



FAEX – FACULDADE DE EXTREMA

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO HENRIQUE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ESTRUTURA METÁLICA OU
EM CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL**

Extrema

2018

PAULO HENRIQUE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ESTRUTURA METÁLICA OU
EM CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema -
FAEX, como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof.^a Ma. Renata Martinho de Camargo.

Extrema

2018

PAULO HENRIQUE SANTOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ESTRUTURA METÁLICA OU
EM CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema -
FAEX, como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof.^a Ma. Renata Martinho de Camargo.

Aprovado em: / /

Prof.^a Ma. Renata Martinho de Camargo

Prof. Me. Carlos Eduardo Finamor

Prof. Renan Luiz Mariano

Este trabalho é dedicado...

A Deus, pelo dom da vida e pela força que me concedeu nesta caminhada.

À minha mãe Maria, que sempre me incentivou e apoiou.

À minha amada esposa Tamires, pelo carinho e por compreender minha ausência.

A mim mesmo, pela garra e perseverança.

Aos meus amigos e colegas que sempre me entusiasmaram a prosseguir com os estudos.

AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom da vida.

À Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema – FAEX.

À Prof.^a Renata Martinho de Camargo, pelo acompanhamento pontual e competente no decorrer do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao Prof. Marcelo Henrique Hermógenes, pela atenção a mim dedicada.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

“Faze uma arca de tábuas de cipreste; nela farás compartimentos e a calafetarás com betume por dentro e por fora”.

(Gênesis 6:14)

RESUMO

O presente trabalho visou elaborar um comparativo entre estrutura metálica e estrutura em concreto armado convencional a fim de verificar as respectivas vantagens possibilitadas por ambas alternativas para, a partir disso, ser possível eleger a melhor opção no campo de utilização. Discorreu-se acerca da possibilidade e da importância da utilização de sistemas computacionais destinados à engenharia de construção, no momento contemporâneo, como: o *software Cypecad*, para a elaboração de projetos em estruturas metálicas ou mistas e o *software Eberick*, para a elaboração de projetos com estrutura em concreto armado convencional. Concluiu-se que para ser possível escolher entre uma ou outra alternativa é necessário realizar análises bem detalhadas e definidas que considerem todas as variáveis envolvidas e não somente aquelas relacionadas ao melhor custo benefício. Além disso, evidenciou-se o quanto é imprescindível e obrigatório seguir as normas que regulam os respectivos sistemas construtivos para garantir a segurança da obra ao longo de sua construção e de toda a sua vida útil.

Palavras-chave: Sistemas construtivos. Viga metálica. Viga de concreto armado.

ABSTRACT

The present work aimed at compiling a comparison between metallic structure and structure in conventional reinforced concrete in order to verify the respective advantages made possible by both alternatives, so that it is possible to choose the best option in the field of use. We discussed the possibility and importance of the use of computational systems for contemporary construction engineering, such as Cypcad software for the elaboration of projects in metallic or mixed structures and Eberick software for the elaboration of projects with structure in conventional reinforced concrete. It was concluded that to be able to choose between one alternative or another, it is necessary to carry out very detailed and defined analyzes that consider all the variables involved and not only those related to the best cost benefit. In addition, it was evident how essential and obligatory to follow the norms that regulate the respective construction systems to guarantee the safety of the work throughout its construction and of its entire useful life.

Key-words: Construction systems. Metal beam. Reinforced concrete beam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de elementos estruturais de aço	25
Figura 2: Comparação entre pilares de aço e de concreto armado (dimensões em mm)	26
Figura 3: Exemplos de ensaios de tração em corpos de prova de aço estrutural	27
Figura 4: Canteiro de obras de uma edificação com estrutura de aço	27
Figura 5: Ilustração de reforço e ampliação	28
Figura 6: Exemplos de corrosão de grande intensidade	29
Figura 7: Pintura e galvanização	30
Figura 8: Reduções de resistência e rigidez do aço com a elevação da temperatura	30
Figura 9: Colapso de treliças de uma cobertura causado por incêndio	30
Figura 10: Evolução do concreto	32
Figura 11: Evolução da norma brasileira do concreto.....	33
Figura 12: Estrutura metálica utilizada para execução de um prédio	38
Figura 13: Vão livre do Masp, projetado para proporcionar vista ao Vale do Anhangabaú (Thiago Leite/shutterstock.com).....	38
Figura 14: Comportamento da seção transversal de uma viga de concreto armado na flexão normal simples.....	42
Figura 15: Diagrama de tensões no concreto no estado limite último para concretos até a classe C50	43
Figura 16: Ensaio para obtenção da resistência à tração por compressão diametral (tração indireta).....	43
Figura 17: Diagramas de tensões no concreto no estado limite último para concretos de classes C50 a C90	44
Figura 18: Distribuição de probabilidade da variável M (margem de segurança), igual à diferença entre a resistência R e a solicitação S	46
Figura 19: Tensões normais de flexão e plastificação progressiva da seção	47
Figura 20: Comparação entre vigas de aço e de concreto armado (dimensões em mm)	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Cronologia da evolução científica e tecnológica de materiais estruturais	24
Quadro 2: Valores-limites de w_k	29
Quadro 3: Consumos estimados de aço	31
Quadro 4: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	34
Quadro 5: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das Classes de Agressividade Ambiental.....	36
Quadro 6: Correspondência entre a Classe de Agressividade Ambiental e o cobrimento nominal para Δc 10 mm.....	36
Quadro 7: Método hipotético para a escolha do sistema estrutural mais adequado	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção Siderúrgica Brasileira - (*) Dados preliminares.....	25
--	----

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

°C	- grau Celsius
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	- antes de Cristo
<i>b</i>	- ndice de confiabilidade
BIM	- Building Information Model
CAA	- Classes de Agressividade Ambiental
CAD	- Computer-Aided Design
cm ²	- centímetro quadrado
CMN	- Conselho Monetário Nacional
CNI	- Confederação Nacional da Indústria
ϵ_{c2}	- deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico
ϵ_{cu}	- deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura
ELS	- Estados-limites de serviço
ELU	- Estados-limites últimos
FGV	- Fundação Getulio Vargas
f_{cd}	- resistência de cálculo do concreto
f_{ck}	- resistência característica do concreto
<i>f_i</i>	- combinação de ações
f_k	- função da resistência característica do material
f_{tk}	- resistência característica do concreto  tração
IABr	- Instituto Aço Brasil
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCC-M	- ndice Nacional de Custo da Construção - Mercado
IPCA	- ndice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ISO	- International Organization for Standardization
Kg	- quilograma
Kg/m ²	- quilograma por metro quadrado
kN	- kilo Newton

LN	- linha neutra
m	- metro
M	- Momento fletor
m ²	- metro quadrado
Masp	- Museu de arte de São Paulo Assis Chateaubriand
mm	- milímetro
Mm	- valor médio
MPa	- Mega Pascal - unidade de medida
M _u	- valor próximo ao de ruína
NBR	- Norma Brasileira aprovada pela ABNT
PIB	- Produto Interno Bruto
R	- resistência
R\$	- Real
R _d	- valores de cálculo dos esforços resistentes
R _k	- tensão resistente nominal ou esforço para o ELU considerado
S	- solicitação
S _d	- valores de cálculo dos esforços solicitantes
SGQ	- Sistema de Gestão da Qualidade
SINAPI	- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
t/m ³	- tonelada por metro cúbico
W _k	- Abertura máxima características das fissuras
γ	- coeficiente de ponderação da resistência
γ _c	- coeficiente de minoração da resistência do concreto
γ _{fi}	- coeficiente de majoração das ações Fi
γ _m	- coeficiente de redução da resistência interna
σ _M	- desvio padrão de M

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivos Específicos	15
2	METODOLOGIA	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	A construção civil no contexto atual	17
3.2	A engenharia civil e os <i>softwares</i> computacionais	18
3.2.1	O <i>software Cypecad</i>	19
3.2.2	O <i>software Eberick</i>	20
3.3	Projetos de Estruturas Metálicas	22
3.3.1	Resgate histórico acerca da descoberta e da evolução do aço	22
3.3.2	Elementos estruturais de aço	25
3.3.3	Vantagens da utilização do aço como elemento estrutural	26
3.3.4	Desvantagens da utilização do aço como elemento estrutural	29
3.3.5	Noções acerca do consumo de aço estrutural	31
3.4	Projetos de Estruturas em concreto armado	32
3.4.1	Resgate histórico acerca da utilização do concreto armado	32
3.4.2	Elementos estruturais em concreto armado	33
3.4.3	Vantagens da utilização do concreto armado como elemento estrutural	34
3.4.4	Desvantagens da utilização do concreto armado como elemento estrutural	35
3.4.5	Outros comparativos entre concreto armado e estrutura metálica	37
3.5	Dimensionamento de uma estrutura	39
3.5.1	Vigas	39
3.5.1.1	Vigas de concreto armado	40
3.5.1.2	Vigas metálicas	44
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas metálicas revolucionou a engenharia civil no século XVIII, dando um grande passo para o desenvolvimento de alternativas eficientes face às exigências da arquitetura moderna. A prova disto é que engenheiros precisam cada vez mais de estruturas que sejam capazes de suportar grandes carregamentos, vencer grandes vãos livres aprimorando o espaço livre de sua construção, considerar a sustentabilidade da estrutura e buscar obter o melhor custo benefício do empreendimento.

Com a nova concepção das vantagens das estruturas de aço, como maior resistência, menor peso da estrutura, capacidade de suportar maiores vãos, perfis estruturais mais esbeltos e maior área útil, esse sistema construtivo está se tornando bastante utilizado, pois elimina limitações intrínsecas de outros métodos construtivos e possibilita a elaboração de projetos mais ousados e inovadores viabilizados pela liberdade de criação e de execução.

Apesar de todas as vantagens da estrutura metálica, o uso do concreto armado predomina no Brasil, pois a mão de obra para esse tipo de sistema construtivo tradicional é mais abundante e financeiramente mais barata, além de o custo da estrutura de concreto armado também ser mais em conta do que a do aço.

Contudo, o custo é apenas um dos parâmetros que compõem o orçamento total de uma obra. Dependendo da sua finalidade e urgência, o prazo é outra referência importante. Desse modo, há vários fatores que devem ser comparados para a escolha do sistema construtivo mais adequado a cada caso. Ademais, as empresas procuram, cada vez mais, um custo-benefício preciso que é delimitado por diversos fatores como custos dos materiais, da mão de obra e o tempo de execução que são únicos para cada obra e tornam essencial o estudo da escolha do tipo de estrutura e do método construtivo.

Diante disso, propõe-se traçar nesse trabalho um comparativo entre as vantagens e desvantagens da utilização do concreto armado ou da estrutura metálica para obter maior conhecimento acerca da aplicabilidade das estruturas de aço que, cada vez mais, mostra-se necessária no segmento da construção civil moderna.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento deste trabalho justifica-se pela alta relevância de se realizar correta análise técnica e econômica que possibilite conhecer a melhor opção de custo-benefício para

embasar a tomada de decisão relacionada à utilização de vigas em concreto armado ou em estrutura metálica, pois atualmente a utilização dessas tem crescido sensivelmente.

Além disto, julga-se que é necessário ao engenheiro civil reconhecer o atual contexto socioeconômico originado a partir da crise instaurada em 2015 que vem continuamente ocasionando inúmeros impactos negativos a todos os segmentos: sociais, industriais, comerciais e de modo muito severo à construção civil, pois esta crise que lapidou a população tornou os consumidores mais exigentes e muito mais atentos à questão financeira.

Assim, entende-se que é vital ao engenheiro civil manter-se em constante busca de conhecimentos intrínsecos à sua área de atuação para que possa projetar e executar obras dentro do menor prazo possível e visando ao melhor custo-benefício, pois estas variáveis afetam diretamente o custo total da obra, contudo, devendo manter-se extremamente atento aos critérios de segurança e de qualidade.

Simultaneamente, acredita-se que é importante conhecer como a utilização de programas computacionais podem contribuir para o alcance desses objetivos e auxiliar na condução dos projetos da construção civil para o atingimento do sucesso desejado, assim como é relevante aprofundar o conhecimento acerca das normas que regulam o assunto.

1.2 Objetivos

Objetiva-se com este trabalho realizar um estudo comparativo que permita analisar as vantagens e as desvantagens entre a aplicação do elemento estrutural viga em concreto armado ou em estrutura metálica para aprofundar o conhecimento global acerca do tema.

1.2.1 Objetivos Específicos

Comparar e analisar as vantagens e as desvantagens oriundas da utilização de vigas metálicas e em concreto armado, considerando os critérios técnico, financeiro, prazo de execução e padrões estabelecidos pelas respectivas normas vigentes da ABNT NBR.

2 METODOLOGIA

Classifica-se este trabalho, quanto à finalidade, conforme Fontenelle (2017), como pesquisa aplicada, pois, através dele, busca-se incrementar o conhecimento sobre um assunto específico e delimitado.

Para fundamentá-lo, realizou-se pesquisa de revisão bibliográfica em livros e em normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de modo a possibilitar a execução de uma pesquisa descritiva a fim de retratar os aspectos do objeto estudado, estabelecer as relações entre as variáveis delimitadas, interpretá-las e analisá-las o mais precisamente possível.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A construção civil no contexto atual

A matéria publica pela revista Exame, intitulada Construção civil vive crise sem precedentes no Brasil, é aberta com o seguinte parágrafo: “Cerca de 600.000 demissões em 12 meses. Recuo de 5,6% nas vendas em 2014. Queda de 98% do lucro para as empresas abertas no primeiro trimestre. Perda de 12 bilhões de reais de valor de mercado na bolsa nos últimos 12 meses” (AMORIM, 16 jul. 2015). Em seu conteúdo afirmou-se que todos os executivos e especialistas ouvidos para a composição desta matéria, por unanimidade, garantiram que a recuperação desta crise pelo segmento da construção civil iniciaria somente a partir de 2017 (AMORIM, 16 jul. 2015).

A mesma revista, em outra matéria relatou que “O setor da construção civil no Brasil vem passando por dificuldades, pelo menos, nos últimos quatro anos, amargando 27 quedas consecutivas no mercado. O cenário de crise no país fez com que o segmento se visse obrigado a reduzir custos e melhorar a sua rentabilidade” (EXAME, 15 mar. 2018).

Nogueira (2018) noticiou que devido à crise no setor da construção civil ao final do primeiro trimestre de 2018 registrou-se a 16ª queda seguida do Produto Interno Bruto (PIB) desta área, cujo resultado representou o pior desempenho econômico do ano. Ao compará-lo com o mesmo período de 2017 contabilizou-se “[...] queda de 2,2%, colocando em cheque assim a esperança de melhora no cenário atual diante da visão das empresas” (NOGUEIRA, 14 jun. 2018).

Conforme matéria da revista PEGN o Índice Nacional da Construção Civil extraído do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAP), calculado e divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apontou que em julho/2018 os materiais de construção sofreram a maior inflação deste ano (0,88%) elevando o custo do m² a R\$ 563,69. Além disto, o custo da mão de obra desde junho/2018 custava R\$ 531,40 o m² (PEGN, 08 ago. 2018).

O reconhecido boletim de mercado **relatório Focus**, publicado pelo Banco Central em 13 de agosto de 2018 divulgou o resultado de pesquisa realizada na semana de 13 a 17 de agosto de 2018 que envolveu mais de cem instituições, onde os economistas especialistas em mercado financeiro “[...] elevaram de 4,11% para 4,15% sua previsão para o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) desse ano” (MARTELLO, 2018). Apesar desta elevação,

afirmam que a expectativa do mercado está dentro do esperado para uma meta de inflação fixada para 2018 em 4,5% pelo Conselho Monetário Nacional (CMN).

A revista PEGN afirma que o setor da construção civil fechou o mês de junho/2018 com o seu indicador de atividade, medido pela Sondagem da Indústria da Construção da Confederação Nacional da Indústria (CNI), fixado em 46,7 pontos que, apesar de ter sido maior que o de maio, 44,4 pontos, ainda está abaixo da linha divisória de 50 pontos. Isto indica uma enorme ociosidade dos recursos, como: humanos, máquinas, equipamentos, etc.

Comparando este índice com o do mesmo mês de 2017, 42,8 pontos, é possível observar ligeira recuperação no setor (PEGN, 2018a, 27 ago. 2018). Além disso, a mesma edição publicou que o Índice Nacional de Custo da Construção - Mercado (INCC-M) divulgado em 27/08/2018 pela Fundação Getulio Vargas (FGV) demonstrou alta de 0,30% para o mês de agosto/2018 em relação ao mês anterior, porém, apresentou desaceleração, pois o acréscimo registrado em julho/2018 foi de 0,72%.

3.2 A engenharia civil e os *softwares* computacionais

Budhu (2017) afirma que, hoje, vive-se um momento onde quanto maior é a demanda social relacionada às necessidades habitacionais, ambientais, de transportes, industriais e comerciais ou à escassez de espaços livres nos centros urbanos, para novas construções, maiores são os desafios impostos à engenharia civil. Assim, compete ao engenheiro preparar-se para enfrentar e vencer estes desafios e, para isto, o profissional deve:

- a) Manter-se atualizado para melhor compreender e dominar os fundamentos;
- b) Fazer uso de modernas tecnologias e equipamentos de ensaios e simulações numéricas;
- c) Conservar-se conhecedor do contexto sócio-político econômico e ambiental, bem como de tudo aquilo que for pertinente ao meio que envolve a engenharia civil;
- d) Acumular experiências.

Entende-se a partir de Budhu (2017) que, hoje, a engenharia civil muito pode se beneficiar com a alta tecnologia, inclusive, com a computacional em cujo mercado é possível encontrar fácil e acessivelmente modernos programas de computador destinados a inúmeras aplicações para a solução de uma multiplicidade de problemas, entre eles, aqueles pertinentes à elevação da eficiência ou à economia de recursos, bem como àqueles relacionados à análise dos problemas mais complexos e diversificados.

Ressalta-se que para Budhu (2017) o fácil acesso a estes *softwares* tem permitido

engenheiros recém-formados e/ou inexperientes utilizá-los de modo irresponsável, desconhecendo a base elementar destes modelos ou sua real aplicabilidade.

Diante disto, pode-se inferir que o engenheiro deve buscar elevar a eficiência de seus projetos e a economia de todos os recursos, desde que o faça de modo responsável, pois vidas humanas não têm preço e são insubstituíveis.

3.2.1 O *software Cypecad*

O *Cypecad* é um *software* desenvolvido pela Multiplus e destinado à engenharia e construção para a elaboração de projetos estruturais voltados às seguintes categorias: concreto armado, pré-moldado, protendido e misto de concreto e aço. Ele reúne as diversas etapas dos projetos: lançamento, análises e cálculos estruturais, dimensionamentos e detalhamentos finais dos elementos (MULTIPLUS, 2018).

Os seis conjuntos modulares complementares e totalmente independentes que o integram o tornam um sistema completo para a elaboração e o desenvolvimento de projetos estruturais de edificações, como: “[...] concreto, lajes, fundação, metálicas, madeira e módulos especiais” (MULTIPLUS, 2018). Assim, *Softwares* de conceito *Building Information Model* (BIM)¹ compõem o *Cypecad* e permitem o desenvolvimento de projetos de todos os segmentos da engenharia de modo integrado e compartilhando informações precisas.

Além disso, ele possui uma plataforma CAD própria que disponibiliza todos os recursos necessários para o desenvolvimento “[...] de projetos estruturais (locação de pilares, detalhamento de vigas, lajes, fôrmas, armação e etc.)” (MULTIPLUS, 2018).

A Multiplus assegura que todos os recursos utilizados pelo *Cypecad*, para a realização dos detalhamentos e dos dimensionamentos, atendem plenamente ao que preceituam as normas brasileiras, como: a NBR6118:2014, para concreto armado; a NBR 6122; para fundações; a NBR 6120, para carregamentos; a NBR 7480 que especifica o aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado; a NBR 6123 que se preocupa com as forças relacionadas à ação do vento em edificações e a NBR 8681 que define os procedimentos de ações e segurança nas estruturas, entre outras normas.

No Brasil, a empresa Top Informática, certificada pela norma NP EN ISO 9001:2015, é a responsável pela versão em português do *Cypecad* (CYPE, 2018). Ressalta-se a importância

¹ BIM ou *Building Information Model* significa Modelagem da Informação da Construção ou Modelo da Informação da Construção. É um conjunto de informações geradas e mantidas durante todo o ciclo de vida de um edifício (Wikipédia, 2018).

da certificação ISO 9001:2015, “no âmbito das atividades de concepção, validação, adaptação e comercialização de *software* e bibliografia técnica para arquitetura, engenharia e construção, assistência técnica e formação de utilizadores” (CYPE, 2018), pois a

ISO 9001:2015 é a norma de sistema de gestão da qualidade (SGQ) reconhecida internacionalmente, utilizada por organizações que desejam comprovar sua capacidade de fornecer produtos e serviços que atendem às necessidades de seus clientes e requisitos legais e regulatórios aplicáveis, com o objetivo de aumentar a satisfação do cliente por meio de melhorias de processo e avaliação da conformidade (ABNT SEBRAE, 2018).

No tocante à implementação de um sistema de gestão da qualidade, percebe-se que esta é uma decisão estratégica indispensável a toda organização que busca elevar sua eficiência global. Assim, entende-se que a ISO 9001:2015 é uma certificação imprescindível a todas as organizações que se preocupam em assegurar aos seus clientes o atendimento de todos os seus requisitos estatutários e regulamentadores aplicáveis e sua plena satisfação.

Outra ferramenta importante disponibilizada pelo *Cypecad* está relacionada ao seu módulo gerador de preços para a construção civil que trabalha com valores de mercado atualizados e customizados para cada tipo de obra.

3.2.2 O *software Eberick*

Através do *site* da AltoQi, desenvolvedora do *software Eberick*, conhece-se que ele foi criado para elaborar projetos estruturais em concreto armado segundo as técnicas: moldado *in loco*, pré-moldado, alvenaria estrutural ou estruturas mistas. Ele disponibiliza recursos capazes de apressar as fases de modelagem, realizar análises e dimensionar peças estruturais, entre outras, e detalhar as armaduras e plantas de fôrmas.

A AltoQi pontua que, devido ele utilizar *softwares* de conceito BIM que permitem realizar interfaces com todas as disciplinas do projeto e pelo fato de possuir um ambiente interno de CAD, com recursos específicos para a realização da modelagem estrutural de pilares, vigas, lajes, escadas, fundações, reservatórios, muros e elementos de estruturas mistas, ele permite constituir o modelo estrutural em formato tridimensional que facilita o entendimento geométrico dos elementos estruturais propostos e gera detalhamentos com alta qualidade e precisão acerca de todos os dados do projeto, como: classe de concreto, cobrimento, classe de agressividade, taxa de armadura para vigas e pilares e elevação.

Além disto, a AltoQi assegura que, para calcular o dimensionamento das estruturas em concreto armado o *Eberick 2018* aplica as especificações da NBR 6118:2014 que orienta o

procedimento para o projeto de estruturas de concreto, a NBR 6123:1988 que trata do processo relacionado às forças devidas ao vento em edificações e a NBR 6120, entre outras.

Assim, o *Eberick* verifica os Estados-Limites Últimos (ELU) e os Estados-Limites de Serviço (ELS), conforme as NBR vigentes e apresenta os resultados do dimensionamento para cada elemento estrutural demonstrando os respectivos esforços e resultados da armadura.

Os ELU “[...] estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional” (ABNT NBR 8800:2008, p. 14) e os ELS “[...] estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização” (ABNT NBR 8800:2008, p. 14).

Uma vez concluído o lançamento estrutural, o programa processa a conferência da resistência de cada elemento, calcula as flechas das vigas, lajes e armaduras e gera as plantas de fôrmas. Ademais, permite a composição de um memorial de cálculo, onde é possível armazenar uma série de informações, como: “[...] relatórios referentes à análise global, esforços e dimensionamento dos elementos e cargas nas fundações” (ALTOQI, 2017).

Através deste *software* é possível elaborar relatórios para listar, entre outros, “[...] o volume de concreto, peso de aço, área de fôrma, quantitativo de blocos de enchimento e consumo de aço. De outra forma, a tabela de custos pode incluir o custo dos materiais de cada peça estrutural” (ALTOQI, 2017), bem como possibilita gerar um relatório com os critérios adotados no projeto: “[...] dados da obra e normas utilizadas para análise e dimensionamento dos elementos estruturais” (ALTOQI, 2017).

Em suma, pode-se aplicar o *Eberick* para elaborar projetos estruturais em concreto armado de pequeno porte, como residenciais; em obras comerciais, como *shopping center*, ou em obras especiais, como reservatórios, cinemas, hospitais, aeroportos, entre outros.

Este *software* foi utilizado, por exemplo, no Edifício Velieiro, com geometria atípica com grandes vãos e no Edifício Quinta das Laranjeiras, onde possibilitou a replicação dos croquis do primeiro pavimento para os demais e a análise apurada dos efeitos do vento e da estabilidade global possibilitando a definição de pontos estratégicos que deveriam ter as estruturas enrijecidas e aceleração do detalhamento das pranchas finais do projeto.

Dentre outras ferramentas disponibilizadas pelo *Eberick* destacam-se o cronograma para o acompanhamento e controle da produtividade na execução do projeto e o resumo de material necessário com o seu respectivo custeio.

3.3 Projetos de Estruturas Metálicas

3.3.1 Resgate histórico acerca da descoberta e da evolução do aço

Conforme o Instituto Aço Brasil² (IABr) há uma corrente de estudiosos que defende a ideia de que a descoberta do ferro ocorreu acidentalmente no Período Neolítico (na Idade da Pedra Polida) entre os anos 6.000 e 4.000 a.C., devido algumas pedras de minério de ferro que cercavam uma fogueira terem derretido e se transformado em pequenas bolas brilhantes.

Há aproximadamente 4.500 anos, o ferro metálico, embora, raramente, também era encontrado em seu estado nativo em alguns meteoritos. Isto teria feito com que as tribos nômades que viviam nos desertos da Ásia Menor o considerassem uma oferenda divina. Há indicativos históricos que o ferro metálico, naquele período, também era utilizado na região da Groelândia. Por ser belo, maleável e difícil de ser conquistado, chegou a ser considerado um metal precioso que por certo tempo foi destinado à produção de adornos.

A partir da descoberta de como extraí-lo do seu minério sua utilização passou a ser cada vez mais intensa. Deste modo, o extrativismo mineral regular das jazidas de ferro remota aos anos 1.500 a.C. no Oriente Médio que, muito provavelmente, tenha se tornado exportador deste metal para os povos assírios e fenícios. Assim, “do primeiro milênio da era cristã em diante, o ferro difundiu-se por toda bacia do Mediterrâneo” (IABr, 2015).

Arqueólogos escandinavos no século XIX propuseram que a Idade dos Metais sucedeu à da Pedra, onde a Idade do Bronze teria ocorrido entre os anos 4000 e 2000 a.C., período no qual o bronze teria sido a matéria-prima para a construção de alguns instrumentos e armas. Estima-se que a Idade do Ferro iniciou-se posteriormente à do Bronze, perto do ano 1200 a.C. no Oriente Médio e na Europa e por volta do ano 600 a.C., na China. Considera-se este o último período tecnológico e cultural da pré-história. A partir daí a utilização do ferro destinado à fabricação de utensílios e armas substituiu o bronze (IABr, 2015).

O Instituto do Aço ainda afirma que a fundição do ferro em altos-fornos teve início em 1444. Naquele período a produção era de 1500 Kg/dia e o processo utilizado permitia que o ferro fosse mais resistente, pois as elevadíssimas temperaturas dos fornos possibilitavam maior absorção de carbono do carvão vegetal pelo líquido derretido.

² O atual Instituto Aço Brasil é o antigo Instituto Brasileiro de Siderurgia, fundado em 31 de maio de 1963 com o propósito de representar as empresas nacionais produtoras de aço.

Com a Revolução Industrial do final do século XVIII, a importância do ferro para a humanidade destacou-se, pois as sociedades urbanas expandiram-se e foram mecanizadas. No século XIX, por volta de 1856, descobriu-se como produzir o aço, material mais resistente que o ferro fundido e possível de ser produzido em maior quantidade e ele passou a ser utilizado como matéria-prima industrial e, cada vez mais, tornava-se necessário.

O número de siderurgias aumentava e com elas a poluição ambiental, devido à queima do carvão vegetal. A partir do século XX as indústrias siderúrgicas passaram a investir em tecnologia para reduzir o impacto ambiental, elevar a segurança dos funcionários e produzir mais com menor quantidade de insumos e matérias-primas. Em meados do século XIX, em um único alto-forno produzia-se diariamente algo em torno de três toneladas de aço, contudo com um elevado consumo de carvão vegetal (IABr, 2015).

Apresenta-se a cronologia resumida (Quadro 1), a partir de 1700, que detalha “[...] a descrição de alguns materiais e a evolução científica e tecnológica das descobertas estruturais nos últimos séculos, com a data e a identificação do autor [...]” (MARINGONI, 2004, p. 10).

Materiais	Ciência e Tecnologia	Obras	Ano
Tijolo	Abraham Darby descobre o croque para produção do ferro gusa		1709
Ferro fundido e batido		Primeira ponte de ferro em arco - Rio Severn (Inglaterra)	1775
	Motor elétrico (Faraday-Inglaterra)		1821
	Exposição mundial Londres	Palácio de Metal - Joseph Praxton (Inglaterra)	1851
	Elisha Graves Otis - Elevador		1853
Cimento & concreto	Joseph Louis Lambot - Argamassa reforçada com ferro		1855
Aço	Processo Bessener (aço)		1856
	Henri Labroustre - uso de vigas, arcos e pilares	Bibliothèque de Sainte-Genevieve	1856
		1º Metrô (Londres)	1863
		1º Ferrovia transcontinental (EUA)	1869
		1º Hidrelétrica (EUA)	1882
		1º Ponte Pênsil Brooklyn (EUA)	1883
		Torre Eiffel (Gustave Eiffel-França)	1889
		Urbanização Moderna (Howard)	1899
	Teoria da relatividade (Einstein-Alemanha)		1905

Continua

			Conclusão
Plástico			1910
	Robert Maillart - Laje cogumelo		1912
	Bauhaus (Alemanha)		1919
Alumínio	Hardy Cross - Processo para determinação de esforços		1930
	Estruturas Hiperestáticas	Empire State Building 381 m (EUA)	1931
	Primeiro computador (EUA)		1946
	Computadores eletrônicos (EUA)		1953
		Torre da Sears, Chicago 443 m (EUA)	1974
	Computadores pessoais (EUA)		1980
		Torre do Banco da China- Hong Kong - 315 m	1988
		Guggenheim - Bilbao	1997

Quadro 1: Cronologia da evolução científica e tecnológica de materiais estruturais
Fonte: Adaptado de MARINGONI (2004, p. 10)

Destaca-se que o IABr (2015) evidencia que, hoje, o aço é o material mais reciclável e reciclado no mundo.

Oliveira (2018) discorre que no Brasil há 30 usinas de aço em operação que são administradas por onze grupos empresariais. Entre elas a Usiminas de Coronel Fabriciano é a líder no segmento nacional de aços planos. Possui unidades em seis estados e atua em toda a cadeia siderúrgica: extração do minério de ferro, produção do aço e transformação deste em bens de capital customizados e em produtos. Esta unidade de Coronel Fabriciano está entre os maiores complexos siderúrgicos latino-americanos e possui o mais moderno Centro de Pesquisa e Desenvolvimento siderúrgico da América Latina.

O IABr (*apud* OLIVEIRA, 2018) posiciona o Brasil como o 9º produtor mundial de aço. Entre janeiro e novembro de 2017 as usinas nacionais produziram 31,5 milhões de toneladas de aço bruto, 9,1% a mais que no mesmo período de 2016.

“[...] Minas Gerais ocupa o primeiro lugar na produção de laminados e semiacabados para venda (29,9%) e o segundo lugar na produção de aço bruto (30,8%), pouco atrás do Rio de Janeiro (30,9%) [...]” (IABr *apud* OLIVEIRA, 2018).

Oliveira (2018) destaca que no Brasil entre os setores que mais utilizam o aço encontram-se: a construção civil, o automotivo, o setor de bens de capital, de máquinas e equipamentos, inclusive agrícolas, e o de utilidades domésticas e comerciais.

A Tabela 1 demonstra os dados da produção siderúrgica brasileira, acumulado anual, último trimestre, últimos 12 meses e o comparativo destes com os mesmos períodos de 2017.

PRODUTOS	JAN/AGO		18/17 (%)	JUN 2018	JUL 2018	AGOSTO		18/17 (%)	ULTIMOS 12 MESES
	2018(*)	2017				2018(*)	2017		
	Unid.: 10 ³ t								
AÇO BRUTO	23.062	22.497	2,5	2.920	3.022	2.847	2.955	(3,7)	34.915
LAMINADOS	15.406	14.702	4,8	1.880	1.903	1.856	1.938	(4,2)	23.121
PLANOS	9.342	8.963	4,2	1.134	1.143	1.087	1.209	(10,1)	14.066
LONGOS	6.064	5.739	5,7	746	760	769	729	5,5	9.055
SEMIACABADOS P/VENDAS	6.498	6.219	4,5	802	913	881	872	1,0	10.116
PLACAS	5.847	5.442	7,4	743	852	808	757	6,7	9.024
LINGOTES, BLOCOS E TARUGOS	651	777	(16,2)	59	61	73	115	(36,5)	1.092
FERRO-GUSA (Usinas Integradas)	18.623	18.581	0,2	2.340	2.428	2.324	2.440	(4,8)	28.373

Tabela 1: Produção Siderúrgica Brasileira - (*) Dados preliminares.

Fonte: IABr, n. 41, set. 2018, p. 2

3.3.2 Elementos estruturais de aço

De acordo com Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 1) todos os elementos estruturais de aço, assim como suas conexões, destinados a “[...] edificações habitacionais, comerciais, industriais e públicas, além de passarelas de pedestres e suportes de equipamentos [...]” projetados no Brasil devem obedecer à norma ABNT NBR 8800:2008.

Afirmam ainda que, atualmente, dentre uma diversidade de aplicações os elementos estruturais de aço são comumente utilizados na construção de “[...] treliças, como pilares e vigas, formando contraventamentos, e como barras de pórticos [...]” (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 2, grifo nosso), como ilustra a Figura 1.



Figura 1: Exemplo de elementos estruturais de aço

Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 2)

O comportamento dos elementos de aço ao serem submetidos a tensões normais de compressão e tração é muito bom, contudo, quando submetidos à compressão podem apresentar problemas relacionados à instabilidade (FAKURY, CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016).

Evidencia-se com isto que os procedimentos ditados pela NBR 8800:2008 são imprescindíveis e requerem ser criteriosamente seguidos para o desenvolvimento de qualquer projeto que utilize o aço como elemento estrutural.

3.3.3 Vantagens da utilização do aço como elemento estrutural

A partir de Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) é relevante discorrer sobre as vantagens advindas da utilização do aço como material estrutural. Os autores as subdividem em sete variáveis, conforme apresentadas a seguir.

- 1. Elevada resistência:** entre todos os materiais estruturais o aço é o que detém o maior índice de resistência e isto permite que os elementos estruturais produzidos a partir dele tenham menores dimensões em sua seção transversal do que os demais materiais. Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) recomendam a utilização de estruturas de aço nas obras onde é preciso vencer grandes vãos ou nos casos em que as condições do solo forem desfavoráveis para a fundação, pois as estruturas metálicas são mais leves.

Quanto à resistência, demonstram através da Figura 2 o seguinte exemplo comparativo:

[...] um pilar de aço de pé-direito de 3 m em perfil H, suportando uma força axial de compressão de cálculo de 1.500 kN, pode possuir como dimensões 250 x 250 x 9,5 x 8 mm, com área da seção transversal de 66 cm² e peso total da peça de 3 m igual a 1,5 kN. Em concreto armado, o pilar teria uma seção quadrada de lado igual a 300 mm, área da seção transversal de 900 cm² e peso total da peça de 3 m igual a 6,8 kN. Se a força axial fosse de 15.000 kN, o perfil de aço poderia ter como dimensões 700 x 700 x 31,5 x 19 mm, com área da seção transversal de 562 cm² e peso total da peça de 3 m igual a 13,2 kN, e a seção de concreto teria lado de 800 mm, com área da seção transversal de 6.400 cm² e peso total da peça de 3 m igual a 48 kN. (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 4).

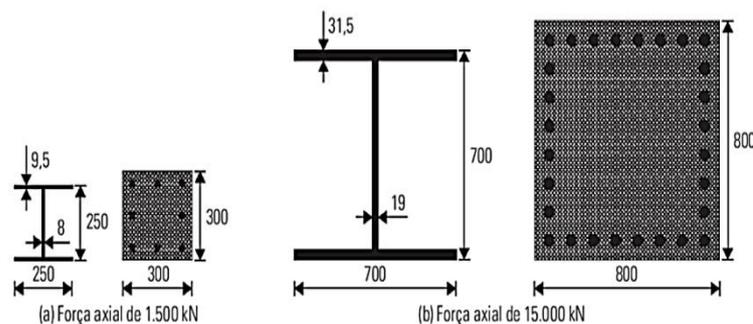


Figura 2: Comparação entre pilares de aço e de concreto armado (dimensões em mm)

Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 5)

2. Elevada ductilidade: os elementos estruturais de aço são dotados de alta ductilidade, devido à deformação na ruptura do aço situar-se entre 15% e 40% e isto os torna resistentes nos pontos de alta concentração de tensões que se distribuem por todo o elemento. Eles também são resistentes a impactos. (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016). A Figura 3 demonstra o resultado de três ensaios de tração feitos em corpos de prova de aço estrutural que resultaram: a) resistência ao escoamento superior a 45 MPa; b) resistência à ruptura próxima de 500 MPa; c) deformação entre 32% e 35% na ruptura.

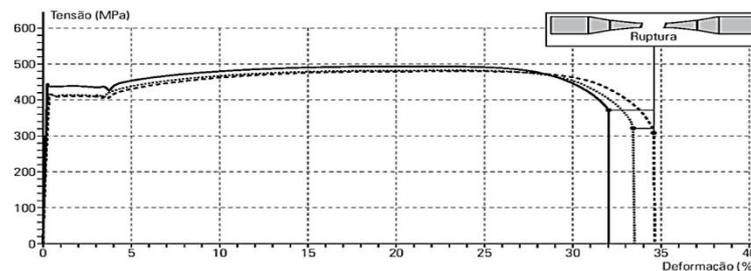


Figura 3: Exemplos de ensaios de tração em corpos de prova de aço estrutural
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 5)

3. Alto grau de confiança: devido ao aço ser um material isotrópico e homogêneo suas características mecânicas são bem definidas e isto lhe confere um elevado grau de confiança. Deste modo, no cálculo estrutural o seu coeficiente de ponderação da resistência reflete e lhe atribui um coeficiente consideravelmente menor do que o do concreto. (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016).

4. Canteiro de obras menor, limpo e organizado: numa obra onde são usados apenas elementos estruturais de aço o canteiro de obras torna-se menor, mais limpo e seguro. Ainda que haja necessidade de utilizar elementos estruturais mistos que requeiram possíveis fôrmas para concreto ou escoramentos e reduzem parcialmente este ganho a organização e a limpeza podem ser facilmente mantidas (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016), como observa-se a partir da Figura 4.



Figura 4: Canteiro de obras de uma edificação com estrutura de aço
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 5)

5. Facilidade de reforço e ampliação: em uma obra onde foram utilizados perfis de aço ou vigas mistas é possível reforçá-la ou ampliá-la com facilidade (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016).

A Figura 5a ilustra um perfil T soldado à face inferior de uma viga de aço ou mista, com perfil I, aumentando substancialmente sua resistência à flexão e rigidez. Na Figura 5b vê-se um pilar com perfil H tendo aumentada sua resistência contra as ações atuantes por meio da soldagem de chapas às suas mesas. A Figura 5c exemplifica a ampliação de uma edificação através da construção de um vão extra, onde a nova viga é ligada a um pilar existente por meio de parafusos.

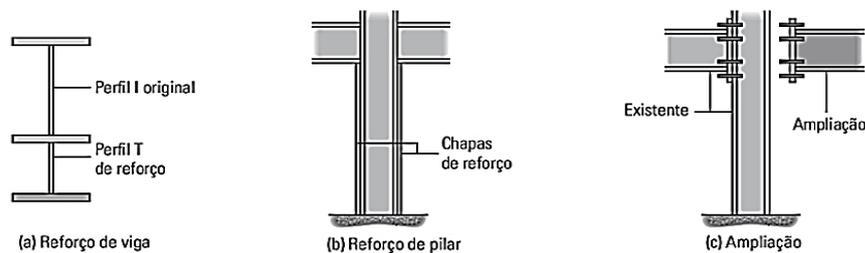


Figura 5: Ilustração de reforço e ampliação
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 6)

6. Reciclagem e reaproveitamento: como visto antes, atualmente, em todo o mundo, o aço é um dos materiais mais recicláveis e mais reciclados. Em obras, onde elementos estruturais de aço foram utilizados, quando necessário substituí-los pelo vencimento da vida útil ou retirá-los por obsolescência, podem ser sucateados, reprocessados em siderurgias e convertidos em novos produtos. Em especial, em se tratando de estrutura metálica, cujas ligações forem realizadas por parafusos, esta pode ser reaproveitada (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016).

7. Rapidez de execução: a montagem da estrutura metálica, devido ao fato de suas peças serem pré-fabricadas em dimensões exatas, pode ser realizada com muita rapidez, inclusive, não sendo prejudicada pela adversidade do tempo, como as chuvas (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016).

Especificamente em relação às vigas metálicas, elas possibilitam “maior área útil - As seções dos pilares e vigas de aço são substancialmente mais esbeltas do que as equivalentes em concreto, resultando em melhor aproveitamento do espaço interno e aumento da área útil, fator muito importante principalmente em garagens” (PORTAL METÁLICA, 2018).

3.3.4 Desvantagens da utilização do aço como elemento estrutural

Sobre os cuidados relacionados à utilização do aço Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) afirmam que, assim como os demais materiais, sua utilização requer cuidados e principalmente em relação à corrosão e ao seu comportamento em situação de incêndio.

Quanto à corrosão, é um processo natural que gradativamente diminui a espessura das chapas utilizadas nas seções transversais dos elementos estruturais podendo torná-los impróprios para as funções originalmente pretendidas. Dois casos extremos onde ocorreu severa ação corrosiva são ilustrados através da Figura 6: “[...] nas chapas das nervuras de reforço da base de um pilar e nas chapas da região de uma ligação entre viga e pilar” (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 8).



Figura 6: Exemplos de corrosão de grande intensidade
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 8)

O Quadro 2 ilustra as classes de agressividade ambiental (CAA) estabelecidas pela NBR 8800:2008.

Agressividade ambiental ^a	Ambiente	w_k mm
I (fraca)	Rural ou submersa	0,4
II (moderada)	Urbano	0,3
III (forte)	Marinho e industrial	0,3
IV (muito forte)	Industrial químico agressivo e respingos de maré	0,2

^a Pode-se admitir uma agressividade ambiental um nível mais brando em ambiente interno seco ou se o concreto for revestido com argamassa e pintura.

Quadro 2: Valores-limites de w_k
Fonte: ABNT NBR 8800:2008, p. 194

Para minimizar a possibilidade de corrosão o procedimento de galvanização por imersão da peça estrutural em cubas com zinco fundido a 450 °C, com posterior pintura da peça, é o método mais usual atualmente (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 8), contudo,

ressalta-se a necessidade de todos os procedimentos expressos no tópico condições adicionais de projeto que tratam a corrosão, diretrizes para durabilidade, etc., da NBR 8800:2008, serem observados e assegurados.

A Figura 7 ilustra os procedimentos de pintura e galvanização que são atualmente os mais utilizados para proteger a estrutura metálica contra a corrosão.



Figura 7: Pintura e galvanização
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 8)

Quanto ao comportamento do aço em situação de incêndio, Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) pontuam que, apesar dele ser um material incombustível, pode apresentar um sério problema, devido ao fato de suas propriedades mecânicas adulterarem relevantemente quando exposto a altas temperaturas. Os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade dos aços estruturais são demonstrados pela Figura 8.

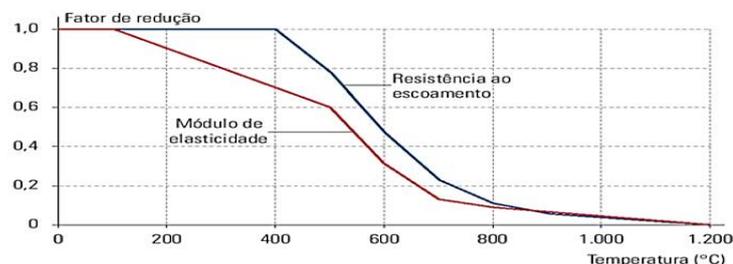


Figura 8: Reduções de resistência e rigidez do aço com a elevação da temperatura
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 9)

Na ocorrência de um incêndio “[...] a temperatura do aço alcança valores elevados, e, em decorrência das reduções de resistência e rigidez, a estrutura pode perder a capacidade de suportar as ações atuantes e sofrer colapso total ou parcial!” (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 9), como é possível observar através da Figura 9.



Figura 9: Colapso de treliças de uma cobertura causado por incêndio
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 9)

Ainda em relação a este tema, a NBR 8800:2008 estabelece que “[...] o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio [...] deve ser feito de acordo com a ABNT NBR 14323. Para estruturas submetidas à ação de sismos, deve ser usada a ABNT NBR 15421” (ABNT NBR 8800, 2008, p. 1).

3.3.5 Noções acerca do consumo de aço estrutural

Conforme Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) é altamente relevante calcular o quanto de aço será consumido em uma obra para que seja possível custear a estrutura metálica. Normalmente este consumo é expresso em massa: (Kg/m^2) de área construída, considerando-se, contudo, que este consumo está diretamente relacionado à qualidade do aço estrutural, à finalidade, à localização e ao tipo de construção e que somente será possível ser calculado após detalhada análise.

O Quadro 3, criado por Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) com dados utilizados para edificações convencionais e para exemplificar, demonstra os consumos de aço registrados em algumas edificações adotando-se os seguintes critérios: utilização de vigas mistas e pilares de aço nos edifícios de vários pavimentos e centros de compras.

Edificação	Massa (Kg/m^2)
Edifício residencial ou comercial com até 4 pavimentos (padrão popular)	20 a 35
Edifício residencial ou comercial com até 4 pavimentos (padrão médio a alto)	25 a 50
Edifício residencial ou comercial com até 12 pavimentos	30 a 50
Edifício residencial ou comercial de 12 a 30 pavimentos	40 a 60
Residência térrea e sobrado	20 a 60
Shopping center	30 a 55
Galpão industrial sem ponte rolante	20 a 25
Galpão industrial com ponte rolante com capacidade até 250 kN	30 a 60
Cobertura em geral	10 a 20

Quadro 3: Consumos estimados de aço
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 12)

3.4 Projetos de Estruturas em concreto armado

3.4.1 Resgate histórico acerca da utilização do concreto armado

De acordo com Porto e Fernandes (2015) é de suma relevância que o aluno de engenharia civil aprenda sobre o concreto armado como material estrutural para ser utilizado em projetos estruturais de obras de pequeno ao grande porte, porque, em todo o mundo e, inclusive, no Brasil, ele é a opção mais utilizada em termos de volume, devido “[...] às suas características intrínsecas que potencializam seu uso, como: flexibilidade na moldagem de fôrmas diversas, boa resistência mecânica, boa durabilidade, baixo custo, tecnologia mundialmente disseminada” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 5). Além disto, eles afirmam que o concreto armado destaca-se devido ao seu ótimo desempenho, por ser de fácil execução e bastante econômico (PORTO; FERNANDES, 2015).

Muito embora o concreto armado seja empregado em larga escala na construção civil mundial, a sua aplicação pioneira não ocorreu neste segmento. Tem-se que

A primeira publicação sobre Cimento Armado (denominação do concreto armado até mais ou menos 1820) foi do francês Joseph Louis Lambot. Presume-se que em 1850 Lambot efetuou as primeiras experiências práticas do efeito da introdução de ferragens numa massa de concreto. Em 1854, Lambot já executava construções de “cimento armado” com diversas finalidades. Imerso em estudos sobre o concreto armado e motivado por problemas com a manutenção de canoas de madeira utilizadas para lazer em um pequeno lago existente em sua propriedade em Miraval, no Var Sul da França Lambot tem a ideia de construir um barco de concreto. (CONCRETO, 2008).

Porto e Fernandes (2015) estabelecem uma linha do tempo que destaca importantes datas relacionadas ao concreto, conforme ilustra a Figura 10.

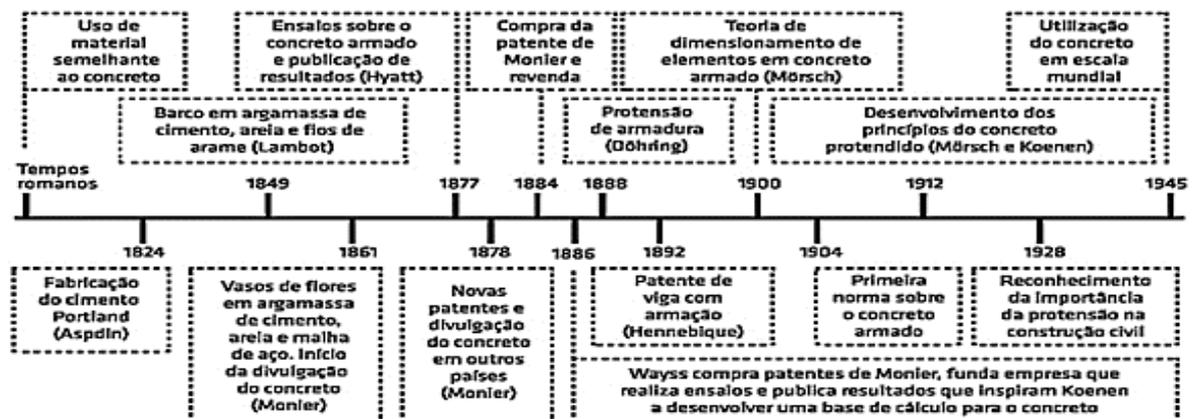


Figura 10: Evolução do concreto
Fonte: Porto e Fernandes (2015, p. 13)

Vasconcelos (1985 *apud* PORTO; FERNANDES, 2015) assevera que no Brasil há escassez de informações ricas em detalhes quanto à utilização do concreto armado. Acerca disto, Vasconcelos afirma que data-se de 1904 a mais antiga informação originária de uma publicação intitulada **Construções em cimento armado** de Antônio de Paula Freitas, professor da Escola Polytechnica do Rio de Janeiro, que atribui a primeira aplicação do concreto armado “[...] no Brasil em construções habitacionais de Copacabana pela chamada **Empreza de Construções Civas** sob responsabilidade do engenheiro Carlos Poma” (VASCONCELOS, 1985 *apud* PORTO; FERNANDES, 2015, p. 15, grifo do autor).

Creditam-se a Carlos Euler e ao seu auxiliar Mario de Andrade Martins Costa os primeiros cálculos brasileiros de estruturas em concreto armado, para o projeto da ponte sobre o rio Maracanã, em 1908. Posteriormente, em 1924, a fusão das empresas *Ways & Freytag* com a Companhia Construtora em Cimento Armado possibilitou um grande avanço do concreto armado no Brasil, bem como a formação de engenheiros. De lá para cá a aceitação das estruturas em concreto armado alavancou-se ao ponto de atingir o posto de estruturas mais utilizadas no país (PORTO; FERNANDES, 2015).

A Figura 11 mostra a normalização referente ao concreto armado, no Brasil, desenvolvida pela ABNT e suas periódicas revisões.

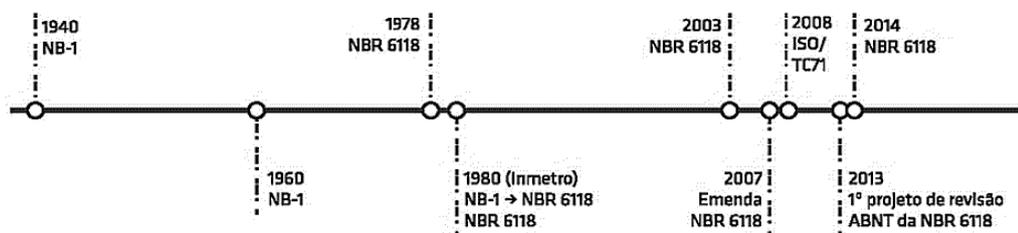


Figura 11: Evolução da norma brasileira do concreto
Fonte: Porto e Fernandes (2015, p. 16)

3.4.2 Elementos estruturais em concreto armado

De acordo com Porto e Fernandes (2015) o concreto utilizado na construção civil é um misturado de material granulado graúdo, como pedra britada, pedregulhos rolados e granulados pequenos, como areia natural ou área artificial, além de água e aditivos, como aceleradores, fibras, corantes e cimento.

Embora o concreto simples apresente uma resistência apropriada à compressão, quanto à tração sua resistência é muito restrita. Assim, quando é preciso obter “[...] resistência aos

esforços de compressão e tração, associa-se o concreto a materiais que apresentem alta resistência à tração, resultando no concreto armado (concreto e armadura passiva) ou protendido (concreto e armadura ativa)” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 18).

Ressalta-se que as classes, bem como os dados acerca do concreto são normalizados pelo item 8.2 da ABNT NBR 6118:2014; as fórmulas para os cálculos mais usuais das resistências pelo item 12 da ABNT NBR 6118:2014, assim como o aço de armadura passiva pelo item 8.3 e o aço de armadura ativa pelo item 8.4 da mesma norma ABNT (NBR 6118, 2014). Além disto, as definições de concreto estrutural são normalizadas pelo item 3.1 da ABNT NBR 6118:2014 e seus subitens. O Quadro 4 demonstra a correspondência entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Quadro 4: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p. 18)

3.4.3 Vantagens da utilização do concreto armado como elemento estrutural

Algumas vantagens são obtidas pela utilização do concreto armado como elemento estrutural, a saber:

[...] economia, facilidade de execução e adaptação a qualquer tipo de forma (o que proporciona liberdade arquitetônica), excelente solução para se obter uma estrutura monolítica e hiperestática (maiores reservas de segurança), resistência a efeitos atmosféricos, térmicos e ainda a desgastes mecânicos, manutenção, conservação praticamente nulas e grande durabilidade (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 18).

Quanto à durabilidade das estruturas de concreto armado Porto e Fernandes (2015) destacam que elas devem seguir todos os critérios previstos no projeto que necessariamente precisa ter considerado as condições do ambiente, para que possam garantir a estabilidade e a segurança requeridas ao longo de toda a sua vida útil.

3.4.4 Desvantagens da utilização do concreto armado como elemento estrutural

Entre as desvantagens do concreto armado como elemento estrutural incluem-se: “[...] peso próprio elevado (da ordem de 2,5 t/m³), baixo grau de proteção térmica e isolamento acústico e fissuração da região tracionada, podendo esta, no entanto, ser controlada por meio da utilização de armadura de tração” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 18).

O item 13.4 da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014 *apud* PORTO; FERNANDES, 2015, p. 49) alerta que as fissuras são inevitáveis em razão da baixa resistência aos esforços de tração apresentada pelo concreto armado. Por isso deve-se preocupar com o fato de elas não serem excessivas, para não comprometerem a durabilidade do elemento ou reduzirem a segurança. Dois são os fatores causadores de fissuras nos elementos de concreto armado:

- a) “[...] as propriedades reológicas do concreto fresco (retração do concreto em razão de seu processo de cura)” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 49), contra as quais devem ser empregadas providências apropriadas de tecnologia de concreto;
- b) “[...] as tensões causadas pelas solicitações impostas” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 49-50), que requerem a realização de um perfeito dimensionamento para detalhar de modo eficiente as armaduras transversais.

A partir do Quadro 5 é possível conhecer as classes de agressividade ambiental e os valores-limite da abertura peculiar das fissuras que garantem a proteção contra a corrosão, cujos principais fatores que a ocasionam são: “[...] a espessura do revestimento, permeabilidade do concreto, características das fissuras, como abertura, extensão, profundidade e duração na qual permanecem abertas” (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 50).

O cálculo do valor da abertura máxima característica (W_k) é normalizado pela NBR 6118:2014, item 17.3.3.2.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	—
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Quadro 5: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das Classes de Agressividade Ambiental
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p. 80)

Porto e Fernandes (2015) alertam quanto às ações físicas, como as oscilações da temperatura e a ação d'água e as ações químicas, como águas ácidas, cloretos e sulfatos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto.

Em relação a isto, reforça-se que a NBR 6118:2014 trata a agressividade ambiental em seu item 6.4 onde estabelece que “6.4.2 Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com a apresentada na Tabela 6.1 [...]” (ABNT NBR 6118:2014, p. 17) e considerada a correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm, conforme ilustra o Quadro 6.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Quadro 6: Correspondência entre a Classe de Agressividade Ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p. 20)

3.4.5 Outros comparativos entre concreto armado e estrutura metálica

Pinho (2018) apresenta um quadro ilustrativo (Quadro 7) de um exemplo hipotético relacionado à aplicação prática de um método desenvolvido pela Gerdau que auxilia o processo de organização e da

[...] escolha do sistema estrutural mais adequado, tendo como base um edifício comercial de múltiplos andares. Foi estabelecido para cada característica um peso (entre 1 e 5) em função da sua importância para a obra e, para cada sistema estrutural, uma nota (entre 1 e 10), baseada nas análises de custos e todas as demais influências. O resultado está representado pelas médias aritméticas ponderadas de cada sistema. A maior média indica o sistema mais adequado para a obra. (GERDAU, 2018, p.4).

Item	Característica	Peso	Sistema todo em aço	Notas	
				Sistema todo em concreto	Sistema híbrido aço e concreto
1	Fundações	3	9	7	7
2	Tempo de construção	5	10	8	9
3	Tipo de ocupação	5	10	7	9
4	Disponibilidade e custo do material	4	8	9	7
5	Recursos do construtor	3	8	7	8
6	Local da obra e acessos	3	8	9	6
7	Possibilidade de adaptações e ampliações	4	10	7	6
8	Compatibilidade com sistemas complementares	4	10	8	9
9	Manutenção e reparos	3	8	7	9
10	Vãos livres e altura da edificação	4	9	7	8
11	Proteção	3	7	9	10
12	Durabilidade	5	9	9	9
13	Estética	5	9	8	6
14	Desperdício de material e mão de obra	4	10	7	9
15	Segurança do trabalhador	5	9	6	8
16	Custos financeiros	3	9	7	9
17	Adequação ambiental	3	9	7	8
18	Qualidade	5	9	7	8
19	Desempenho	5	8	8	8
20	Incômodos para as áreas próximas	4	9	6	7
Média = $\Sigma (\text{peso} \times \text{nota}) / \Sigma \text{peso}$		80	8,98	7,50	8,00


Sistema mais adequado

Quadro 7: Método hipotético para a escolha do sistema estrutural mais adequado

Fonte: Perfis Estruturais Gerdau (2018, p. 4)

Quanto à utilização de estrutura metálica nas colunas e no conjunto viga laje, Freire (2018) destaca o seguinte: o espaço ocupado pela coluna de aço é menor do que o ocupado pela coluna de concreto convencional e, geralmente, possibilita a diminuição do número de pilares necessários e isto amplia os espaços, por exemplo, em garagens e em interiores. O mesmo autor afirma que, principalmente, “nos edifícios comerciais, estes itens são de extrema importância” (FREIRE, 2018). Em relação ao conjunto viga laje, assevera:

Considerando que a altura de uma viga de concreto armado pode ser estimada pela relação $h = \text{vão}/10$ e para uma mesma viga de aço $h = \text{vão}/20$, a altura do conjunto viga-laje em Estruturas Metálicas aproximadamente irá representar 2/3 da altura do

conjunto viga laje em concreto convencional (FREIRE, 2018).

Na prática este ganho possibilitado pela estrutura metálica pode gerar uma diminuição “[...] de 0,4m na distância entre pisos, compostos de lajes com seis metros de vão, mantendo-se constante o pé direito livre (cota do piso-cota da face inferior da viga do pavimento superior)” (FREIRE, 2018) e, dependendo do projeto em questão, esta redução pode resultar uma sensível redução das áreas totais de alvenarias e de revestimentos, bem como, pode gerar o ganho de um ou mais pavimentos, dependendo da legislação local.

A figura 12 ilustra a utilização de estrutura metálica para a execução de um prédio.



Figura 12: Estrutura metálica utilizada para execução de um prédio

Fonte: Pereira, 2018

Diante do exposto, retomando as vantagens da utilização da estrutura metálica, Pereira (2018) elenca: o módulo da elasticidade do aço permite que seções mais esbeltas e com maiores vãos livres sejam projetadas e isto otimiza o espaço da edificação e reduz a carga sobre as fundações.

Ilustra-se através da Figura 13 um exemplo de grandes vãos livres possibilitados pelas estruturas metálicas.



Figura 13: Vão livre do Masp, projetado para proporcionar vista ao Vale do Anhangabaú (Thiago Leite/shutterstock.com)

Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/projetos-de-grandes-vaos-devem-considerar-materiais-e-sistema-estrutural_11788_0_1>. Acesso em 22 out. 2018

Outra vantagem relaciona-se ao fato de os perfis metálicos serem industrializados. Isso assegura maior confiabilidade, controle e padrão às propriedades de cada seção, em contrapartida, nas estruturas de concreto armado esses critérios não podem ser criteriosamente assegurados como no caso dos metálicos, devido à incerteza relacionada à qualidade de todos os componentes utilizados. Essa incerteza pode causar majoração dos elementos em concreto armado e o encarecimento do custo da obra; contudo, as estruturas metálicas permitem um padrão de acabamento mais uniforme do que as em concreto e maior rapidez na execução da obra.

Há outras desvantagens relacionadas às estruturas metálicas elencadas por Pereira (2018), como: ventos muito fortes as tornam mais vulneráveis; por uma questão de cultura no Brasil não são utilizadas estruturas metálicas para a construção de edifícios residenciais multifamiliares e de alguns tipos de prédios comerciais; ruídos e vibrações oriundos da estrutura podem gerar incômodos e a necessidade de mão de obra treinada e especializada para lidar com as estruturas metálicas é escassa e mais cara.

3.5 Dimensionamento de uma estrutura

3.5.1 Vigas

O Dicionário da Construção Civil define viga como “[...] um elemento estrutural das edificações podendo ser de [...] ferro ou concreto armado. É responsável pela sustentação das lajes” (ECIVILNET, 2018).

A Enciclopédia Wikipédia enriquece esta definição e apresenta a viga como

[...] um elemento estrutural sujeito a cargas transversais. A viga é geralmente usada no sistema laje-viga-pilar para transferir os esforços verticais recebidos da laje para o pilar ou para transmitir uma carga concentrada, caso sirva de apoio a um pilar. Pode ser composta de [...], ferro ou concreto (português brasileiro) ou betão (português europeu) armado. A viga transfere o peso das lajes e dos demais elementos (paredes, portas, etc.) às colunas (VIGA, 16 abr. 2018).

Conforme verifica-se no conteúdo de o Clic da Obra (2018) as vigas são fundamentais para garantir segurança à construção. Para isto, elas têm que ser duráveis e ter resistência apropriada. Devem ser devidamente dimensionadas por um engenheiro experiente, bem como serem detalhadas no projeto estrutural, pois elas “[...] são responsáveis por distribuir todo o peso da laje (ou piso superior, em casos de dois andares ou mais) entre elas, diminuindo a força

recebida por elas” (CLIC DA OBRA, 2018).

Ademais, viga é um elemento estrutural linear básico, cujo comprimento longitudinal, por via de regra, é no mínimo três vezes maior que o tamanho da maior seção transversal na qual “[...] a flexão é preponderante” (ANBT NBR 6118:2014, p. 83).

3.5.1.1 Vigas de concreto armado

Carvalho e Figueiredo Filho (2016) ressaltam a importância de o dimensionamento da estrutura ser corretamente executado para exercer sua função de sustentação para a qual foi projetada, a partir da sua fase de construção e ao longo de toda a sua vida útil, de modo seguro e garantindo a estabilidade objetivada. Para evitar a ruptura (total ou parcial) da estrutura é preciso eliminar alterações excessivas e/ou fissuras intoleráveis, entre outras falhas.

Assim, estes autores alertam que as regras contidas no item 14.2.1 da norma ABNT NBR 6118:2014 devem ser criteriosamente seguidas, pois, além de estabelecerem o objetivo da análise estrutural, determinam a verificação dos ELU e de serviço das consequências dos efeitos das ações que incidem sobre a estrutura de tal modo a permitir “[...] estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos, em uma parte ou em toda a estrutura” (ANBT NBR 6118:2014, p. 81).

Contudo, Carvalho e Figueiredo Filho (2016) advertem que inúmeros fatores interferem nos processos de concepção, de execução e de utilização de uma edificação, sejam relacionados à ação, à qualidade ou à resistência dos diversos elementos construtivos. Diante disso, atribuem a impossibilidade de obter a segurança total de uma estrutura a diversificados problemas relacionados:

- a) à resistência dos materiais empregados que sofrem influência das cargas ao longo da utilização e causam a fadiga; do modo de fabricação desses materiais; da impossibilidade de realizar ensaios que reproduzam situações reais fiéis, bem como em razão das condições em que a obra é executada;
- b) à imprecisão do posicionamento da estrutura na seção transversal e/ou das armaduras;
- c) à diversas ações duráveis e variáveis; e
- d) aos valores dimensionados que podem ser divergentes dos reais, face às imprecisões intrínsecas ao processo utilizado.

Assim, como objetivo do cálculo ou dimensionamento estrutural tem-se:

- Comprovar que uma seção previamente conhecida (fôrma, dimensões e quantidade

de armadura) é capaz de resistir às solicitações mais desfavoráveis que poderão atuar; ou

- Dimensionar uma seção ainda não definida completamente (algumas dimensões podem ser impostas antes do cálculo, como largura de uma viga sob uma parede), a fim de que suporte as solicitações máximas a que poderá estar sujeita (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 46-47).

Ademais, os mesmos autores (2016) consideram dois métodos aplicáveis para o dimensionamento de estruturas em concreto armado que classificam em “[...] **métodos clássicos**, ou das tensões admissíveis, e os **métodos de cálculo na ruptura** (ou dos estados limites” (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 47, grifo dos autores).

Quanto aos métodos clássicos estes autores (2016) afirmam que eles são baseados por meio de determinações de valores numéricos iniciais fixos para os cálculos da resistência, das cargas, etc., e, por isso, atribuem algumas ressalvas a esses métodos, porque:

- eles superdimensionam a estrutura em decorrência de os valores iniciais serem fixos e de as grandezas serem aplicadas em seus valores máximos resultando valores elevados que dificilmente são alcançados ao longo da vida útil da estrutura;
- geram desperdícios de materiais ao desconsiderarem a capacidade do ajustamento plástico dos materiais suportarem maiores solicitações;
- embora o método clássico considere fundamentalmente que a estrutura em sua vida útil trabalhe permanentemente em regime elástico quanto às tensões advindas das cargas de serviço, ele não possibilita investigar sua real margem de segurança; e
- podem não considerar situações inseguras, devido à desproporcionalidade de algumas solicitações em relação às ações, onde “[...] um pequeno aumento das ações pode provocar um grande aumento da solicitações (ou a situação contrária)” (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 47).

Quanto ao método de cálculo na ruptura (ou dos estados-limites), Carvalho e Figueiredo Filho (2016) o classificam como mais seguro, pelo fato de as solicitações de cálculo ou solicitações correspondentes às cargas majoradas serem menores que as solicitações últimas, que são as responsáveis por levar a estrutura à ruptura ou ao ELU.

Além disso, estes mesmos autores mencionam o item 12.5 da ABNT NBR6118:2014 que determina que a segurança das estruturas devem atender tanto às condições construtivas, cujos critérios de detalhamento são estabelecidos nas seções 18 e 20 da referida norma quanto ao controle de todos os materiais, como preveem as normas afins, em especial a ABNT NBR 12654:1992 corrigida pela versão 2000, a ABNT NBR 12655:2006e a ABNT NBR14931:2004, entre outras, quanto às condições analíticas de segurança reguladas pelo item 12.5.2 da ABNT

NBR 6118:2014, onde define-se que:

as resistências não podem ser menores que as solicitações e devem ser verificadas em relação a todos os estados limites e todos os carregamentos especificados para o tipo de construção considerado, ou seja, em qualquer caso deve ser respeitada a condição:

Equação 1

$$R_d \geq S_d$$

[onde R_d são os valores de cálculo dos esforços resistentes e S_d são os valores de cálculo dos esforços solicitantes].

Para a verificação do estado limite último de perda de equilíbrio como corpo rígido, R_d e S_d devem assumir os valores de cálculo das ações estabilizantes e desestabilizantes respectivamente” (ABNT NBR 6118:2014 *apud* CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 48).

Carvalho e Figueiredo Filho (2016, grifo dos autores) afirmam que a seção transversal central de uma viga de concreto armado retangular, no caso do exemplo a seguir, quando submetida ao momento fletor M crescente atravessa três estágios de deformação que denominam de **Estádios** e definem o comportamento da viga até a sua destruição.

Através da Figura 14 é possível observar as deformações e tensões tanto no aço quanto no concreto, assim como as resultantes destas tensões.

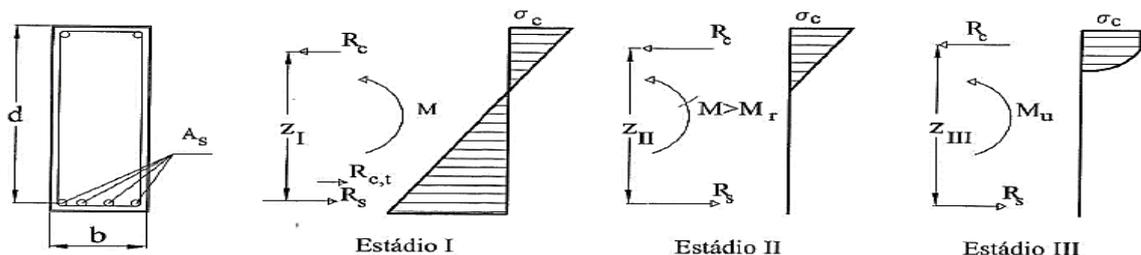


Figura 14: Comportamento da seção transversal de uma viga de concreto armado na flexão normal simples
Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 114)

Acerca das deformações e tensões apresentadas em cada estágio deste exemplo, Carvalho e Figueiredo Filho (2016) ponderam:

- No Estádio I, também definido pelos autores como **estado elástico**, observa-se que as tensões exercidas são menores do que a resistência do concreto à tração e que o diagrama de tensão é distribuído de forma linear ao longo de toda a seção, bem como que o momento de fissuração ocorre no limite dos Estádios I e II.
- No Estádio II registra-se o surgimento da fissura, momento em que o concreto passa a não resistir à tração e comprime-se. Nesse momento, o aço é o elemento que passa a resistir a todos os esforços de tração e, diante do aumento da tensão, ocorre o aumento das fissuras que tornam-se visíveis.

- c) No Estádio III, fase em que realiza-se o dimensionamento das estruturas, a tensão é elevada para um valor próximo do que provoca a ruína dos concretos até C50. Evidencia-se a plastificação na fibra mais comprimida do concreto. O diagrama de tensão assume tendência à verticalização uniforme e quase todas as fibras trabalham na tensão máxima e isto as leva à deformação. As fissuras distribuem-se por todo o corpo de prova e aproximam-se da linha neutra. “Supõe-se que a distribuição de tensões no concreto ocorra segundo um diagrama parábola-retângulo” (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 114-115), como ilustra a Figura 20.

Carvalho e Figueiredo Filho (2016) ressaltam que a distribuição de tensões em concreto limitando-se à classe C50 é admitida se realizada conforme o diagrama parábola-retângulo da Figura 15, baseado no diagrama tensão-deformação simplificado do concreto, Figura 16, com tensão máxima igual a $0,85 \cdot f_{cd}$; onde o

[...] diagrama parábola-retângulo é composto por uma parábola de 2º grau, com vértice na fibra correspondente à deformação de compressão de 2‰ e um trecho reto entre as deformações 2,0‰ e 3,5‰; permite-se a substituição do diagrama parábola-retângulo por um retângulo de altura $0,8 \cdot x$, onde x é a profundidade da linha neutra, com a seguinte tensão:

- $0,85 \cdot f_{cd} = (0,85 \cdot f_{ck}) / \gamma_c \rightarrow$ zonas comprimidas de largura constante, ou crescente no sentido das fibras mais comprimidas, a partir da linha neutra;
- $0,80 \cdot f_{cd} = (0,80 \cdot f_{ck}) / \gamma_c \rightarrow$ zonas comprimidas de largura constante, ou crescente no sentido das fibras mais comprimidas, a partir da linha neutra;
- No trecho de altura $0,2 \cdot x$, a partir da linha neutra, no diagrama retangular, as tensões de compressão no concreto são desprezadas; no trecho restante ($0,8 \cdot x$), a distribuição de tensões é uniforme (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 116-117).

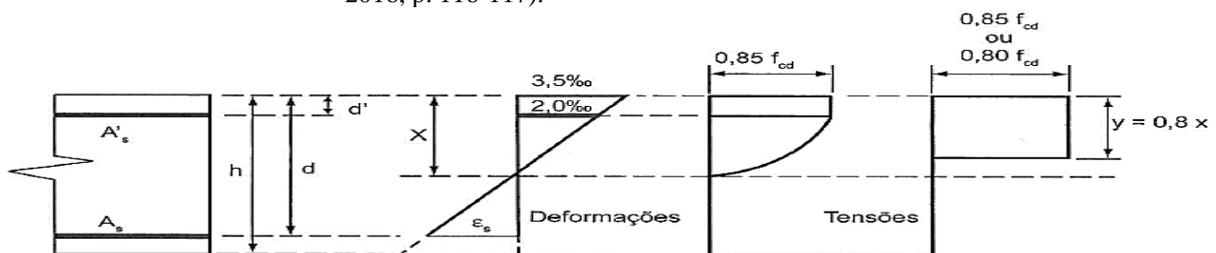


Figura 15: Diagrama de tensões no concreto no estado limite último para concretos até a classe C50

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 117)

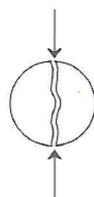


Figura 16: Ensaio para obtenção da resistência à tração por compressão diametral (tração indireta)

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 37)

Carvalho e Figueiredo Filho (2016) asseveram que o cálculo das estruturas de concreto armado deve ser realizado no ELU (Estádio III), porque objetiva, principalmente, dimensionar estruturas econômicas que resistam aos esforços sem chegar à ruína.

O cálculo da distribuição de tensões em concretos das classes C50 a C90, Figura 17, deve ser realizado conforme “[...] um diagrama curvo e retangular, definido em 8.2.1.0.1 da ABNT NBR 6118:2014, com tensão de pico igual a $0,85 \cdot f_{cd}$, com f_{cd} definido em 12.3.3 da norma (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 117).

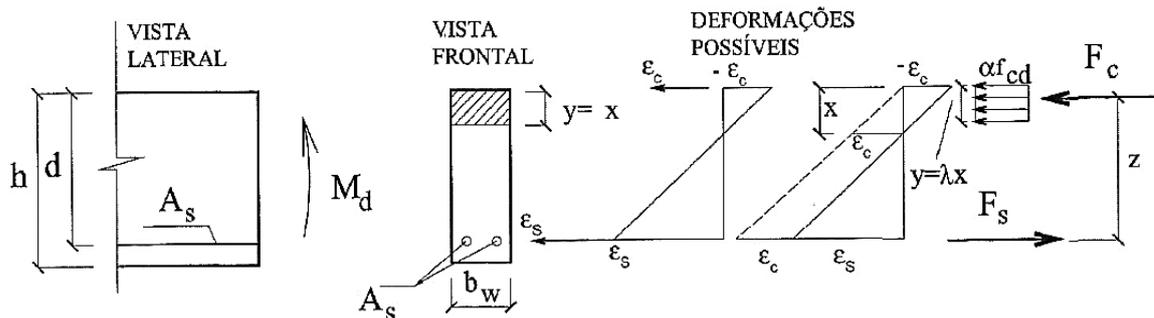


Figura 17: Diagramas de tensões no concreto no estado limite último para concretos de classes C50 a C90
Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 118)

3.5.1.2 Vigas metálicas

Para Pfeil W. e Pfeil M. (2014), um projeto estrutural tem como objetivos garantir a segurança da estrutura para evitar o seu colapso e assegurar o correto desempenho almejado, para que não ocorram variações significativas em relação a deslocamentos, vibrações e/ou danos locais.

Nesse contexto, os autores definem que são três as etapas pertinentes a um projeto estrutural: anteprojeto ou projeto básico, dimensionamento ou cálculo estrutural e detalhamento, onde: na primeira define-se o tipo de sistema estrutural e os materiais a serem empregados, além do sistema construtivo; na segunda, definem-se os elementos estruturais e as suas ligações visando garantir o devido desempenho estrutural e a segurança e, na terceira, elaboram-se os desenhos executivos estruturais e especificam-se todos os componentes a serem utilizados.

Ademais, Pfeil W. e Pfeil M. (2014) expõem que nas duas últimas etapas são utilizados conhecimentos para a realização de análise da estrutura e da resistência dos materiais, além de diversas normas:

- critérios de garantia de segurança;
- padrões de testes para caracterização dos materiais e limites dos valores de

- características mecânicas;
- definição de níveis de carga que representem a situação mais desfavorável;
- limites de tolerâncias para imperfeições na execução;
- regras construtivas etc. (PFEIL W.; PFEIL M., 2014, p.35).

Sobre as normas, os mesmos autores (2014) definem tratarem-se de bases comuns que têm o propósito de subsidiar os trabalhos dos engenheiros para a elaboração de projetos. Assim, mencionam que no Brasil as edificações são reguladas pela ABNT NBR 8800:2008 que baseia-se fundamentalmente na norma americana AISC-LRFD (2005).

Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) ratificam que, embora seja impossível conceber estruturas absolutamente seguras, pois o dimensionamento estrutural está sujeito a incertezas variadas, como visto antes, devido ao fato de os esforços ou tensões resistentes e solicitantes serem grandezas probabilísticas, é possível estabelecer os coeficientes de ponderação e de ponderação da resistência, assim como os fatores das ações de tal modo a minimizar ao máximo a probabilidade de ocorrência de um ELU e assegurar que a sua oscilação varie dentro da faixa permitida pelas normas.

Diante disto, Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, p. 44) afirmam que “um esforço resistente de cálculo (por exemplo, a força axial resistente de uma barra tracionada ou no momento fletor resistente de uma viga) ou uma tensão resistente de cálculo é dado” pela equação:

Equação 2 $R_d = R_k / \gamma$

onde γ é o coeficiente de ponderação da resistência e R_k a tensão resistente nominal ou o esforço para o ELU considerado. Assim, ao dividir R_k por γ pode-se considerar que o seu valor poderá ser inferior ao previsto devido “[...] à variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais (aço ou concreto), e, ainda, em virtude de incertezas relativas ao comportamento das peças no colapso, à execução da estrutura, às dimensões das seções transversais das peças, etc.” (FAKURY; CASTRO e SILVA; CALDAS, 2016, p. 44).

O método dos estados limites últimos é destacado como o “[...] que considera as incertezas de forma mais racional [...], além de considerar as reservas de resistência após o início da plastificação” (PFEIL W.; PFEIL M., 2014, p. 36) e garante a segurança através da equação de conformidade, para cada seção estrutural:

Equação 3 $S_d = S (\sum \gamma_{fi} F_i) < R_d = R(f_k / \gamma_m)$

Na fórmula acima, que expressa um método semiprobabilístico, os coeficientes de majoração das cargas e de redução da resistência interna “refletem as variabilidades dos valores

característicos dos diversos carregamentos e das propriedades mecânicas do material e outros fatores como discrepâncias entre o modelo estrutural e o sistema real” (PFEIL W.; PFEIL M., 2014, p. 36).

Entende-se a partir destes mesmos autores (2014) que a solicitação de projeto S_d é menor que a resistência de projeto R_d , onde S_d é obtida a partir de uma combinação de ações F_i , como: temperatura, carga e mudança de umidade.

Ademais, percebe-se que este método considera as incertezas de forma mais racional do que o método de tensões admissíveis (propriedades físicas dos materiais), além de considerar as reservas de resistência com o início da plastificação.

Segundo Pfeil W. e Pfeil M. (2014) a segurança das estruturas fica garantida sempre que a diferença $R - S$, chamada margem de segurança (M) for positiva. No caso da distribuição senoidal ilustrado na Figura 18, quanto maior for a margem de segurança (M), menor será a possibilidade de colapso.

Assim, os coeficientes parciais de segurança são calculados através de métodos de análise de confiabilidade de modo que a probabilidade de colapso seja menor para um valor suficientemente pequeno.

Ressalta-se que quanto maior for a segurança desejada maior é o custo.

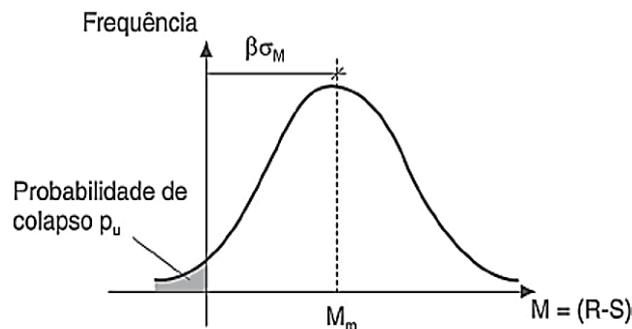


Figura 18: Distribuição de probabilidade da variável M (margem de segurança), igual à diferença entre a resistência R e a solicitação S

Fonte: Pfeil W. e Pfeil M. (2014, p. 38)

Ademais, Pfeil W. e Pfeil M. (2014, p. 36) afirmam que “além das verificações de resistência (estado limite último) são também necessárias verificações quanto à possibilidade de excessivas deformações sob cargas em serviço (estado limite de utilização).

Entre essas verificações exemplificam a seção de uma peça submetida à flexão, ilustrada pela Figura 19.

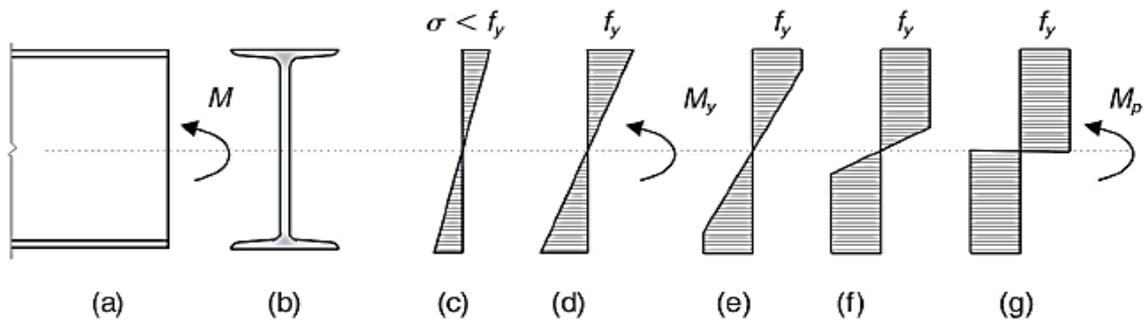


Figura 19: Tensões normais de flexão e plastificação progressiva da seção
Fonte: Pfeil W. e Pfeil M. (2014, p. 36)

Acerca das vantagens da utilização da estrutura metálica sobre a estrutura em concreto armado, Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) citam o exemplo de uma viga bi apoiada com vão de 5 m sobre a qual dispõe-se uma laje de concreto e uma carga dimensionada e distribuída de modo uniforme de 20 kN/m, como ilustra a Figura 20.

Contudo, verifica-se a partir de Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016) que uma estrutura metálica pode parecer que é sempre mais vantajosa do que uma estrutura de concreto, entretanto alertam que deve-se considerar sempre não somente o custo benefício, mas a facilidade da construção e possíveis dificuldades de lançamento das peças da estrutura metálica.

Assim, pode-se optar por um sistema misto utilizando a estrutura de perfil e a bandeja de concreto. No caso específico do exemplo ilustrado pela Figura 20 onde considera-se um vão de 5 m e uma carga de 20 kN/m utiliza-se um perfil de aço com área transversal de 31 cm², com altura de 120 mm e peso de 1,2 kN. Se a estrutura fosse toda de concreto a viga armada teria 600 cm² de seção transversal, altura de 500 mm e um peso de 7,5 kN.

Hipoteticamente, se o vão a ser vencido fosse de 15 m com uma carga de 70 kN/m na seção transversal da estrutura mista o perfil metálico teria uma seção de 216 cm² e peso de 25,5 kN, enquanto se a estrutura fosse somente de concreto a seção transversal teria 4.800 cm², altura de 1.200 mm e peso total 180 kN.

Ressalta-se que todo este raciocínio leva em conta a resistência ao escoamento do perfil de aço de 300 MPa e a resistência do concreto à compressão igual a 30 Mpa.

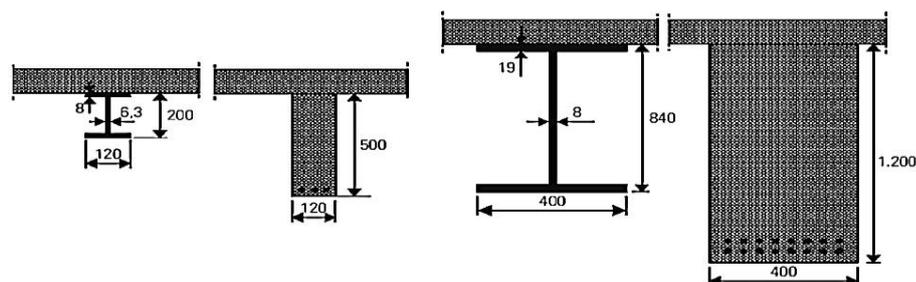


Figura 20: Comparação entre vigas de aço e de concreto armado (dimensões em mm)
Fonte: Fakury; Castro e Silva & Caldas (2016, 5)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esse trabalho comprovou-se a importância de o engenheiro civil manter-se em plena aprendizagem e de modo contínuo, para renovar seus conhecimentos técnicos e inteirar-se do contexto sociopolítico e econômico a fim de poder posicionar-se corretamente no mercado que encontra-se extremamente competitivo, face ao novo perfil de consumidor que emanou do surgimento dessa severa crise que vivenciamos há três longos anos.

Assim, acredita-se ter sido possível comprovar teoricamente o quão é importante, nos dias atuais, que ele esteja devidamente respaldado em todos os aspectos, para que possa fundamentar suas tomadas de decisões quanto ao viabilizar projetos no que se refere à decisão de utilizar vigas em concreto armado ou metálicas.

Entenda-se, aqui, o termo viabilizar em seu amplo sentido, como realizar ações e tomar decisões capazes de tornarem possível executar uma obra segura desde o seu alicerce e assegurar que ela cumpra os objetivos propostos durante toda a sua vida útil, além de considerar critérios extremamente importantes, como o tempo de execução, o custo total, a sua finalidade, a qualidade almejada, as variáveis ambientais, hoje em dia tão cobradas e fiscalizadas, entre tantas outras mencionadas ao longo do trabalho.

Nesse contexto, ressalta-se que sistemas computacionais muito podem contribuir, assim como os demais modernos equipamentos e tecnologias disponíveis.

Como apresentado, alerta-se quanto à imprescindibilidade de as normas que regulam a temática viga seja em concreto armado ou em perfis metálicos serem criteriosamente observadas e seguidas.

Diante de todo o conteúdo explorado e discutido neste trabalho, conclui-se que cada método construtivo evidencia suas vantagens e desvantagens elencadas ao longo deste trabalho e que a escolha por um ou outro método tem que se dar a partir da correta análise de todas as variáveis que possíveis pertinentes aos objetivos do projeto em questão, como: a finalidade e a urgência da obra; as condições do solo; o fator manutenção; a possibilidade de futura expansão; a facilidade de obtenção de mão de obra para a sua execução, considerando que a mão de obra para a estrutura metálica é especializada e que por isto pode ser escassa e mais cara; a durabilidade, a segurança e a qualidade pretendidas; a disponibilidade de tecnologia na região da obra, assim como a confiabilidade dos materiais e/ou elementos a serem utilizados, além, é claro, do melhor custo-benefício.

Em relação aos objetivos propostos, relacionados à intenção de realizar um comparativo

e análise das vantagens e das desvantagens oriundas da utilização de vigas metálicas e em concreto armado, considerando os critérios técnico, financeiro, prazo de execução e padrões estabelecidos pelas respectivas normas vigentes da ABNT NBR, julga-se que este trabalho possibilitou ao autor ampliar seu conhecimento teórico, pois ampla foi a exploração das normas conexas ao assunto discorrido, assim como acerca das concepções dos autores pesquisados que contribuíram sobremaneira para um vasto aprendizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A IMPORTÂNCIA das vigas. Clic da Obra, 2018 *online*. Disponível em: <<http://blog.clicdaobra.com.br/a-importancia-das-vigas/>>. Acesso em: 21 set. 2018.

ALTOQI. **Solução para seus projetos**: como funciona o Eberick? AltoQi, 2017, *online*. Disponível em: <<http://www.altoqi.com.br/eberick/#>>. Acesso em: 04 ago. 2018.

AMORIM, L. Construção civil vive crise sem precedentes no Brasil. **Revista Exame**. São Paulo, 16 jul. 2015, *online*. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/revista-exame/a-crise-e-a-crise-da-construcao/amp/>>. Acesso em: 02 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 53 p. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/construcao-de-edificios/nbr-14931-2004-execucao-de-estruturas-de-concreto-procedimento>>. Acesso em: 28 jul. 2018.

_____. **NBR 8800:2008: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2008. 237 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/marcosrei85/nbr-8800-2008-projeto-de-estruturas-de-ao-e-de-estruturas-mistas-e-concreto-de-edificios?from_action=save>. Acesso em: 28 jul. 2018.

_____. **NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jonathanlopes9026/nbr-6118-2014-projeto-de-estruturas-de-concreto-procedimento-verso-corrigida?from_action=save>. Acesso em: 28 jul. 2018.

_____- SEBRAE. **ABNT NBR ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos**. 2018, *online*. Disponível em: <<http://abnt.org.br/paginampe/noticias/217-abnt-nbr-iso-9001-2015-sistemas-de-gestao-da-qualidade>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

ATIVIDADE na construção civil fecha junho em retração menos acentuada. **Revista PEGN**, Ed. Globo, 27 jul. 2018a, *online*. Disponível em: <<https://revistapegn.globo.com/Negocios/noticia/2018/07/pegn-atividade-na-construcao-civil-fecha-junho-em-retracao-menos-acentuada.html>>. Acesso em: 02 set. 2018.

BIM. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikipédia, 2018, *online*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/BIM>>. Acesso em: 04 ago. 2018.

BUDHU, M. **Fundações e estruturas de contenção**. [Tradução e revisão técnica]: Luiz Antonio Vieira Carneiro, Maria Esther Soares Marques. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014.4 ed. São Carlos: EduSCar, 2016.

CONCRETO. Cimento.Org: o mundo do cimento. Brasília, 11 ago. 2008. Disponível em: <<https://cimento.org/concreto/>>. Acesso em: 02 set. 2018.

CONSTRUÇÕES Metálicas: O uso do Aço na Construção Civil. In: Portal Metálica, 2018, online. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/construcoes-metalicas-o-uso-do-aco-na-construcao-civil>>. Acesso em: 22 set. 2018.

CYPE. Programas. 2018, online. Disponível em: <<http://programas.cype.pt/>>. Acesso em: 04 ago. 2018.

FAKURY, R. H.; CASTRO e SILVA, A. L. R; CALDAS, R. B. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

FONTENELLE, A. Metodologia científica: Como definir os tipos de pesquisa do seu TCC? 23 ago. 2017, online. Disponível em: <<https://www.andrefontenelle.com.br/tipos-de-pesquisa/>>. Acesso em: 02 jul. 2018.

FREIRE, Carlos. Análise comparativa: custos estrutura metálica X estrutura de concreto. In: Made in steel, online. Disponível em: <<http://www.madeinsteel.com.br/analise-comparativa-custos-estrutura-metalica-x-estrutura-de-concreto/>>. Acesso em: 21 out. 2018.

IABr. **A idade do ferro**. IABr - Instituto Aço Brasil. 2015-2018. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/siderurgia_mundo.asp>. Acesso em: 18 ago. 2018.

_____. Estatística Preliminar. Instituto Aço Brasil, n. 41, set. 2018. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Setembro_2018_994467513.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.

MARINGONI, H. M. **Princípios de arquitetura em aço**. Coletânea do Uso do Aço - Gerda Aço Minas, v. 4, 2. ed. Perfis Gerda Aço Minas, 2004. Disponível em: <http://www.engmarcoantonio.com.br/cariboost_files/manual_arquitetura.pdf>. Acesso em: 01 set. 2018.

MARTELLO, A. Economistas do mercado sobem para 4,15% estimativa de inflação para 2018. G1, Brasília, 13 ago. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2018/08/13/economistas-do-mercado-sobem-para-415-estimativa-de-inflacao-para-2018.ghml>>. Acesso em: 01 set. 2018.

MULTIPLUS. Software para cálculo estrutural e projeto estrutural. 2018, online. Disponível em: <<https://multiplus.com/software/cypecad/>>. Acesso em: 04 ago. 2018.

NOGUEIRA, Paulo. Período difícil com o setor de construção civil em crise. Recuo do PIB do setor representa a 16ª queda seguida. Empresas não conseguem enxergar melhora. Portal Click Petróleo e Gás. 14 jun. 2018. Disponível em: <<https://clickpetroleo.com.br/periodo-dificil-construcao-civil/>>. Acesso em: 01 set. 2018.

OLIVEIRA, A. Minas deve seguir líder na produção de aço no Brasil. Diário de Uberlândia, Uberlândia & Região. Uberlândia, 18 jan. 2018, online. Disponível em: <<https://diariodeuberlandia.com.br/noticia/15244/minas-deve-seguir-lider-na-producao-de-aco-no-brasil>>. Acesso em: 05 ago. 2014.

PEGN. Inflação da construção civil fica em 0,52% em julho. **Revista PEGN**, Ed. Globo, 08 ago. 2018, online. Disponível em: <<https://revistapegn.globo.com/Noticias/noticia/2018/08/inflacao-da-construcao-civil-fica-em-052-em-julho.html>>. Acesso em: 02 set. 2018.

PEREIRA, Caio. Estrutura Metálica: Processo executivo, vantagens e desvantagens. **Escola Engenharia**, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/estrutura-metalica/>. Acesso em: 20 out. 2018.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 8ed. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado**: conforme NBR 6118/2014. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PINHO, Fernando Ottoboni. Quando construir em aço? Perfis estruturais Gerdau -Artigo técnico, 2018, *online*. Disponível em: <<http://www.madeinsteel.com.br/quando-construir-em-aco/>>. Acesso em: 20 out, 2018.

SETOR de Construção Civil deve crescer 2% em 2018. **Revista Exame**, Grupo Abril, 15 mar. 2018, *online*. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/dino/setor-de-construcao-civil-deve-crescer-2-em-2018/>>. Acesso em: 02 set. 2018.

VIGA. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre, *online*. Wikimedia, 16 abr. 2018. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Viga>>. Acesso em: 21 set. 2018.

VIGAS. In: Dicionário da Construção Civil - ECivil, 2000-2018, *online*. Disponível em: <<https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-viga.html>>. Acesso em: 21 set. 2018.