grau 50 (com limite de escoamento mínimo de 350 MPa). Assim como o aço COR 500 que é resistente a corrosão atmosférica (com limite de escoamento mínimo de 370 MPa). (DIAS, 1997).

Figura 9 - Perfis estruturais laminados de abas paralelas (WF)

PERFIS ESTRUTURAIS LAMINADOS DE ABAS PARALELAS (WF)						
SIDERÚRGICA	QUALIDADE (DENOMINAÇÃO)	LIMITE DE ESCOAMENTO - MÍNIMO - (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA - MÍNIMO/MÁXIMO - (MPa)	RESISTÊNCIA MECÂNICA	RESISTÊNCIA A CORROSÃO	RESISTÊNCIA AO FOGO
	ASTM A 572 GR 50	345	450	ALTA	NORMAL	NORMAL
	ASTM A 992	345/450	450/620	ALTA	NORMAL	NORMAL
	AÇO COR 500	370	500	ALTA	SUPERIOR	NORMAL

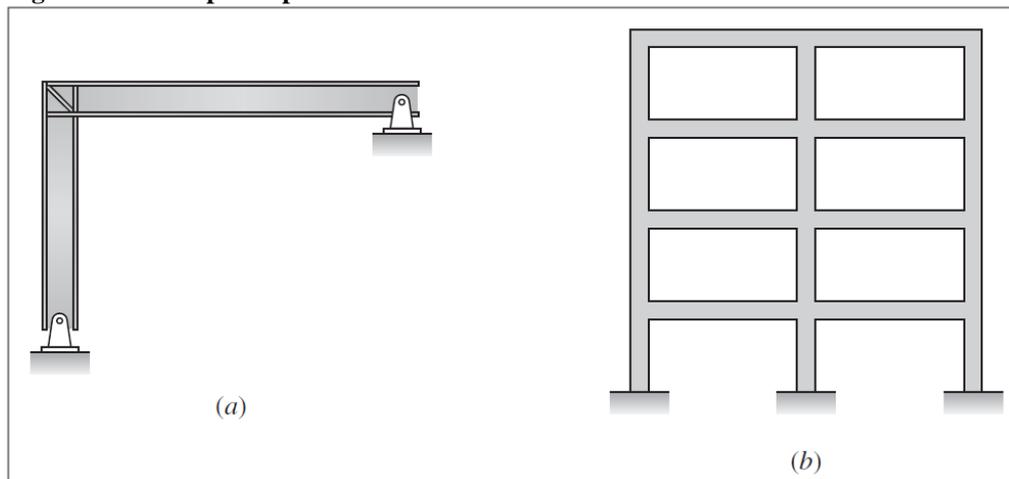
Fonte: Dias (1997, p.85).

2.3 PÓRTICOS

De acordo com Machado Junior (1999, p.64): “Pórticos planos são estruturas lineares, coplanares com as cargas ativas e reativas. Os elementos estruturais geralmente são unidos por nós rígidos podendo existir articulações entre eles”.

Já Almeida (2009, p.89) descreve que: “Os pórticos planos são estruturas formadas por elementos (ou barras) cujos eixos, com orientações arbitrárias, pertencem todos a um único plano (plano da estrutura) ”.

Os pórticos são elementos estruturais compostos de vigas e colunas conectadas por ligações rígidas. O ângulo entre a viga e a coluna normalmente é de 90°. Como mostrado na Figura 10, a e b, os pórticos podem consistir em uma única coluna e viga ou, como em um prédio de vários andares, de muitas colunas e vigas (LEET; UANG; GILBERT, 2010).

Figura 10 - Exemplo de pórticos

Fonte: Leet, Uang e Gilbert (2010, p. 171).

Ainda segundo Machado Junior (1999, p.64):

O pórtico isostático de nós rígidos é um quadro aberto, podendo ser considerado como uma única chapa. Necessita de três barras vinculares não concorrentes para restringir todos os movimentos no plano. Para o cálculo das reações de apoio, são necessárias, portanto, três equações de equilíbrio.

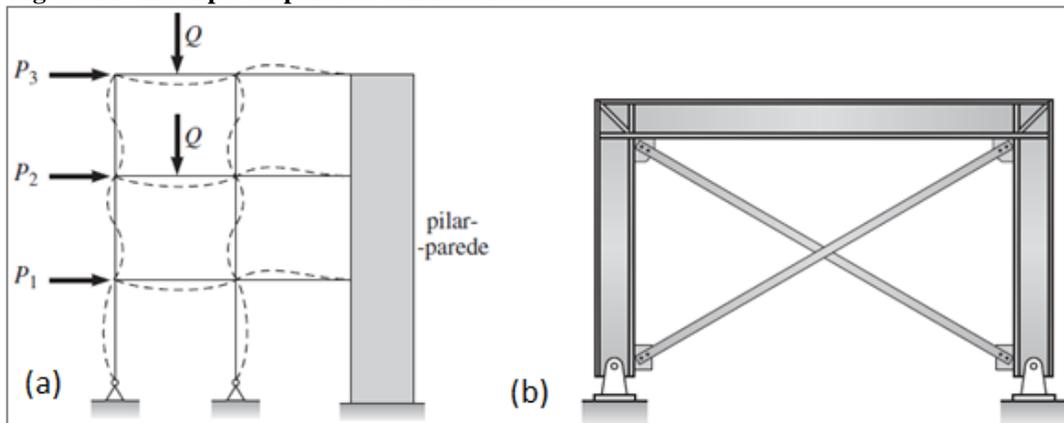
Machado Junior (1999) classificou os pórticos em quatro tipos: pórtico simples, pórtico em balanço, pórtico tri-articulado e pórtico atirantado.

Já Almeida (2009) classifica os pórticos em: simples (que abrangem os tipos: biapoiado, engastado e livre, triarticulado e biapoiado com articulação e tirante) e pórticos compostos que são resultado da associação de dois ou mais pórticos simples.

Amaral (2014) define pórticos como estruturas formadas por barras que formam quadros entre si. Segundo ele existem quatro tipos fundamentais de quadros isostáticos planos que quando associados formam os quadros compostos.

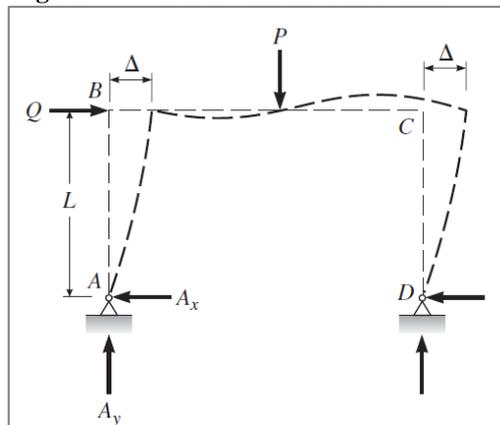
Um pórtico é composto de elementos estruturais, segundo Silva e Pannoni (2010, p.141): “Para compor a estrutura, os elementos de aço (vigas e pilares) são conectados entre si ou a outros elementos estruturais (lajes e blocos), ou seja, há elementos que se apoiam em outros que lhe servem de apoio”.

Os pórticos podem ainda ser divididos em duas categorias: contraventados e não contraventados. Pórtico contraventado é aquele no qual os nós em cada nível estão livres para girar, mas são impedidos de se mover lateralmente pela fixação em um elemento rígido que pode fornecer-lhes restrição lateral. Por exemplo, em um prédio de vários andares, os pórticos estruturais são frequentemente ligados aos pilares-paredes (paredes estruturais rígidas, em geral construídas de concreto armado ou alvenaria armada; ver Figura 11 (a)). Em pórticos simples de um vão, pode ser utilizado um contraventamento diagonal leve, conectado à base das colunas, para resistir ao deslocamento lateral dos nós superiores (ver Figura 11 (b)) (LEET; UANG; GILBERT, 2010).

Figura 11 - Exemplo de pórticos contraventados

Fonte: Leet, Uang e Gilbert (2010, p. 171).

Pórtico não contraventado (ver Figura 12) é aquele no qual a resistência lateral ao deslocamento é fornecida pela rigidez à flexão das vigas e colunas. Nos pórticos não contraventados, os nós estão livres para deslocar lateralmente, assim como para girar. Como tendem a ser relativamente flexíveis comparados aos pórticos contraventados, sob carga lateral os pórticos não contraventados podem sofrer grandes deflexões transversais que danificam, por exemplo, os elementos não estruturais associados, como paredes, janelas etc (LEET; UANG; GILBERT, 2010).

Figura 12 - Pórtico não-contraventado

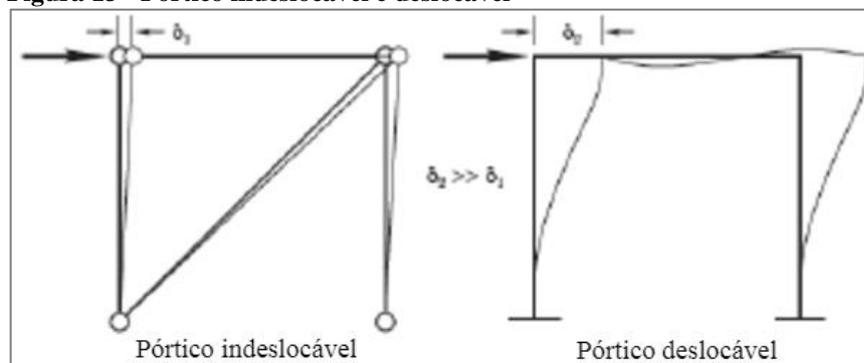
Fonte: Leet, Uang e Gilbert (2010, p. 171).

Nos elementos estruturais normalmente utilizados na construção civil, o deslocamento de pontos que ocorre devido à deformação axial, tanto por tração como por compressão é menor do que o deslocamento provocado pela flexão. As treliças são estruturas muito rígidas devido o deslocamento dos seus nós dependerem somente da deformação axial. Já nos casos dos pórticos os deslocamentos nodais podem se dar tão somente em função da

deformação axial ou da deformação por flexão. Deste modo são classificados de forma qualitativa, os pórticos em deslocáveis e indeslocáveis (SILVA; PANNONI, 2010).

De acordo com Silva e Pannoni (2010) os pórticos podem também classificados em deslocáveis e indeslocáveis, como mostra a figura 13. Os autores ainda mencionam que de maneira geral os pórticos deslocáveis são menos econômicos do que os indeslocáveis devido a ligação rígida exigir maior quantidade de material e mais trabalho de fabricação e montagem da conexão. Além disso, pode ser necessário utilizar pilares mais robustos, afim, de limitar os deslocamentos. Já os indeslocáveis prejudicam eventuais passagens sob eles, pela adição de travamentos o que pode exigir adequações na arquitetura do edifício.

Figura 13 - Pórtico indeslocável e deslocável



Fonte: Silva e Pannoni (2010, p. 157).

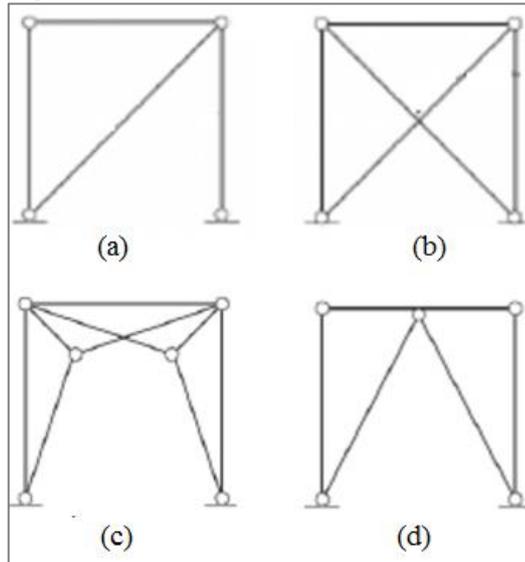
Os pórticos indeslocáveis podem ser concebidos da seguinte maneira: apoio direto no plano, travamentos no plano e travamentos fora do plano. A classificação deslocável e indeslocável é bastante prática na concepção da estrutura, no entanto, para o cálculo estrutural é preciso avaliar melhor a deslocabilidade, pois quanto maior a mesma mais complexo será o cálculo estrutural. (SILVA; PANNONI, 2010).

Ainda segundo Silva e Pannoni (2010), dentre os principais tipos de contraventamento em pórticos podemos citar:

- Contraventamento por uma diagonal;
- Contraventamento em forma de X;
- Contraventamento em forma de Y;
- Contraventamento em forma de K;

Estes contraventamentos podem ser visualizados na figura 14, sendo respectivamente (a) Contraventamento por uma diagonal; (b) Contraventamento em forma de X; (c) Contraventamento em forma de Y; (d) Contraventamento em forma de K.

Figura 14 – Sistemas de contraventamento



Fonte: Silva e Pannoni (2010).

2.4 CÁLCULO DE PÓRTICOS METÁLICOS

Até meados da década de 80, as normas para projeto de estruturas metálicas utilizavam o Método das Tensões Admissíveis (*Allowable Stress Design, ASD*, segundo o AISC, *American Institute of Steel Construction*), quando passaram gradativamente a adotar o Método dos Coeficientes Parciais (LRFD - *Load and Resistance Factor Design*), denominado no Brasil de método dos estados limites (PFEIL; PFEIL, 2014).

De acordo com Kripka (2011), para fins de análise do cálculo pode-se isolar as barras do pórtico (elementos estruturais: pilares e vigas) desde que se aplique nos nós intermediários os esforços atuantes de modo que seja mantido o equilíbrio das barras.

No método das tensões admissíveis, o dimensionamento é considerado satisfatório quando a máxima tensão solicitante em cada seção é inferior a uma tensão resistente reduzida por um coeficiente de segurança (PFEIL; PFEIL, 2014). Por exemplo, para um membro em tração pura, se a máxima tensão atuante ($\sigma_{m\acute{a}x}$) deve ser menor que a tensão admissível (σ_{adm}) a estrutura estará segura desde que a equação (1) abaixo seja satisfeita:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{A} < \sigma_{adm} \quad (1)$$

Ainda segundo Pfeil e Pfeil (2014), no Método dos Estados Limites, a segurança será garantida se a solicitação de projeto for menor que a resistência de projeto. Isto pode ser atendido se a equação (2) a seguir for satisfeita para cada seção da estrutura:

$$S_d = S \left(\sum \gamma_{fi} F_i \right) < R_d = \varphi R_u \quad (2)$$

Onde: S_d = solicitação de projeto, F_i = cargas a serem combinadas, γ_{fi} = coeficientes de majoração das cargas, R_u = resistência nominal do material, R_u = resistência de projeto do material, φ = coeficiente de minoração da resistência.

Um estado limite ocorre sempre quando uma estrutura deixa de satisfazer um de seus objetivos. Podem ser divididos em Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Utilização/Serviço (ELS) (PFEIL; PFEIL, 2014). Estados Limites Últimos estão associados às cargas excessivas/colapso devido à alguns motivos como:

- Perda de equilíbrio como corpo rígido;
- Plastificação total de um elemento estrutural ou seção;
- Ruptura de ligação ou seção;
- Flambagem em regime elástico ou não;
- Ruptura por fadiga.

Já os Estados Limites de Utilização estão associados a cargas de serviço:

- Deformações excessivas;
- Vibrações excessivas.

Como os principais tipos de esforços em pórticos que devem ser verificados são Compressão, Tração, Cisalhamento, Flexão e Flambagem, será feito um breve descritivo a seguir das equações de análise. Um maior detalhamento sobre o assunto pode ser encontrado na norma NBR 8800:2008 (ABNT, 2008).

2.4.1 Cálculo de membros submetidos à força axial pura

O esforço resistente de projeto ($N_{d,res}$), para hastes metálicas, sem efeito de flambagem local, sujeitas à compressão axial, é dado pela equação (3). Não irá ocorrer falha sempre que a carga solicitante de projeto for menor que o esforço resistente de projeto (PFEIL; PFEIL, 2014).

$$N_{d,res} = \frac{N_c}{\gamma_{a1}} = \frac{A_g f_c}{\gamma_{a1}} \quad (3)$$

Onde: A_g = área da seção transversal da haste, f_c = tensão resistente o tensão última à compressão simples, γ_{a1} = coeficientes de ponderação de resistência (para ações normais 1,1).

2.4.2 Cálculo de membros submetidos à flambagem

Do ponto de vista estritamente conceitual, Silva e Pannoni (2010, p.173) descrevem:

O fenômeno da flambagem somente ocorre em pilares ideais (material elástico-linear, elementos perfeitamente retilíneos e ausência de excentricidade na aplicação do carregamento). Em estruturas reais sempre há uma imperfeição na aplicação da força, na retilineidade do eixo do perfil etc. Nesse caso a presença da força normal, mesmo que centrada, provocará um momento fletor. A barra estará sujeita, portanto, a flexocompressão, o que a fará curvar-se desde o início da aplicação do carregamento, não se encontrando uma alteração notável de deformação quando a força crítica é aplicada, ou seja, o fenômeno da flambagem, conforme definido teoricamente, não ocorre em pilares reais. No entanto, a resposta (deformação) estrutural de um pilar “real” sujeito a força normal aplicada lembra aquela dos fenômenos teóricos da flambagem.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2014) a carga crítica para provocar flambagem (N_{cr}), é dado pela equação (4):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (4)$$

Onde: E = módulo de Elasticidade longitudinal, I = momento de inércia da seção transversal, k = fator de comprimento efetivo da coluna, L = comprimento real da coluna.

O fator de comprimento efetivo irá depender do tipo de apoio das colunas. A figura a seguir apresenta tais valores conforme a NBR 8800:2008 (ABNT, 2008).

Figura 15 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Fonte: Bellei, Pinho e Pinho (2008, p. 331).

O raio de giração, que é comumente fornecido em tabelas de fabricante de perfis, também pode ser utilizado na equação anterior e é dado de acordo com a equação (5):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

O índice de esbeltez por sua vez, também bastante utilizado em análise de flambagem é o parâmetro que relaciona o comprimento do perfil com a altura do mesmo:

$$\lambda = \frac{L}{d} \quad (6)$$

Não irá ocorrer flambagem caso a carga de solicitação no elemento for menor que a carga crítica de flambagem.

2.4.3 Cálculo de membros submetidos à flexão

O valor do momento fletor resistente de cálculo para o estado limite último de escoamento da mesa tracionada é dado por:

$$M_{Rd} = \frac{W_{xt} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (7)$$

onde W_{xt} é o módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão.

Para não ocorrer falha, o momento fletor solicitante de cálculo M_{Sd} deve ser menor que o momento fletor solicitante de cálculo M_{Rd} .

Segundo Margarido (2001) em relação a dimensão das vigas sujeitas a flexão, podemos adotar para o aço a altura da viga como 1/15 a 1/25 da distância entre pontos de momento nulo. Porém devemos lembrar que em muitos casos mesmo resistindo, a viga apresenta flecha incompatível com sua função. É importante salientar que deve se observar sempre a maior altura para que as dimensões previstas também contemplem as fechas.

$$\text{Aço: } 1/15 \geq h \geq 1/25$$

2.4.4 Cálculo de membros submetidos ao cisalhamento

Em seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma e seções caixão e tubulares retangulares fletidas em relação a um eixo central de inércia, a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é dada por:

$$\begin{aligned} V_{Rd} &= \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \{para \lambda \leq \lambda_p \\ V_{Rd} &= \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \{para \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ V_{Rd} &= 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & \{para \lambda > \lambda_r \end{aligned} \quad (8)$$

onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (9)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (10)$$

$$\lambda_p = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (11)$$

e

$$k_v = \begin{cases} 5,0 & , para almas sem enrijecedores \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} & , para todos os outros casos \end{cases} \quad (12)$$

O valor do esforço cortante para a plastificação da área por cisalhamento V_{pl} pode ser calculado por:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (13)$$

O parâmetro A_w é a área efetiva de cisalhamento e pode ser tomada simplesmente pelo produto da altura total da seção transversal e a espessura da alma.

Para não ocorrer falha, a força cortante solicitante de cálculo V_{Sd} deve ser menor que a força cortante resistente de cálculo V_{Rd} .

2.5 ORÇAMENTO

Os orçamentos são formados pelos custos ligados a execução da obra. Deve-se considerar como aspectos importantes para elaborar um orçamento a qualidade e quantidade das informações disponíveis a respeito da obra. A falta de informações é responsável por muitos insucessos, pois o orçamento pode fornecer valores diferentes da realidade. Entretanto se o erro é a menor, ganha-se vantagem da concorrência, porém só se verifica o erro quando o prejuízo já está configurado (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

De acordo com Gonzáles (2008, p. 7) “Na visão tradicional, um orçamento é uma previsão (ou estimativa) do custo ou do preço de uma obra. O custo total da obra é o valor correspondente à soma de todos os gastos necessários para sua execução”.

Mattos (2006, p. 22) descreve os critérios de um orçamento bem elaborado, conforme segue:

Orçar não é um mero exercício de futurologia ou jogo de adivinhação. Um trabalho bem executado, com critérios técnicos bem estabelecidos, utilização de informações confiáveis e bom julgamento do orçamentista, pode gerar orçamentos precisos, embora não exatos, porque o verdadeiro custo de um empreendimento é virtualmente impossível de se fixar de antemão. O que o orçamento realmente envolve é uma estimativa de custos em função da qual o construtor irá atribuir seu preço de venda - este, sim, bem estabelecido.

Quando se configura uma nova proposta, existe um conflito entre o departamento técnico e o comercial. O técnico resguarda os interesses da área de produção enquanto o comercial busca o menor preço para garantir a venda. Além disso ainda há um conflito com o cliente onde o mesmo busca o preço mais econômico enquanto o vendedor procura fechar o contrato com lucratividade máxima (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

3. METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma pesquisa com finalidade descritiva e documental através de um estudo de caso.

Segundo Gil (2002 apud Fáveri, 2008, p.29) “as pesquisas descritivas tem como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre as variáveis”.

No presente estudo foram elaboradas configurações distintas de estruturas de pórticos em aço, sendo sete casos (A-01, A-02, A-03, A-04, A-05, A-06 e A-07) para o material COR 500 e sete casos (B-01, B-02, B-03, B-04, B-05, B-06 e B-07) do material ASTM A572 Grau 50, além de nesses quatorze casos utilizarem inicialmente o perfil W310x97. Com a finalidade de fazer um comparativo entre os dois materiais empregados e o peso final da estrutura, além de escolher quatro modelos para otimizar os perfis da estrutura. Também foi considerado dimensões admissíveis para a estrutura da caldeira.

A ferramenta utilizada para análise dos modelos estruturais desta pesquisa foi o *software* SCIA Engineer (versão estudantil), da empresa Nemetschek Company. Neste ambiente, é realizado o desenho da estrutura, a escolha da geometria do perfil, o tipo de material e as solicitações atuantes. O *software* já é configurado concebido de acordo com a norma vigente NBR 8800:2008. Também foi utilizado o *software* AutoCAD 2018 (versão estudantil), da empresa Autodesk, para elaboração do projeto contendo a planta baixa e a vista do pórtico em aço, com dimensões.

A análise de dados foi realizada por meio do *software* Microsoft Excel, utilizando-se quadros para facilitar o entendimento dos resultados obtidos na análise do fator máximo de verificação de cada elemento presente na estrutura.

As informações necessárias para esta pesquisa foram obtidas por meio de pesquisa bibliográfica e normas que fundamentam este tipo de análise estrutural.

Com as análises foi possível um maior entendimento do problema, como distribuição das cargas e solicitações nos diferentes elementos das estruturas, variação dos esforços internos, benefícios dos contraventamentos, valores das tensões em diferentes seções, diferenças nas solicitações nos dois materiais e custo final dos perfis.

4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo se dará o desenvolvimento em si do estudo de caso. Nele serão abordados os diagramas de fator de cálculo para quatorze casos de dois tipos de aço. Também será gerado listas de materiais para os mesmos, onde será orçado valores para compra dos perfis.

4.1 CARGAS CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO

Inicialmente foi considerado para o cálculo estrutural um perfil laminado de abas paralelas W310x97, para o estudo de caso. As cargas atuantes na estrutura do pórtico em aço foram consideradas como 310.000 kgf, informação enviada pela empresa de caldeira.

A carga total da caldeira, que a base do pórtico metálico precisará suportar será de 310.000 kgf. Segue abaixo conversão de unidades de cargas necessárias para utilização no *software SCIA Engineer*:

$$Carga\ total = 310.000\ kgf / 9.8 = 3040,0615\ kN/m$$

$$3040,0615\ kN/m / 2 = 1520,03\ kN/m$$

$$1520,03\ kN/m / 10,307m = 147,48\ kN.m$$

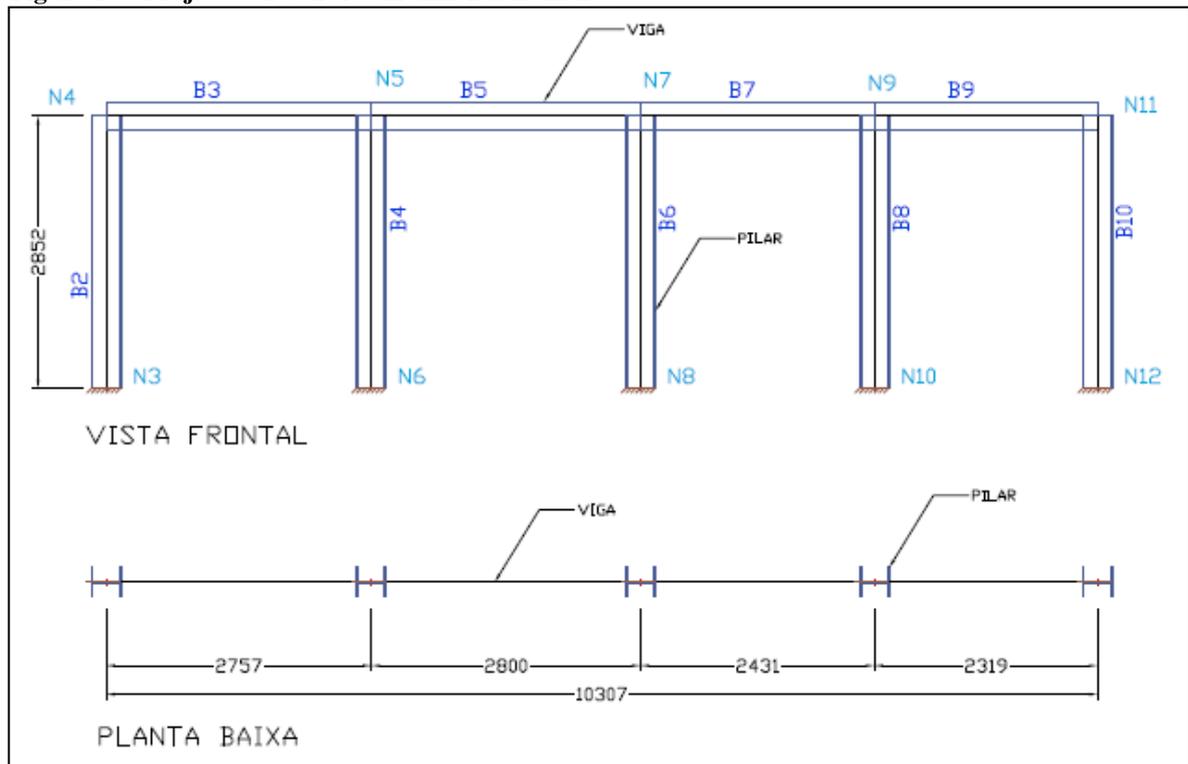
Esta carga da caldeira de 310.000 kgf foi dividida por dois, pois a mesma carga informada serve para as duas bases do pórtico, sendo assim, o valor da carga ficou com 1.520,03 kN/m. Posteriormente foi dividido o mesmo valor pelo comprimento total da estrutura do pórtico, afim de, verificar a carga atuante por metro. Também vale destacar para efeito de cálculo, que a estrutura do pórtico foi concebida no plano 2D.

4.2 PROJETO E MODELO ESTRUTURAL

Para elaboração do projeto estrutural foi utilizado o *software* AutoCAD 2018, através da exportação do *software* SCIA Engineer de cálculo, contendo o dimensionamento necessário para o projeto. Esta representação do projeto será utilizada como modelo genérico, mudando apenas a adição ou subtração de contraventamentos e pilar, conforme representado no quadro 1.

Neste projeto podemos verificar os elementos e os nós, representados respectivamente por B e N, onde B corresponde a pilares e vigas e N corresponde aos nós da estrutura. Os nós foram considerados como engastados na base de todos os pilares. Já na ligação entre pilar e viga foi considerado como nó articulado.

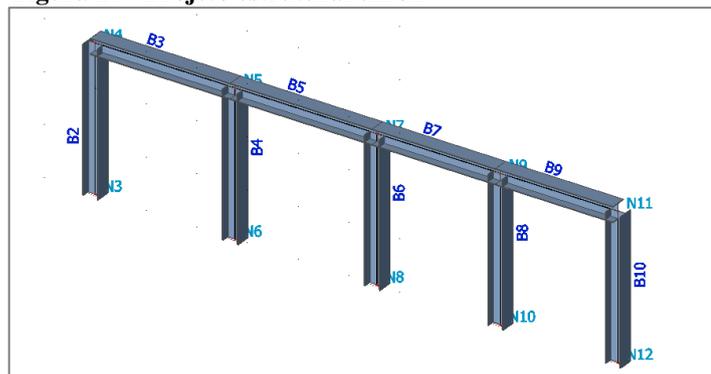
Figura 16 - Projeto estrutural com dimensionamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* Autocad 2018.

No modelo tridimensional ou modelo 3D, conforme figura 17, podemos verificar a estrutura como um todo, as interferências, os perfis empregados e a nomenclatura para nós e barras. Este modelo pode ser exportado para outros *softwares* utilizados no mercado nacional e internacional.

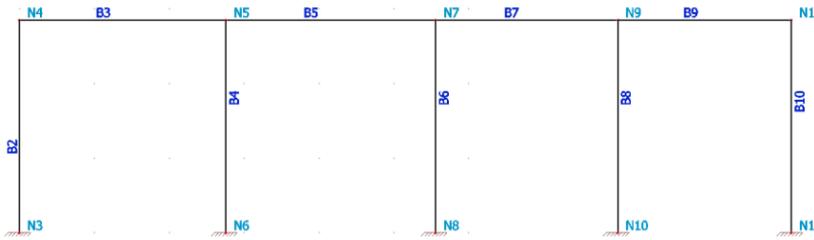
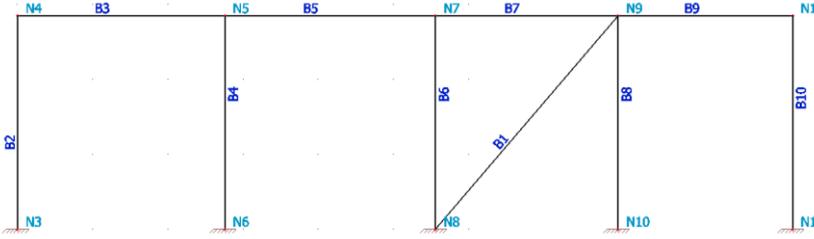
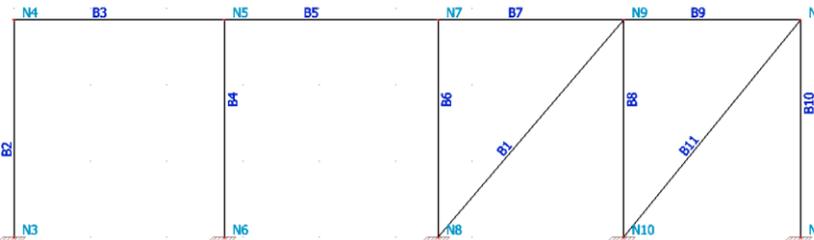
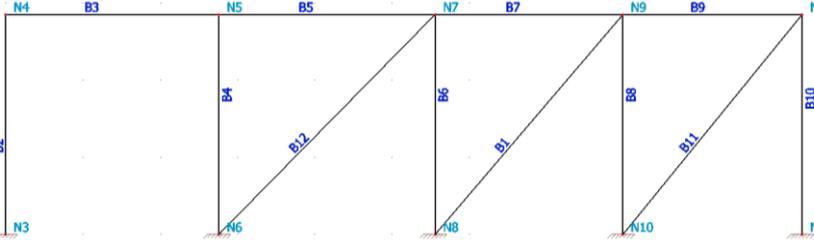
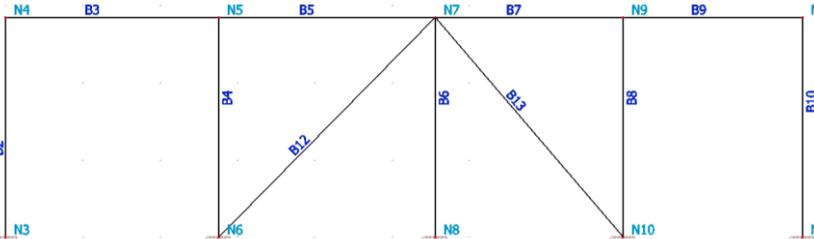
Figura 17 - Projeto estrutural em 3D



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* SCIA Engineer.

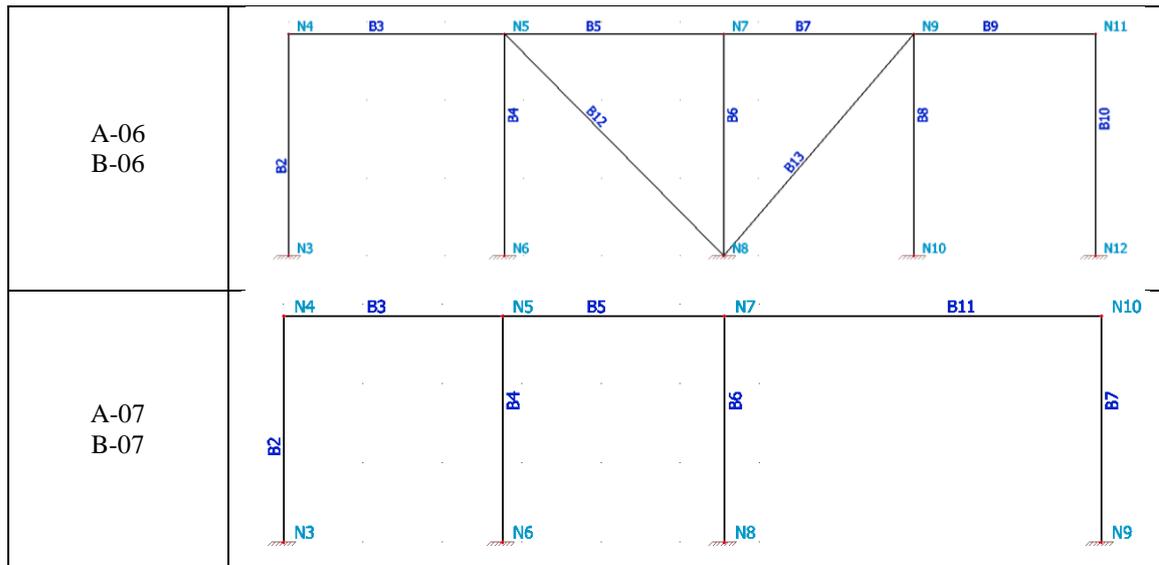
Depois de elaborado o projeto genérico foi elaborado um quadro para melhor entendimento quanto ao estudo dos casos. Neste quadro foi apresentada a estrutura genérica do projeto com adição e subtração de contraventamento e pilares contendo sete tipos de pórticos metálicos. Estes contraventamentos estão representados em várias posições para cada caso. Também estão contidos os nomes dos casos representados por A e B, que serão utilizados nas verificações dos cálculos na sequência do estudo.

Quadro 1 - Tipo de pórtico para cada caso

Nomes dos Casos	Estrutura dos casos
A-01 B-01	
A-02 B-02	
A-03 B-03	
A-04 B-04	
A-05 B-05	

Continua...

Continuação...



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

4.3 LISTA DE MATERIAIS

Através do *software SCIA Engineer* foi gerada uma lista de materiais para cada caso, onde podemos observar que o aço COR 500 e aço ASTM A572 Grau 50, resultaram no mesmo peso para os mesmos tipos de pórticos. Por exemplo no caso A-01 e B-01 o peso resultou em 2.372,10 kg, ou seja, o peso dos dois materiais para os pórticos ficou igual. Vale lembrar que com a adição de contraventamento aumenta o peso total para cada pórtico.

Quadro 2 - Lista de materiais para cada CASO

Casos	Perfil	Material	Massa unitária [kg/m]	Comprimento [mm]	Massa [kg]
A-01	W310X97	AÇO COR 500	96,6	24566,999	2372,1
A-02	W310X97	AÇO COR 500	96,6	28314,489	2733,9
A-03	W310X97	AÇO COR 500	96,6	31990,309	3088,8
A-04	W310X97	AÇO COR 500	96,6	35987,049	3474,7
A-05	W310X97	AÇO COR 500	96,6	32311,230	3119,8
A-06	W310X97	AÇO COR 500	96,6	32311,230	3119,8
A-07	W310X97	AÇO COR 500	96,6	21715,000	2096,7
B-01	W310X97	A572 grau 50	96,6	24566,999	2372,1
B-02	W310X97	A572 grau 50	96,6	28314,489	2733,9
B-03	W310X97	A572 grau 50	96,6	31990,309	3088,8
B-04	W310X97	A572 grau 50	96,6	35987,049	3474,7
B-05	W310X97	A572 grau 50	96,6	32311,230	3119,8
B-06	W310X97	A572 grau 50	96,6	32311,230	3119,8
B-07	W310X97	A572 grau 50	96,6	21715,000	2096,7

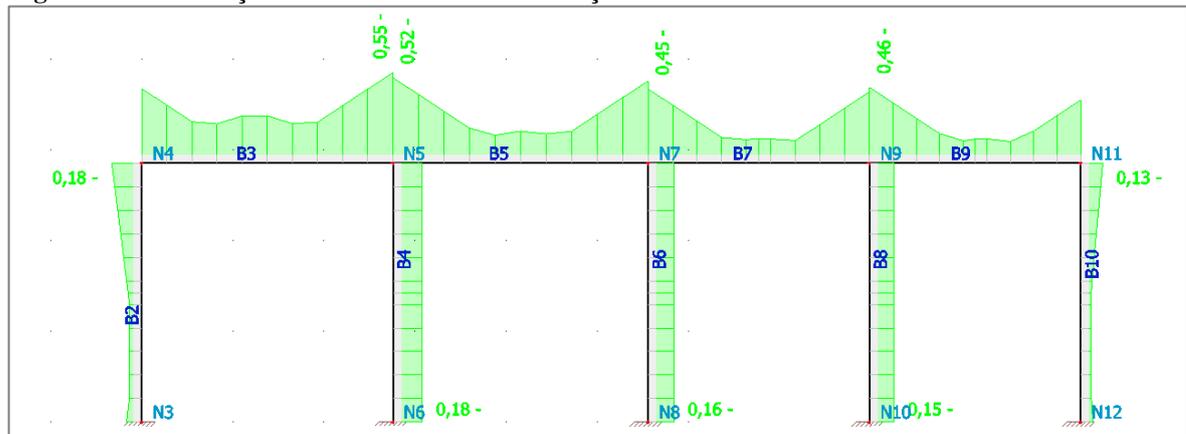
Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

4.4 VERIFICAÇÕES DO CÁLCULO COM AÇO COR 500

Para os resultados dos sete casos conforme a seguir, estes pórticos estão dimensionados com o aço COR 500 e perfil W310x97, onde podemos observar que todos os pórticos passam na verificação do cálculo e estão dispostos com valores em porcentagem.

Analisando os valores do fator do cálculo, para o diagrama representado na figura 18, podemos observar que a viga mais solicitada é a B3, com valor de 0,55, ou seja, 55%, sendo o maior valor representado neste elemento. Já a menos solicitada é a viga B7 com 45%. O pilar mais solicitado foi o B4 com 18%, seguido do pilar B2 com 18% também, porém o mesmo está mostrando uma região menor no diagrama, o que significa menos solicitação ao longo do pilar.

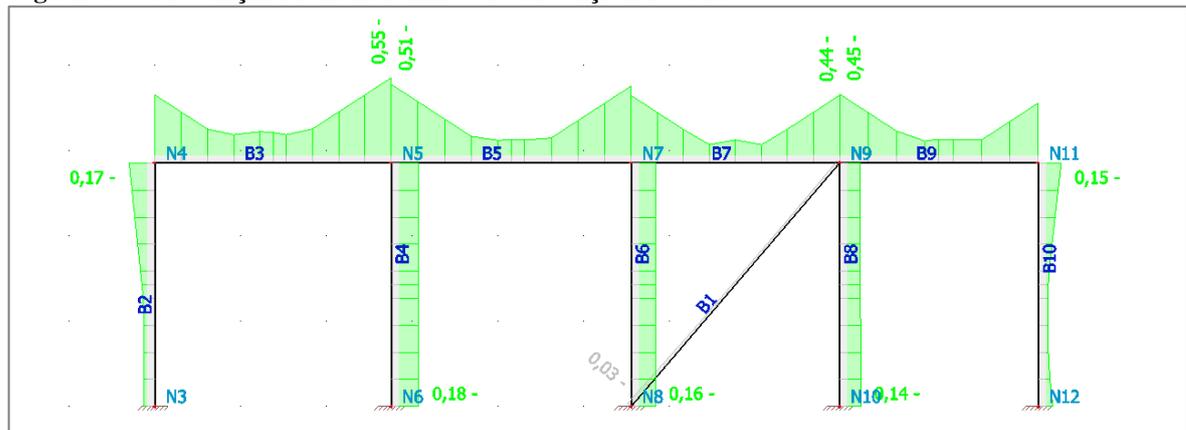
Figura 18 - Verificação do cálculo caso A-01 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso A-02, a seguir, foi utilizado um contraventamento, representado pelo elemento B1, que por sua vez não alterou consideravelmente os percentuais do diagrama. Foi obtido nesta verificação 55% para a viga B3 e 18% para o pilar B4.

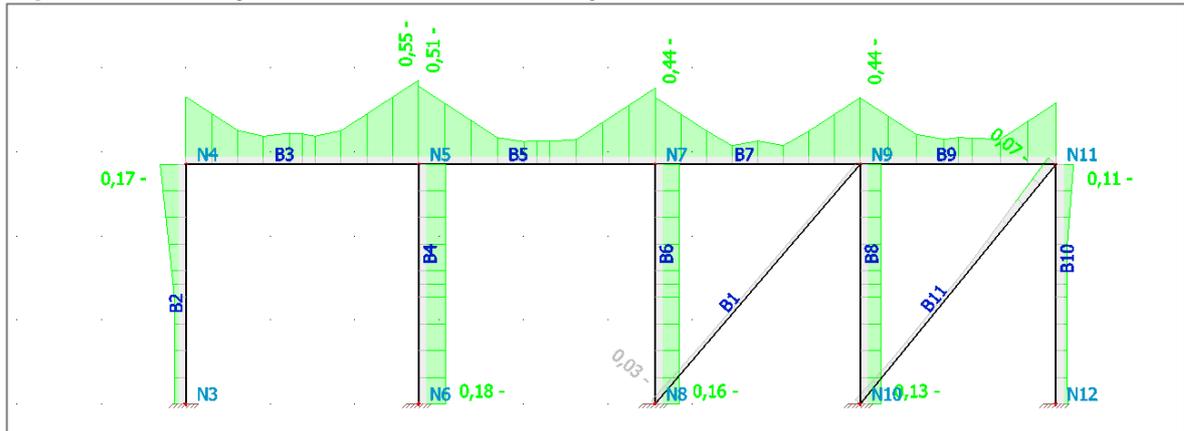
Figura 19 - Verificação do cálculo caso A-02 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso A-03 foram utilizados dois contraventamentos, representados pelos elementos B1 e B11, que resultou mais peso para a estrutura e não houve representação considerável dos percentuais em relação ao caso A-01, que por sua vez não tem contraventamentos.

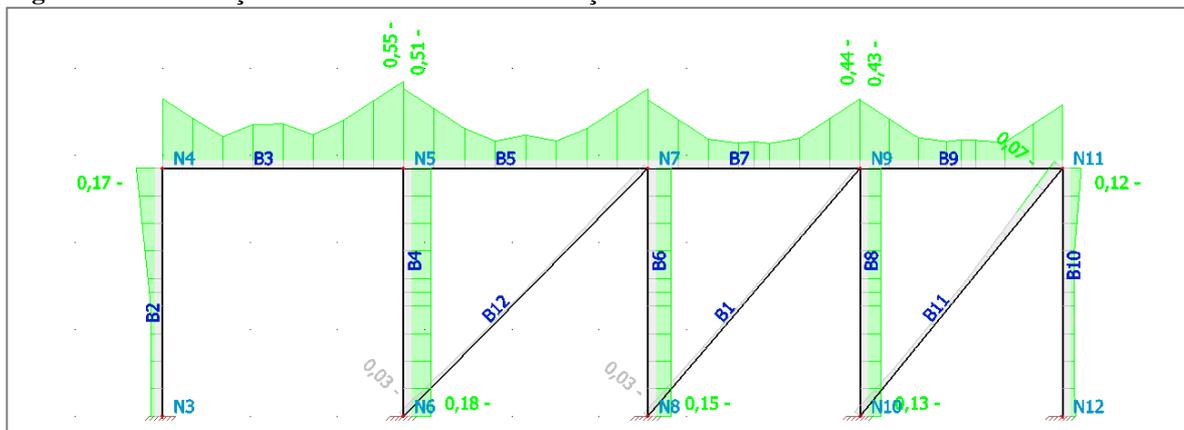
Figura 20 - Verificação do cálculo caso A-03 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

Para o caso A-04 foram utilizados três contraventamentos, representados pelos elementos B1, B11 e B12. Neste caso se observarmos o quadro 2 podemos observar que é o caso com maior quantidade de materiais empregados no pórtico, com comprimento total de 35.987,049 mm e peso total de 3.474,70 kg. O que significa que com os percentuais apresentados é o pórtico mais inviável deste estudo inicial.

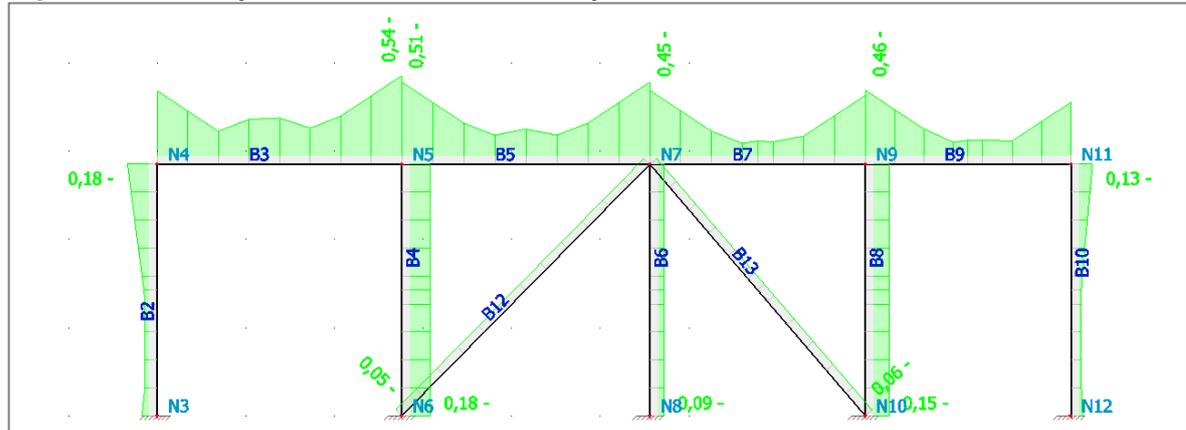
Figura 21 - Verificação do cálculo caso A-04 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso A-05 foi alterado a configuração dos contraventamentos, representados pelos elementos B12 e B13. Em relação aos casos anteriores, houve uma menor solicitação de cálculo para a viga B3 com 54% e para o pilar B6 com 9%.

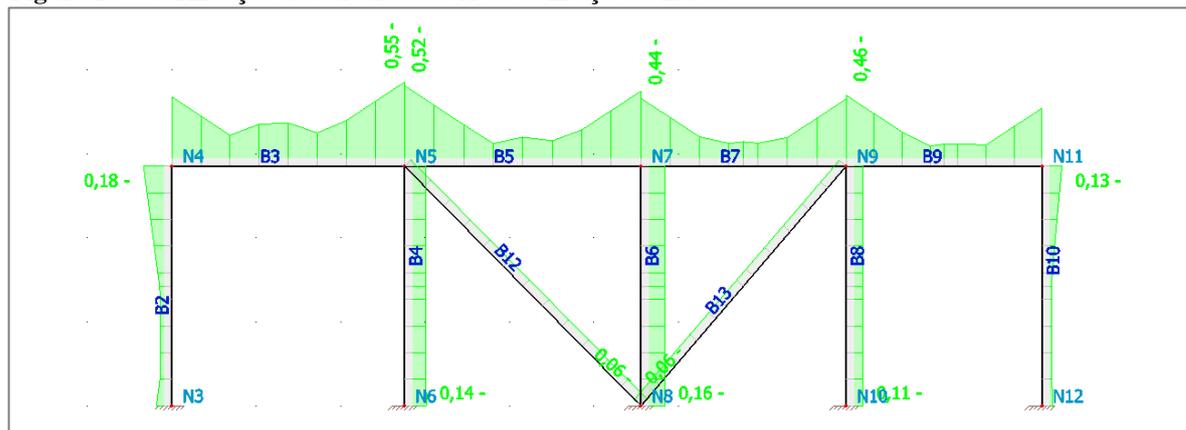
Figura 22 - Verificação do cálculo caso A-05 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso A-06 foi invertido o sentido dos contraventamentos. Neste caso podemos observar que esta configuração não alterou os percentuais para a viga e pilar mais solicitados no caso A-02.

Figura 23 - Verificação do cálculo caso A-06 com aço COR 500

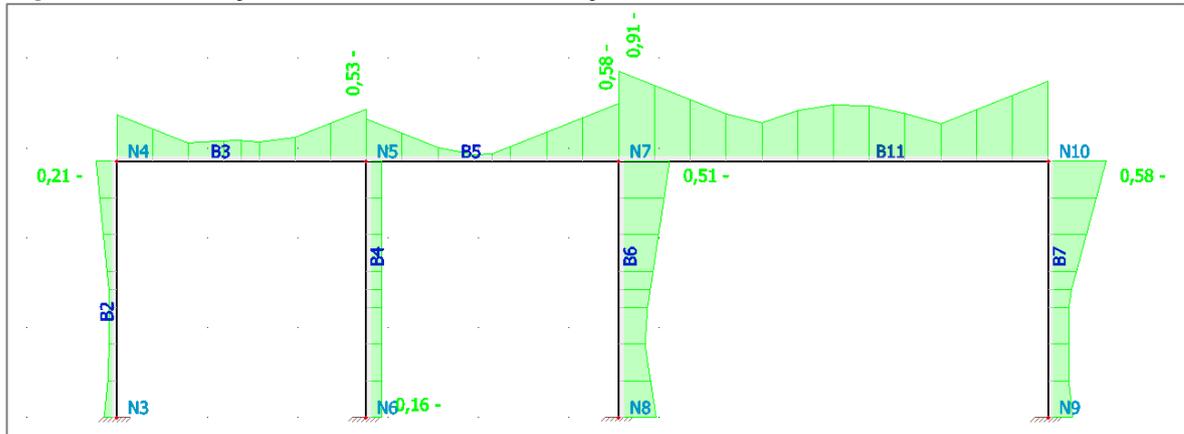


Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso A-07 foi eliminado o contraventamento e um pilar que está representado por B8 nos casos anteriores. Podemos observar que ao eliminar um pilar, há uma alteração drástica no diagrama, conforme figura 24. A viga B11 chega a 91% de solicitação do cálculo. Sendo que o máximo que a mesma suporta é até 100%. O pilar B6 chegou a 51% de

solicitação e o B7 com 58%. Comparando com os casos anteriores os percentuais também mudaram consideravelmente.

Figura 24 - Verificação do cálculo caso A-07 com aço COR 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* SCIA Engineer.

O quadro 3 refere-se aos resultados para cada caso do material COR 500, com elementos de pilares, vigas e contraventamentos. Nesta análise foram escolhidos os casos A-02 e A-07 para posteriormente recalculer o pórtico, que serão analisados no capítulo 4.6. O motivo para a escolha destes casos se dá devido ao caso A-02 estar menos solicitado e haver somente um contraventamento, resultando em um menor peso para a estrutura. Já o caso A-07 foi escolhido devido a configuração distinta entre os outros casos, pois foi removido um pilar que aumentou consideravelmente o vão entre os pilares B6 e B7, e conseqüentemente a solicitação de cálculo da viga B11.

Quadro 3 – Resultado do fator de cálculo para o material COR 500

Caso	Pilar	Viga	Contraventamento
A-01	0,18	0,55	0
A-02	0,18	0,55	0,03
A-03	0,18	0,55	0,03
A-04	0,18	0,55	0,07
A-05	0,18	0,54	0,06
A-06	0,18	0,55	0,06
A-07	0,58	0,91	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* Microsoft Excel.

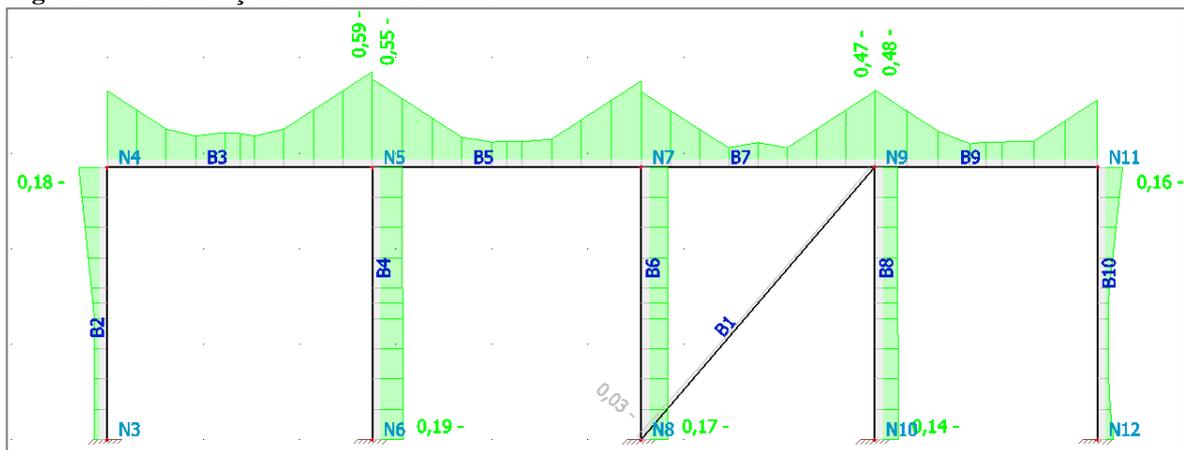
4.5 VERIFICAÇÕES DO CÁLCULO COM AÇO ASTM A572 Grau 50

Neste capítulo serão explicados os resultados obtidos nos sete casos do aço ASTM A572 Grau 50 e com o perfil W310x97, conforme segue. Onde podemos observar que todos

os pórticos passam na verificação do cálculo e estão dispostos com valores em porcentagem, conforme o quadro 4.

Na figura 25 representada pelo caso B-02, foi utilizado um contraventamento, representado pelo elemento B1, que por sua vez não alterou consideravelmente os percentuais do diagrama, em relação ao caso B-01, conforme valores dispostos no quadro 4. Foi obtido nesta verificação 59% para a viga B3 e 19% para o pilar B4. Chegando a uma diferença de mais de 7% em relação a viga B3 do caso A-02 com o aço COR 500.

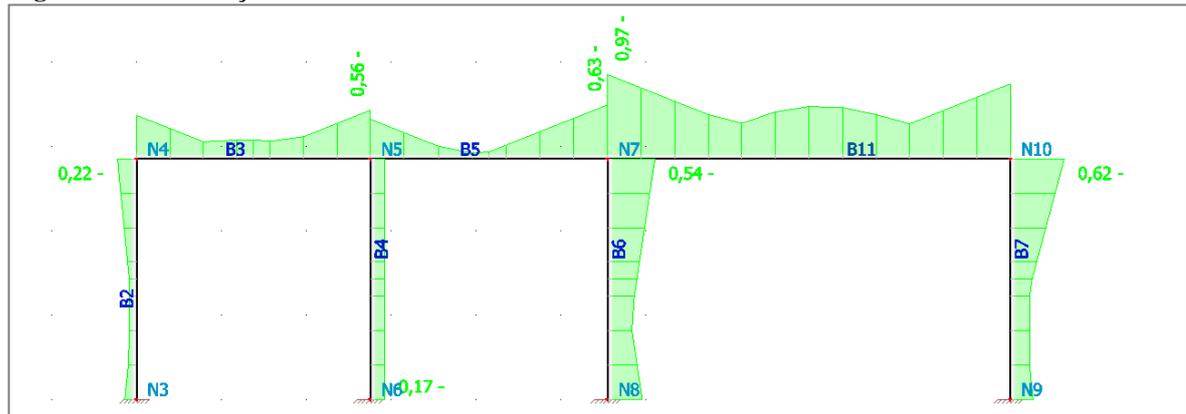
Figura 25 - Verificação do cálculo caso B-02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso B-07 foi eliminado o contraventamento e um pilar que está representado por B8 no caso B-02. Podemos observar que ao eliminar um pilar, há uma alteração drástica no diagrama, conforme é possível visualizar na figura 26. A viga B11 chega a 97% de solicitação do cálculo. Esta viga quase não passou no cálculo, sendo que o máximo que a mesma suporta é até 100%. O pilar B6 chegou a 54% de solicitação e o B7 a 62%. Comparando com os casos anteriores os percentuais também mudaram consideravelmente, conforme apresentado no quadro 4.

Figura 26 - Verificação do cálculo caso B-07



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* SCIA Engineer.

O quadro 4 refere-se aos resultados para cada caso do material ASTM A572, com elementos de pilares, vigas e contraventamentos. Nesta análise foram escolhidos os casos B-02 e B-07 para posteriormente recalculer o pórtico, que serão analisados no capítulo 4.6. O motivo para a escolha destes casos se dá devido ao caso B-02 estar menos solicitado e haver somente um contraventamento, resultando em um menor peso para a estrutura. Já o caso B-07 foi escolhido devido a configuração distinta entre os outros casos, pois foi removido um pilar que aumentou consideravelmente o vão entre os pilares B6 e B7, e conseqüentemente a solicitação de cálculo da viga B11.

Quadro 4 – Resultado do fator de cálculo para o material ASTM A572 Grau 50

Caso	Pilar	Viga	Contraventamento
B-01	0,19	0,59	0
B-02	0,19	0,59	0,03
B-03	0,19	0,59	0,07
B-04	0,19	0,59	0,07
B-05	0,19	0,58	0,06
B-06	0,19	0,59	0,06
B-07	0,62	0,97	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* Microsoft Excel.

4.6 COMPARATIVO DOS CASOS A-02, B-02, A-07 e B-07

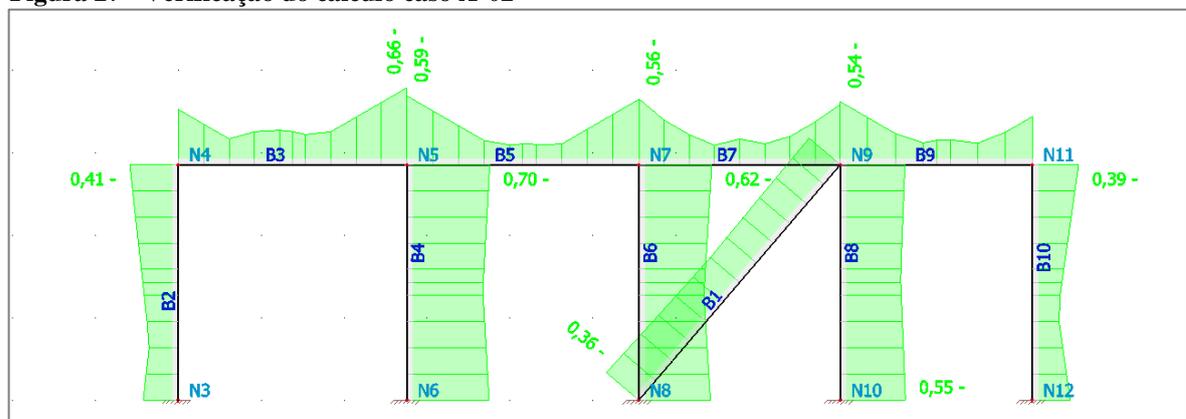
Com o estudo dos sete casos para cada tipo de material (COR 500 e ASTM A572 Grau 50), podemos demonstrar que as soluções escolhidas que foram consideradas as mais adequadas em relação as cargas solicitantes, são os casos A-02, B-02, A-07 e B-07. Sendo assim, foram utilizados estes casos para otimizar os perfis anteriormente empregados, que

inicialmente eram perfil W 310x97, não alterando os materiais (COR 500 e ASTM A572 Grau 50) propostos em cada caso analisado.

Para o caso A-02, foi verificado o cálculo e otimizado o dimensionamento dos perfis W de abas paralelas, em relação ao caso inicial, que foi utilizado perfis W 310x97.

No caso A-02 podemos verificar que os pilares foram alterados para o perfil W 200x35.9 e as vigas para W 310x79. Para todos os pilares foram considerados os mesmos perfis assim como para as vigas, por questões de fabricação e orçamento dos perfis. Neste caso o pilar mais solicitado é o B4 com 70% e a viga B3 com 66%. No contraventamento B1 a solicitação ficou com 36% e o perfil foi alterado para W 150x13.

Figura 27 - Verificação do cálculo caso A-02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

O quadro 5 mostra o peso total da estrutura e também de cada elemento estrutural recalculado, mantendo os cálculos conforme a norma NBR 8800:2008. Podemos verificar que houve uma diferença no peso total da estrutura em relação ao caso inicial A-02 (quadro 2), de 2.733,90 kg para 1.368,40 kg, havendo uma redução de 1.365,50 kg. Esta lista de materiais é para o aço COR 500 e ASTM A572, pois no cálculo estrutural houve pouca diferença, permanecendo os mesmos perfis calculados.

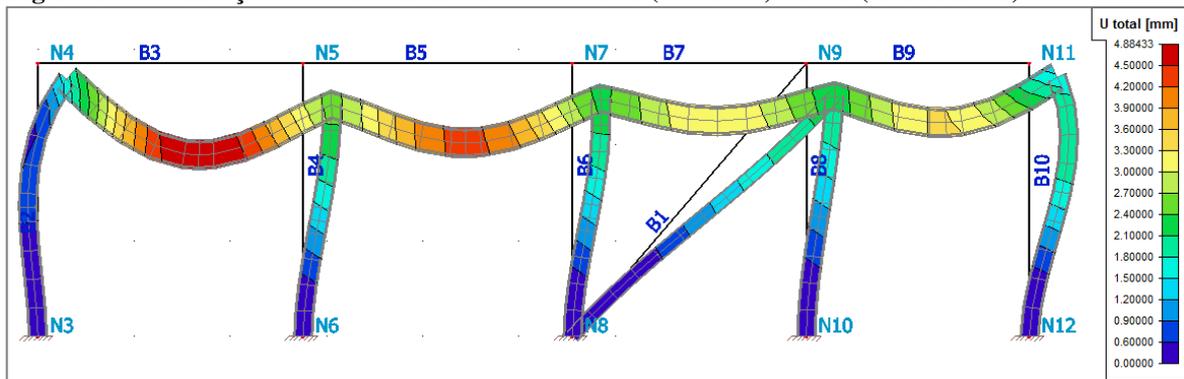
Quadro 5 - Lista de materiais para os casos A-02 (COR 500) e B-02 (ASTM A572)

Perfil	Elemento	Massa unitária [kg/m]	Comprimento [mm]	Massa [kg]
W200X35.9	Pilar	78,5	10307,000	809,1
W310X79	Viga	35,9	14260,000	511,6
W150X13	Contraventamento	12,7	3747,490	47,7
Total massa [kg]				1.368,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

Podemos observar também o deslocamento em milímetros para cada elemento na figura 28. A viga representada pelo elemento B3 se deslocou 4,8 mm, o que significa a pior situação deste caso, porém, ainda assim passa no cálculo. Já o pilar B4 está com 3 mm de deslocamento. Nesta verificação de deslocamento permaneceram os mesmos perfis calculados, tanto para o aço COR 500 quanto para o ASTM A572, que no cálculo não apresentavam diferenças entre perfis.

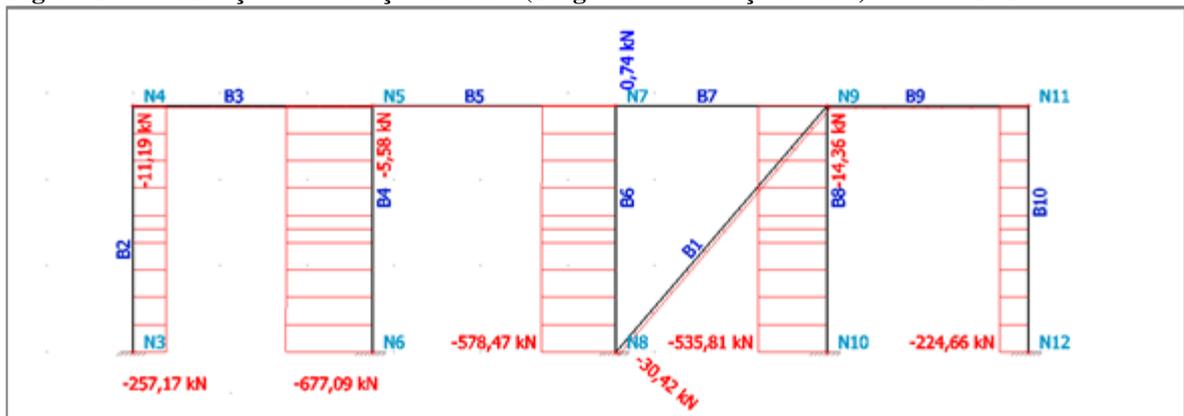
Figura 28 - Verificação do deslocamento nos casos A-02 (COR 500) e B-02 (ASTM A572)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

A figura 29 (caso A-02) representa a verificação dos esforços internos para o diagrama de esforço normal, onde podemos verificar que o pilar mais solicitado é o elemento B4 com 677,09 kN.

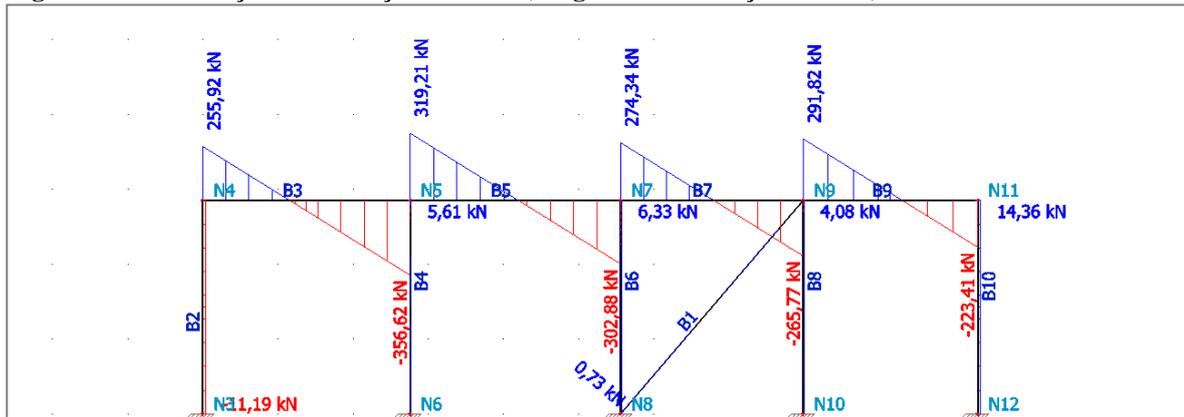
Figura 29 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de esforço normal) do caso A-02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

A figura 30 (caso A-02) representa a verificação dos esforços internos para o diagrama de esforço cortante, onde podemos verificar que a maior cortante se dá na viga B3 com 356,62 kN.

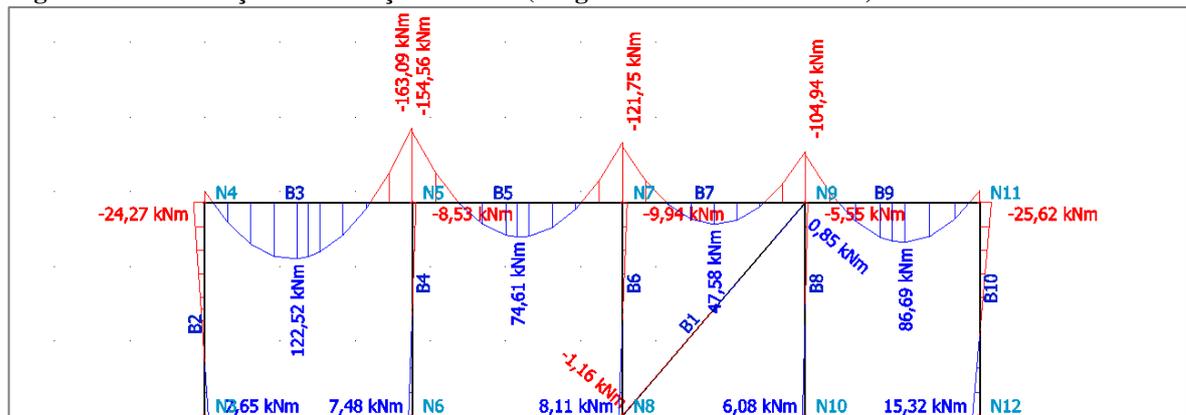
Figura 30 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de esforço cortante) do caso A-02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

A figura 31 (caso A-02) representa a verificação dos esforços internos para o diagrama de momentos fletor, onde podemos verificar que o maior momento se dá na viga B3 com 122,52 kN.m.

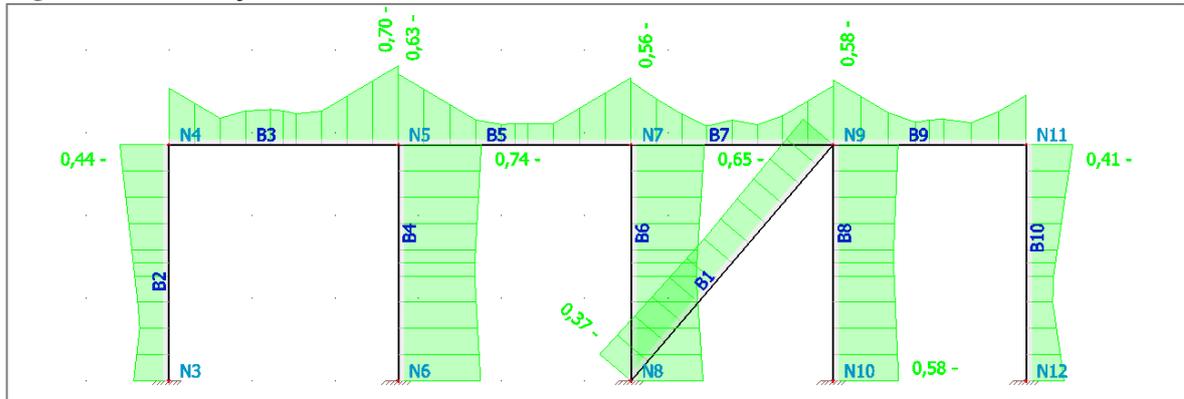
Figura 31 - Verificação dos esforços internos (Diagrama de momento fletor) do caso A-02



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso B-02 podemos verificar que os pilares foram alterados para o perfil W 200x35.9 e as vigas para W 310x79. Para todos os pilares foram considerados os mesmos perfis assim como para as vigas, por questões de fabricação e orçamento dos perfis. Neste caso o pilar mais solicitado é o B4 com 74% e a viga B3 com 70%. No contraventamento B1 a solicitação ficou com 37% e o perfil foi alterado para W 150x13.

Figura 32 - Verificação do cálculo caso B-02

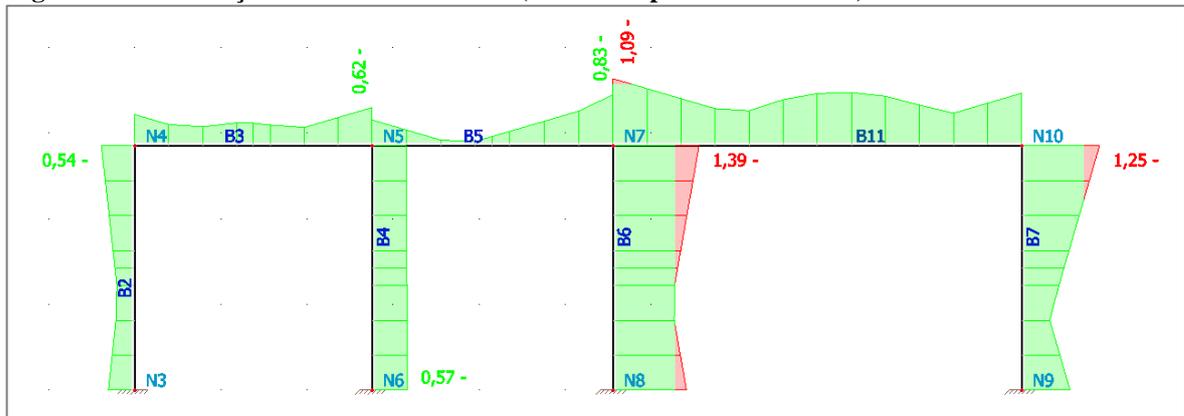


Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

O quadro 5 apresentado anteriormente, mostra o peso total da estrutura para o caso B-02 e também de cada elemento estrutural recalculado, mantendo os cálculos conforme a norma NBR 8800:2008. Esta lista de materiais é para o aço COR 500 e ASTM A572, pois no cálculo estrutural houve pouca diferença, permanecendo os mesmos perfis calculados.

A figura 33 mostra quando a solicitação do cálculo ultrapassa o limite permitido pela norma NBR 8800:2008, representado em vermelho, para o pilar B6 com 139% e 125% para o pilar B7. No elemento B11 (viga) atingiu 109%. Isto quer dizer que o perfil não atende a premissa do cálculo estrutural, neste caso específico. Este caso A-07 mostra também o cálculo aproveitando os perfis do caso anterior (B-02), retirando somente um pilar entre os elementos B6 e B7 e um contraventamento.

Figura 33 - Verificação do cálculo caso A-07 (Perfis não passam no cálculo)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

O quadro 6 apresenta os mesmos perfis para pilares e vigas utilizados no caso anterior (B-02). Este quadro refere-se ao caso A-07, onde os perfis não atende as premissas do cálculo estrutural.

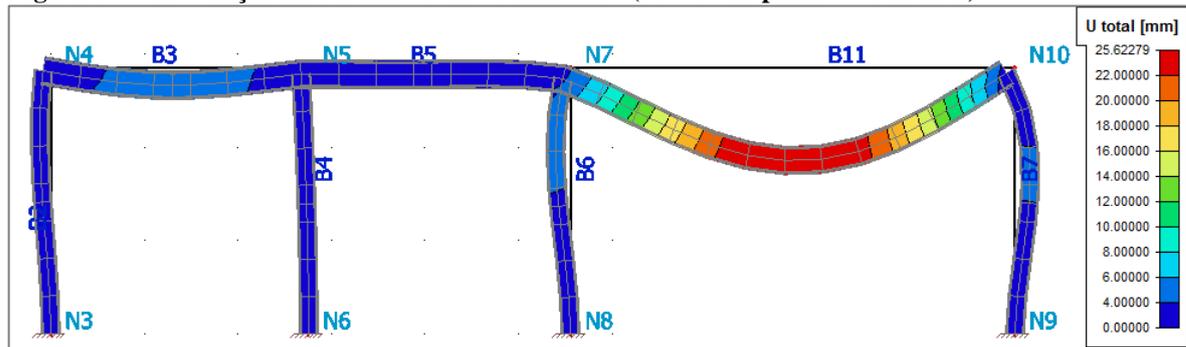
Quadro 6 - Lista de materiais para o caso A-07 (Perfis não passam no cálculo)

Perfil	Elemento	Material	Massa unitária [kg/m]	Comprimento [mm]	Massa [kg]
W310X79	Viga	AÇO COR 500	78,5	10307,000	809,1
W200X35.9	Pilar	AÇO COR 500	35,9	11408,000	409,3
Total massa [kg]					1.218,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

Ainda se observa que o deslocamento em milímetros para o elemento B11 (viga), aumenta consideravelmente, com deslocamento de 25,6 mm, conforme a figura 34. O que significa que este caso não passa no cálculo.

Figura 34 - Verificação do deslocamento no caso A-07 (Perfis não passam no cálculo)

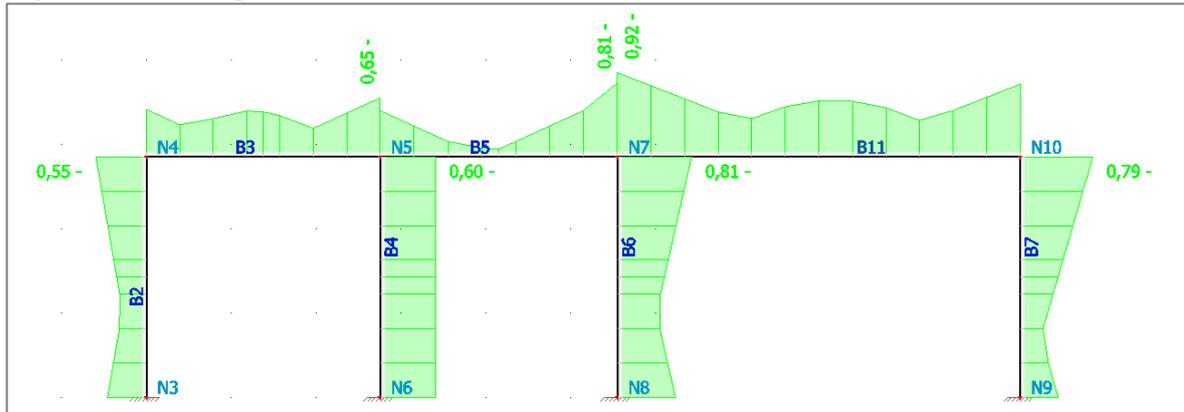


Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

Para o caso A-07, foi verificado o cálculo e otimizado o dimensionamento dos perfis W de abas paralelas, em relação ao caso inicial, que foi utilizado perfis W 310x97.

No caso A-07 podemos verificar que os pilares foram alterados. O elemento B2 e B4 foram alterados para o perfil W 200x35.9. Já os pilares B6 e B7, assim como as vigas B3 e B5 foram alteradas para o perfil W 310x67. Somente a viga B11 foi recalculada para W 310x97. Para a estrutura como um todo, pilares e vigas, foram considerados perfis similares afim de otimizar os processos de fabricação e orçamento dos perfis. Neste caso o pilar mais solicitado é o B6 com 81% e a viga B11 com 92%. Neste caso não há contraventamento.

Figura 35 - Verificação do cálculo caso A-07



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

O quadro 7 mostra o peso total da estrutura e também de cada elemento estrutural recalculado, mantendo os cálculos conforme a norma NBR 8800:2008. Podemos verificar que houve uma diferença no peso total da estrutura em relação ao caso inicial A-07 (quadro 2), de 2.096,70 kg para 1.411,90 kg, havendo uma redução de 684,80 kg. Esta lista de materiais é para o aço COR 500 e ASTM A572, pois no cálculo estrutural houve pouca diferença, permanecendo os mesmos perfis calculados.

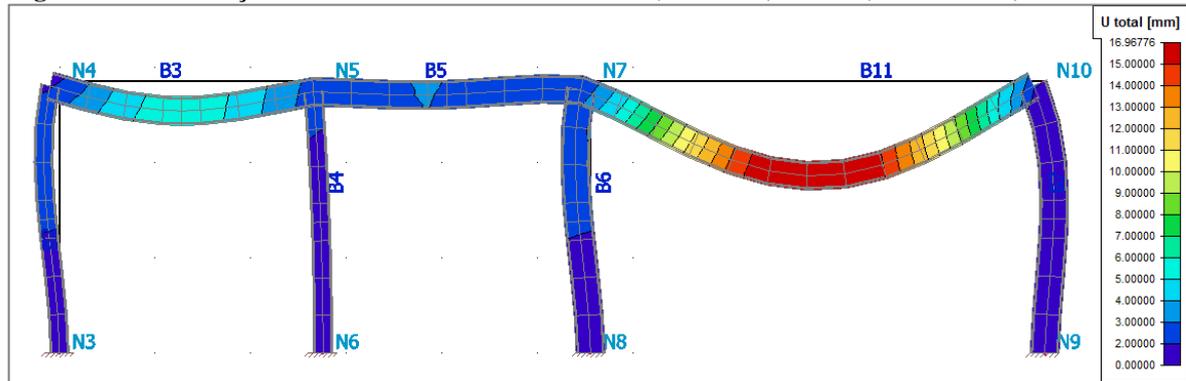
Quadro 7 - Lista de materiais para os casos A-07 (COR 500) e B-07 (ASTM A572)

Perfil	Elemento	Massa unitária [kg/m]	Comprimento [mm]	Massa [kg]
W310X97	Viga B11	96,6	4750,000	458,6
W310X67	Vigas B3, B5 e Pilares B6, B7	66,5	11261,001	748,7
W200X35.9	Pilares B2 e B4	35,9	5704,000	204,6
Total massa [kg]				1.411,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

Podemos observar também o deslocamento em milímetros para cada elemento na figura 36. A viga representada pelo elemento B11 se deslocou 16,9 mm, o que significa a pior situação deste caso, porém, ainda assim passa no cálculo. Já o pilar B6 está com 3 mm de deslocamento. Nesta verificação de deslocamento permaneceram os mesmos perfis calculados, tanto para o aço COR 500 quanto para o ASTM A572, que no cálculo não apresentavam diferenças entre perfis.

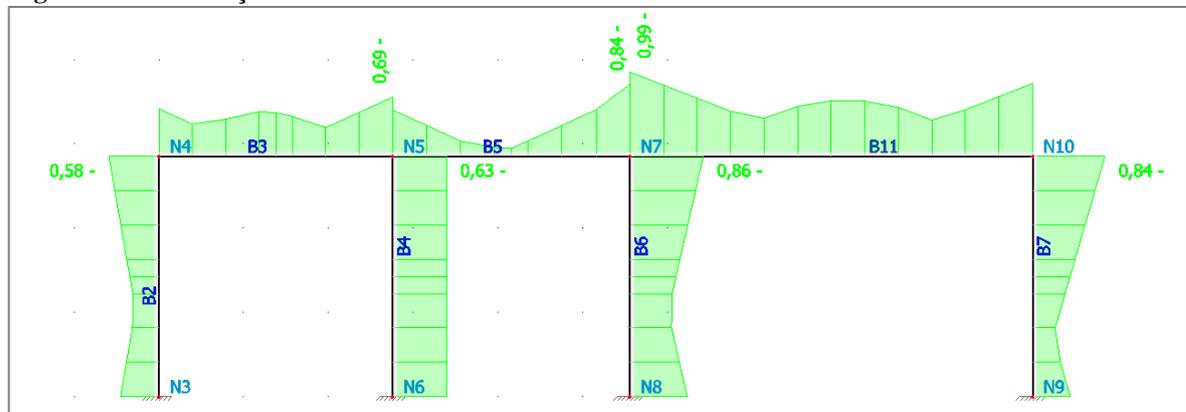
Figura 36 - Verificação do deslocamento nos casos A-07 (COR 500) e B-07 (ASTM A572)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

No caso B-07 podemos verificar que os pilares foram alterados. O elemento B2 e B4 foram alterados para o perfil W 200x35.9. Já os pilares B6 e B7, assim como as vigas B3 e B5 foram alteradas para o perfil W 310x67. Somente a viga B11 foi recalculada para W 310x97. Para a estrutura como um todo, pilares e vigas, foram considerados perfis similares afim de otimizar os processos de fabricação e orçamento dos perfis. Neste caso o pilar mais solicitado é o B6 com 86% e a viga B11 com 99%. Neste caso não há contraventamento.

Figura 37 - Verificação do cálculo caso B-07



Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software SCIA Engineer*.

O quadro 7 apresentado anteriormente, mostra o peso total da estrutura para o caso B-07 e também de cada elemento estrutural recalculado, mantendo os cálculos conforme a norma NBR 8800:2008. Esta lista de materiais é para o aço COR 500 e ASTM A572, pois no cálculo estrutural houve pouca diferença, permanecendo os mesmos perfis calculados.

4.7 ORÇAMENTO DE PERFIS

O perfil COR 500 além do preço ser maior por quilo é mais difícil de encontrar, pois é produzido sob encomenda de no mínimo sessenta toneladas para cada tipo de perfil laminado, isto se deve ao processo de produção do aço laminado. Já o aço ASTM A572 é o aço mais produzido e mais utilizado, com produção em larga escala no Brasil. Os perfis laminados de abas paralelas (nomenclatura W) são produzidos na usina da Gerdau, localizada em Ouro Branco, Minas Gerais, porém a sua compra é feita através das representações comerciais da Gerdau, encontrada na grande maioria dos estados do Brasil. Os preços utilizados no quadro 8, foram informados através da Comercial Gerdau de Joinville em Santa Catarina.

No quadro 8 está representado os valores totais para cada caso estudado no capítulo 4.6. Podemos observar que o material COR 500 custa R\$ 4,20 por quilo e o ASTM A572 Grau 50 custa R\$ 3,50 por quilo.

Quadro 8 - Orçamento dos perfis para cada material

Casos	Material	Total Massa [kg]	Preço [R\$/kg]	Preço total [R\$]
A-02	COR 500	1.368,40	4,20	5.747,28
B-02	A572 grau 50	1.368,40	3,50	4.789,40
A-07	COR 500	1.411,90	4,20	5.929,98
B-07	A572 grau 50	1.411,90	3,50	4.941,65

Fonte: Elaborado pelo autor (2017), através do *software* Microsoft Excel.

Nos pórticos mencionados nestes quatro estudos podemos verificar que o caso mais viável financeiramente para o projeto em questão é o caso B-02, com o preço total de R\$ 4.789,40, seguido do caso B-07 que ficou com o preço total de R\$ 4.941,65 ambos com o material ASTM A572 grau 50. Já os perfis que foram utilizados o material COR 500, casos A-02 e A-07, chegaram ao preço total respectivamente de R\$ 5.747,28 e R\$ 5.929,98, sendo o caso A-07 com o preço mais elevado.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo geral analisar a estrutura de um pórtico em aço através da utilização do *software SCIA Engineer* e verificar as ações do carregamento de uma caldeira afim de dimensionar os perfis estruturais, conforme a NBR 8800:2008, assim como o melhor material a ser utilizado, o comportamento da estrutura e o custo dos perfis para obtenção dos resultados finais.

Conclui-se que para o caso A-02 com o material COR 500 que possui limite de escoamento igual a 370 MPa, o pilar mais solicitado foi o B4 com 70%, já no caso B-02 com o material ASTM A572 Grau 50 que possui limite de escoamento igual a 345 MPa, o pilar mais solicitado foi o B4 com 74%. Neste caso houve uma pequena diferença nas solicitações, devido a diferença do limite de escoamento entre os dois materiais. Comparando o preço total dos perfis empregados nos pórticos dos casos A-02 e B-02, respectivamente totalizaram o valor de R\$ 5.747,28 e R\$ 4.789,40, chegando a uma diferença R\$ 957,88 no valor final entre os casos.

Para o caso B-02 com o material ASTM A572 Grau 50 que possui limite de escoamento igual a 345 MPa, a viga mais solicitada foi a B3 com 70%, já no caso B-07 também com o mesmo material, a viga mais solicitada foi a B11 com 99%. Neste caso houve uma grande diferença nas solicitações devido ao aumento do vão no caso B-07, com a retirada de um pilar. Comparando o preço total dos perfis empregados nos pórticos dos casos B-02 e B-07, respectivamente totalizaram o valor de R\$ 4.789,40 e R\$ 4.941,65, chegando a uma diferença R\$ 152,25 no valor final entre os casos.

Comparando os deslocamentos entre as configurações dos pórticos, casos A-02 e B-02 chegaram a um deslocamento máximo de 4,88 mm, já os casos A-07 e B-07, chegaram a um deslocamento máximo de 16,96 mm, porém ainda assim os mesmos resistiram aos esforços solicitados no cálculo.

Dentre os quatro pórticos calculados, foi comparado o preço final de cada pórtico. Sendo que no caso A-02 o preço total foi de R\$ 5.747,28, seguido do caso A-07 que ficou com o preço total de R\$ 5.929,98, ambos com o material COR 500, onde no caso A-07 obteve-se o preço mais elevado. Já os perfis que foram utilizados o material ASTM A572 grau 50, os casos B-02 e B-07, chegaram ao preço total respectivamente de R\$ 4.789,40 e R\$ 4.941,65, neste caso conclui-se que o caso mais viável financeiramente para o projeto em questão foi o caso B-02.

Foi concluído com este estudo que a melhor base metálica de suporte para a caldeira em questão foi o caso B-02, devido ao peso total da estrutura e seu preço final, apesar do aço ASTM A572 Grau 50 ser menos resistente que o COR 500.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se analisar solicitações em estruturas base para caldeiras comparando soluções em aço, concreto armado e ou estruturas pré-fabricadas. Comparando ainda materiais, seções, solicitações e orçamentos para os mesmos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Maria Cascão Ferreira de. **Estruturas isostáticas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

AMARAL, Caio. O novo Engenheiro: A estrutura porticada. Disponível em: <http://onovoengenheiro.blogspot.com.br/2014/03/a-estrutura-porticada-portico.html> Acesso em: 30 de maio de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008**. Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de Edifícios. Rio de Janeiro: 2008.

BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

BORGES, Rone Sergio; GOMES, Orlando Ferreira. **Análise experimental da resistência a flexão simples de vigas de aço tipo “I” compostas de perfis laminados dotadas de emendas soldadas**. Goiânia, 2015. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/37718/pdf>. Acesso em: 11 de jun. 2017.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 1.ed. São Paulo: Ziguarte Editora, 1997.

FÁVERI, Helena Justen de; BLOGOSLAWSKI, Ilson Paulo Ramos; FACHINI, Olímpio. **Educar para a pesquisa: normas para a produção de textos científicos**. 3. ed. Rio do Sul: UNIDAVI, 2009.

FERAZALVAREZ. **Fluxo simplificado de produção**. Disponível em: <http://feralvarez.com.br/25/> Acesso em: 29 de maio de 2017.

GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf. **Noções de orçamento e planejamento de obras**. São Leopoldo: UNISINOS, 2008. 49 f. Notas de aula.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ICAVI. **Caldeiras Aquatubulares**. Disponível em: <http://www.icavi.ind.br/produtos/caldeiras/> Acesso em: 16 de jun. 2017.

KRIPKA, Moacir. **Análise estrutural para engenharia civil e arquitetura: estruturas isostáticas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2011.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

MACHADO JUNIOR, Eloy Ferraz. **Introdução a isostática**. 3. ed. São Carlos: EESC/USP, 1999.

MARGARIDO, Aluizio Fontana. **Fundamentos de estruturas**: um programa para arquitetos e engenheiros que se iniciam no estudo das estruturas. 6. ed. São Paulo: Ziguarte Editora, 2001.

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras**: dicas para orçamentistas, estudos de casos, exemplos. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 2006.

MOURÃO, M. B., & GENTILE, E.. **Histórico dos processos de obtenção de ferro e aço**. Introdução à Siderurgia. São Paulo: ABM, 2007.

PEREIRA, Ronivon Soares. **Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3997> . Acesso em: 11 de jun. 2017.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas metálicas**: cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

RAYAPROLU, Kumar. **Boilers for Power and Process**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SANTOS, A. F. **Estruturas metálicas**: projeto e detalhes para fabricação. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

SILVA, Valdir Pignatta; PANNONI, Fabio Domingos. **Estruturas de aço para edifícios**: aspectos tecnológicos e de concepção. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

TECEM – Tecnologia Empresarial. **Perfis de aço formatos I e H**. Disponível em: <http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2013/03/AB22-perfis-de-aco-forma-tosi-e-h-tecem.pdf> Acesso em: 11 de jun. 2017.