



**FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS – FUPAC
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ
ENGENHARIA CIVIL**

LUÍS FELIPE DA SILVA MOREIRA

**ASPECTOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E ESTRUTURAS METÁLICAS**

UBÁ – MG

2016

LUÍS FELIPE DA SILVA MOREIRA

**ASPECTOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E ESTRUTURAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Faculdade Presidente Antônio Carlos de Ubá, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Msc. Israel Iasbik.

UBÁ – MG

2016

RESUMO

Visando à comparação geométrica, de pesos, de execução e econômica, o trabalho em questão mostra uma estrutura metálica e uma em concreto armado que são as duas técnicas construtivas mais utilizadas para execução de estruturas, ambas solicitadas por mesmo carregamento e igual comprimento de vão entre apoios, sendo feita uma análise sobre uma viga biapoiada, esclarecendo os pontos favoráveis e desfavoráveis, incluindo comportamento físico e dos materiais, logística para execução e preço. Diante dos resultados obtidos através deste estudo, é possível identificar qual tipo de estrutura atende melhor aos pré-requisitos de uma obra, podendo ser uma solução mais fácil de executar, mais leve, mais econômica ou mais bonita. Portanto, o intuito deste trabalho não é descrever e apresentar qual técnica construtiva é melhor, mas demonstrar as particularidades de cada estrutura e permitir, através dos resultados, a escolha de uma solução que atenda satisfatoriamente aos pré-requisitos de uma obra.

Palavras-chave: Viga. Estrutura de Aço. Estrutura de Concreto.

ABSTRACT

The present study aims at the geometric, weight, execution and economic comparison, showing a metallic structure and a reinforced concrete structure, which are the two most used building techniques for structuring implementation, both requested by the same loading and the same void length between supports, in analysis of a bi-supported beam, clarifying the favorable and unfavorable points, including physical and material behavior, execution logistics and price. Considering the results obtained from this study, it is possible to identify which type of structure best meets the prerequisites of a work, which of them could be an easier performing solution, lighter, more economical or more beautiful. Therefore, the purpose of this work is not to describe nor to present which constructive technique is the best one, but to demonstrate the particularities of each structure and to allow, from the results, the choice of a solution that satisfies the prerequisites of a work.

Keywords: Beam. Steel Structure. Concrete Structure.

1 INTRODUÇÃO

Um dos momentos mais importantes de um processo construtivo é o planejamento. Nele se faz a exposição de todos os recursos que serão utilizados no decorrer da obra e de que maneira ela pode ser mais eficiente, levando em consideração preço, facilidade, peso e resistência, parâmetros que norteiam a solução estrutural a ser adotada.

Existem diversas técnicas construtivas, algumas demandando trabalhos braçais mais intensos e outras mais industrializadas, demandando menor mão de obra na execução. Outras ainda que atendem melhor a arquitetura devido à facilidade na moldagem e trabalhabilidade do material, técnicas mais caras ou mais baratas, de prazo de execução longo e outras com prazos mais curtos.

Ao longo dos anos essas técnicas foram mudando, ao passo que novos materiais e tecnologias foram descobertos e desenvolvidos. Desde que o homem deixou de ser nômade e passou a ter um lugar fixo, surgiram os primeiros edifícios permanentes e as primeiras aldeias, e com isso os processos construtivos foram evoluindo, tendo novas formas e tamanhos. Exemplo disso são as pirâmides egípcias, os templos gregos, as cúpulas romanas, as catedrais góticas, as imensas pontes de ferro e de aço e os enormes arranha-céus de aço e de concreto.

Cada material possui suas particularidades em relação aos efeitos dos esforços para os quais são solicitados; por exemplo, o concreto armado apresenta grande resistência à compressão e baixa resistência à tração. Já o aço apresenta resistências iguais quando comprimido ou tracionado. Outra disparidade é o peso dessas estruturas, nas quais a metálica tem o peso próprio menor em relação à de concreto armado e com isso o carregamento que a fundação recebe também é menor, gerando uma fundação menos robusta e mais econômica no caso da estrutura metálica. Em relação à mão de obra, levando em consideração o mesmo tamanho de construção e o mesmo tempo, seriam necessários muito mais operários na parte da estrutura de concreto do que da metálica. Outro aspecto é o fato de que a mão de obra utilizada numa estrutura metálica é bem mais especializada, o que encarece a obra, além de necessitar de profissionais mais especializados. Finalmente, na execução, enquanto a estrutura de concreto deve ser totalmente produzida na obra, a metálica é apenas montada, tendo sua produção feita em fábrica.

Este trabalho tem o propósito de fazer um comparativo entre a estrutura de concreto armado e a estrutura metálica, fazendo uma análise sobre um sistema estrutural básico, viga biapoiada sobre mesmas ações de carregamentos, mesmas dimensões entre apoios,

esclarecendo os pontos favoráveis e desfavoráveis, incluindo comportamento físico e dos materiais e logística para execução e preço.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 AÇO

2.1.1 Histórico

Segundo Chamberlain (2013, p. 01) “as primeiras utilizações do ferro aconteceram, aproximadamente, 8000 anos atrás, em civilizações tais como as do Egito, da Babilônia e da Índia”. Essas civilizações usaram o ferro apenas como enfeite nas construções ou com fins militares. O uso do ferro em escala industrial só teve lugar em meados do século XIX, decorrente da Revolução Industrial na Inglaterra, França e Alemanha. A primeira obra importante executada em ferro foi a ponte sobre o rio Severn, em Coalbrookdale, na Inglaterra, em 1779.

FIGURA 1 – Ponte Coalbrookdale



Fonte: (WIKIPEDIA.ORG, 2016)¹

¹ https://it.wikipedia.org/wiki/Iron_Bridge#/media/File:Ironbridge002.JPG

As aplicações em edifícios tiveram como marco a construção do Palácio de Cristal em Londres, em 1851, com um sistema de fabricação e montagem que se assemelha muito ao usado atualmente na construção metálica.

O uso do aço no Brasil está relacionado diretamente à história do país. Na primeira fase de uso, no final do século XIX, o Brasil ainda não tinha indústrias siderúrgicas; desse modo, importavam-se grandes quantidades de componentes de ferrovias, com suas estações e pontes, da Inglaterra. A segunda fase surgiu entre as duas guerras mundiais, em consequência da paralisação das importações, e tornou-se um dever iniciar o processo de criação e desenvolvimento das empresas que hoje formam o parque siderúrgico nacional. Com esse desenvolvimento, surgiu também todo o complexo de indústrias derivadas, como as de fabricação e montagem de estruturas e componentes metálicos.

Hoje, a siderurgia brasileira tem um lugar de destaque internacional, sétima produtora de aço do mundo, e as empresas metalúrgicas evoluíram em qualidade e quantidade de produção, dirigindo sua produção tanto ao mercado interno quanto ao externo.

Algumas das aplicações de estruturas metálicas na atualidade ocorrem em: pontes ferroviárias e rodoviárias, edifícios industriais, comerciais e residenciais, galpões, hangares, coberturas de grandes vãos, torres de transmissão e para antenas, plataformas *off-shore*, construção naval, tanques e tubulações, estacas-pranchas etc.

Dentre as aplicações anteriores, todas são usadas no Brasil, e fabricantes de estruturas metálicas são encontrados em todas as regiões do país. Os maiores fabricantes localizam-se nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

2.1.2 Características do aço

O aço e o ferro fundido são ligas de ferro e carbono, com outros elementos de dois tipos: elementos residuais decorrentes do processo de fabricação, como silício, manganês, fósforo e enxofre, e elementos adicionados com o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material denominados elementos de liga (PFEIL, 2011, p. 01).

Bellei (2010, p. 21) destaca que “o aço é um composto que consiste quase totalmente de ferro (98%), com pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês, entre outros”. O carbono é o material que exerce o maior efeito nas propriedades do aço. Suas propriedades são bem definidas. Entre elas, podemos citar: a alta resistência mecânica e a ductibilidade. Os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e

aços de baixa liga.

- Aço-carbono – Os aços-carbono são os tipos mais usuais, nos quais o aumento de resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono e, em menor escala, pela adição de manganês. Em estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com um teor de carbono equivalente máximo de 0,45%, para se permitir uma boa soldabilidade. O aumento do teor de carbono eleva a resistência e a dureza (redução da ductibilidade), porém o aço resulta mais quebradiço e sua soldabilidade diminui consideravelmente. Entre os aços-carbono mais usados em estruturas pode-se citar o ASTM A36 e A570 e os ABNT NBR 6648, 6649, 6650, 7007 E DIN St37.

- Aços de baixa liga – são os aços-carbono acrescidos de elementos de liga em pequena quantidade, tais como nióbio, cobre, manganês, silício, entre outros. Os elementos de liga provocam um aumento de resistência do aço através da modificação da microestrutura para grãos finos. Graças a esse fato, pode-se obter resistência elevada com um teor de carbono da ordem de 0,20%, permitindo, ainda assim, uma soldabilidade. Entre esses, podemos citar os mais usuais, que são o ASTM A572, A441, os ABNT NBR 5000, 5004, 7007, DIN St52, entre outros. Com uma pequena variação na composição química e com adição de alguns componentes, tais como vanádio, cromo, cobre, níquel, alumínio, nióbio, esses aços podem ter aumentada sua resistência à corrosão atmosférica de duas a quatro vezes. São chamados aços de baixa liga e alta resistência e resistentes à corrosão atmosférica, sendo conhecidos também como aços patináveis. Entre eles podemos citar o ASTM A588, os ABNT NBR 5008, 5920, 5921. As usinas nacionais produzem esses aços com os seguintes nomes comerciais: COR 420 (produzidos pela CSN, CST, Gerdau e V&M do Brasil), USI-SAC (produzido pela USIMINAS) e COS AR COR (produzido pela COSIPA).

2.1.3 Influência da composição química nas propriedades dos aços

A composição química determina muitas das características dos aços, importantes para aplicações estruturais. Alguns dos elementos químicos presentes nos aços comerciais são consequência dos métodos de obtenção. Outros são adicionados deliberadamente, para atingir objetivos específicos. A composição química de cada tipo de aço é fornecida pelas normas correspondentes, em duas situações: composição do aço na panela e composição do produto acabado (lingotado); geralmente, a composição varia um pouco de uma situação para outra.

A influência de cada um dos elementos químicos encontrados mais comumente nos aços é descrita resumidamente a seguir. Segundo Bellei (2010, p. 24) “deve-se levar em conta,

entretanto, que os efeitos de dois ou mais elementos, usados simultaneamente, podem diferir dos efeitos correspondentes a cada elemento isolado”.

- Alumínio (Al) – Quando adicionado a um aço acalmado com silício, reduz a temperatura de transição e aumenta a tenacidade. A redução de temperatura de transição pode ser obtida mesmo sem o silício, com adição suficiente de alumínio (não superior a 0,2%). Adições excessivas de alumínio dificultam a obtenção do grau de acabamento superficial desejado nos produtos laminados. O alumínio também restringe o crescimento dos grãos durante um tratamento térmico.

- Carbono (C) – É o principal elemento para aumento da resistência (e dureza). Em geral, cada 0,01% de aumento no teor de carbono aumenta o limite de escoamento em aproximadamente 0,035 KN/cm². Contudo, isto é, acompanhado por redução de ductibilidade, de tenacidade e de soldabilidade, elevação da temperatura de transição e aumento de susceptibilidade ao envelhecimento. Conseqüentemente, o teor de carbono dos aços estruturais é limitado em 0,3% ou menos, dependendo dos outros elementos presentes, e da soldabilidade e da tenacidade desejadas.

- Cobre (Cu) – Aumenta de forma muito eficaz a resistência à corrosão atmosférica, para adição de até 0,35%. Aumenta também o limite de resistência à fadiga. Reduz pouco a ductibilidade, a tenacidade e a soldabilidade.

- Nióbio (Nb) – Em pequenas quantidades, produz aumento relativamente grande no limite do escoamento, mas aumentos menores nos limites de resistência. Reduz consideravelmente a tenacidade de elementos espessos.

- Cromo (Cr) – Aumenta a resistência à abrasão e à corrosão atmosférica. Reduz, porém, a soldabilidade. O cromo aumenta a resistência à deformação lenta e melhora o acompanhamento do aço a temperatura elevadas, isto é, com aumento de temperatura, a redução de resistência é menos pronunciada do que nos aços-carbono (até 500°C, aproximadamente).

- Enxofre (S) – Entra no processo de obtenção, podendo causar retração a quente como resultado de inclusões de sulfeto de ferro, as quais se enfraquecem e podem romper quando aquecidas. As inclusões podem também conduzir à ruptura frágil, pois funcionam como pontos de concentração de tensões, a partir dos quais a ruptura pode começar. Teores elevados de enxofre podem causar porosidade e fissuração a quente durante a soldagem. Normalmente, é desejável manter o teor de enxofre abaixo de 0,05%.

- Fósforo (P) – Aumenta o limite de resistência e a resistência à fadiga. Reduz a

ductibilidade, a soldabilidade e aumenta a temperatura de transição. Contudo, adições de alumínio aumentam a tenacidade dos aços que contêm fósforo.

- Hidrogênio (H) – Pode ser absorvido durante as operações de refino, fragiliza o aço, devendo ser eliminado por difusão, através de resfriamento lento após a laminação e estocado a temperaturas normais de interiores.
- Manganês (Mn) – Aumenta o limite de resistência, a resistência à fadiga, à tenacidade e a resistência à corrosão. Reduz a soldabilidade, retarda o envelhecimento. Opõe-se à retração a quente causada pelo enxofre, devendo, por isso, ser usado em teores que variam de três a oito vezes o teor de enxofre, dependendo do tipo de aço.
- Molibidênio (Mo) – Aumenta o limite de escoamento, a resistência à abrasão e a resistência à corrosão atmosférica. Melhora a soldabilidade. Tem efeito adverso na tenacidade e na temperatura de transição. Assim como o cromo, melhora o comportamento a temperaturas elevadas e aumenta a resistência à deformação lenta.
- Níquel (Ni) – Aumenta a resistência mecânica, a tenacidade e a resistência à corrosão. Reduz a soldabilidade.
- Nitrogênio (N) – Aumenta a resistência; porém, pode causar envelhecimento. Aumenta a temperatura de transição.
- Oxigênio (O) – Assim como o nitrogênio, pode causar envelhecimento. Reduz a ductibilidade e a tenacidade.
- Silício (Si) – Aumenta a resistência e a tenacidade; porém, reduz a soldabilidade. É usado frequentemente como desoxidante.
- Titânio (Ti) – Aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e a resistência à deformação lenta. É muito importante quando se deseja evitar o envelhecimento. Algumas vezes, é usado como desoxidante e inibidor de crescimento de grão.
- Tungstênio (W) – Aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e a resistência à deformação lenta. É usado em aço para trabalho a temperaturas elevadas.
- Vanádio (V) – Em teores de até 0,12%, aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e a resistência à deformação lenta, sem prejudicar a soldabilidade e a tenacidade. Algumas vezes, é usado como desoxidante e inibidor de crescimento de grãos.

2.1.4 Vantagens e desvantagens do aço

As estruturas em aço apresentam pontos positivos e pontos negativos, apresentados no quadro a seguir:

QUADRO 1
Vantagens e desvantagens do aço

Vantagens	Desvantagens
redução das solicitações nas fundações, devido a seu peso próprio ser baixo	dependendo do planejamento da obra, pode custar mais caro uma estrutura de concreto similar
aumento da área útil, pois suas dimensões são menores em relação às demais estruturas	exige mão de obra altamente especializada, a montagem dessa estrutura é simples e rápida, mas demanda treinamento especializado
redução do tempo de montagem, pois a estrutura já vem pronta de fábrica	em algumas regiões, às vezes, é difícil encontrar determinados aços e perfis, pois sua fabricação não é feita na região
flexibilidade e agilidade, já que a estrutura pode ser ampliada facilmente e o tempo é curto para execução	viabiliza somente elementos lineares; para lajes necessita da associação com concreto

Fonte: PRÓPRIO AUTOR

2.1.5 Normas

A concepção de uma estrutura metálica é um esforço combinado do arquiteto, do engenheiro civil, do engenheiro mecânico e outros especialistas nos mais diversos campos da engenharia (metalurgia, produção, entre outros).

Os critérios de projeto devem satisfazer a todas as necessidades funcionais e econômicas de um projeto integrado, orientado a um ou vários tipos de sistemas estruturais, assim como as características do material, a configuração e magnitude das cargas. Os critérios de segurança devem ser aqueles definidos nas Normas, devidamente citadas no memorial de cálculo ou desenhos. Os critérios de projetos não devem ser confundidos com as especificações.

A seguir estão listadas algumas normas para cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas:

- ABNT NBR 8800:2008, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- ABNT NBR 14762:2010, Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio;
- ABNT NBR 6120:1980, Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

2.2 CONCRETO SIMPLES E CONCRETO ARMADO

2.2.1 Histórico

Segundo Clímaco (2008, p.32) “nas construções da antiguidade, os materiais estruturais mais utilizados foram, nesta ordem: a pedra e a madeira e, mais tarde, as ligas metálicas”. A aplicação da pedra e da madeira data de, pelo menos, três mil anos e a das ligas, principalmente o ferro fundido, vem de alguns séculos.

Um grande salto nessa técnica construtiva ocorreu com o desenvolvimento dos chamados materiais “aglomerantes”, que endurecem em contato com a água e tornaram possível a fabricação de uma “pedra artificial”, denominada concreto ou betão, com a adição de materiais inertes, para aumentar o volume, dar estabilidade físico-química e reduzir custos. Os romanos já utilizavam um tipo de concreto, usando como aglomerantes a cal e a pozolana, de extração natural ou como subprodutos de outros materiais. As primeiras regras de dosagem de materiais para concreto são atribuídas a Leonardo da Vinci, mas o uso se difundiu, principalmente, a partir do estabelecimento de um processo de fabricação industrial do cimento Portland, por Joseph Apsdin, na Inglaterra, em 1824, que passou a ser produzido em todo o mundo.

A composição do concreto pode ser descrita desta forma: a pasta é o cimento com a água, a argamassa é a pasta misturada com a areia e o concreto é a argamassa misturada com a pedra ou brita, também chamado concreto simples (concreto sem armadura). Como material estrutural, as principais características do concreto simples são:

- Boa resistência à compressão;
- Baixa resistência à tração (1/5 a 1/15 da resistência à compressão);
- Facilidades no transporte e na moldagem, podendo ser fundido nas dimensões e nas formas desejadas;
- Meio predominante alcalino (pH=12 a 13,5), o que inibe a corrosão do aço das armaduras;
- Durabilidade elevada, semelhante à pedra natural;
- Emprego limitado a pequenas construções, em peças que predominam tensões de compressão não muito elevadas: sapatas de fundação e pisos sobre terrenos compactados, peças pré-moldadas, arcos, pedestais, estacas, tubos, blocos, etc.
- Desde seus primórdios, o concreto foi ampliando o seu emprego na construção. No entanto, era necessário superar a resistência deficiente à tração, particularmente nas peças

submetidas à flexão. Daí surgiu o concreto armado: da busca de um material estrutural em que se associasse a essa pedra artificial, um material com resistência satisfatória à tração, denominado armadura.

Segundo Clímaco (2008, p. 42) “as primeiras utilizações datadas do concreto com algum tipo de armadura com função estrutural não foram creditadas a engenheiros”. Estes passaram a atuar apenas depois dos primeiros relatos de sucesso do material, no sentido de desenvolver seu grande potencial na construção em larga escala e, com o conhecimento teórico e técnico, buscar o emprego racional e científico do material. Algumas pequenas divergências persistem quanto a datas e/ou autores do invento, especialmente se originadas em países diferentes. Na relação seguinte, apresenta-se de forma sucinta, pela ordem cronológica do evento, o nome do responsável principal e a descoberta:

- 1849 – Lambot: barco de concreto com rede metálica (França);
- 1849 – Monier: vasos de concreto com armadura (França);
- 1852 – Coignet: primeiros elementos de construção, vigotas e pequenas lajes (França);
- 1867/78 – Monier: registro de diversas patentes de elementos para a construção de vasos, tubos e depósitos (França);
- 1871 – Brannon: estacas de fundação de concreto com armadura (Inglaterra);
- 1873 – Hyatt: colunas com armaduras vertical e helicoidal (USA);
- 1880 – Hennebique: primeira laje de concreto com armadura constituída por barras de aço de seção circular, semelhante às atuais (França);
- 1892 – Hennebique: patente do primeiro tipo de viga com armadura transversal constituída de estribos (França);
- 1897 – Rabut: primeiro curso sobre o concreto armado (França);
- 1902 – Morsch: primeira edição de um livro de sua coleção sobre concreto armado, considerada até hoje como a mais importante referência histórica no aspecto técnico-científico. Publicou resultados de inúmeros ensaios de laboratórios e desenvolveu modelos de cálculo, alguns até hoje utilizados (Alemanha);
- 1902/08 – Wayss e Freytag: publicação de vários trabalhos experimentais, associados em firma especializada, até hoje existente (Alemanha);
- 1907 – Koenen: propõe a compressão prévia em peças de concreto, princípio básico do concreto protendido (Alemanha);
- 1928 – Freyssinet: patente do primeiro sistema de protensão, tornando possível

o uso em grande escala da técnica (França).

No Brasil, o uso de concreto armado desenvolveu-se rapidamente no início do século XX, sendo marcantes os seguintes eventos:

- 1908 – Hennebique: primeira ponte de concreto armado (Rio);
- 1912 – Riedlinger: primeira firma de engenharia a construir edificações com estruturas de concreto armado;
- 1913 – Wayss e Freytag: encampam a firma de Riedlinger, transformada em uma filial.

Entre alguns eventos notáveis no Brasil, merecem destaque:

- 1908 – Conclusão da construção do Edifício A Noite, no Rio de Janeiro, que durante muitos anos foi recorde mundial em altura de edifícios com estrutura metálica;
- 1908 – Construção de ponte em Santa Catarina por Emílio Baumgart;
- 1955-1960 – Construção de Brasília, com projetos principais de arquitetura/urbanismo de autoria dos arquitetos Oscar Niemeyer e Lúcio Costa, entre outros. As edificações/monumentos de Brasília, hoje Patrimônio Histórico da Humanidade, com estruturas em concreto armado e protendido extremamente arrojadas e esbeltas, marcaram o desenvolvimento mundial desse tipo de solução construtiva, com destaque para os projetos estruturais do engenheiro Joaquim Cardozo.

Entre inúmeros engenheiros e pesquisadores que tiveram participação relevante na história do desenvolvimento da pesquisa e do projeto de estruturas de concreto armado e protendido no Brasil, devem-se ressaltar os nomes de Emílio H. Baumgart, Ari Torres, Antônio A. Noronha, Paulo Fragoso, Jayme Ferreira da Silva Jr., Telêmaco Van Langendonck, Fernando L. Lobo B. Carneiro, Joaquim Cardozo Aderson Moreira da Rocha.

2.2.2 Características do concreto armado

Uma estrutura de concreto armado (lajes, vigas, pilares, bancos de jardim, tubos, vasos etc.) é uma ligação solidária (fundida junta) de concreto (que nada mais é do que uma pedra artificial composta por pedra, areia, cimento e água), com uma estrutura resistente à tração, que, em geral é o aço (BOTELHO, 2013, p. 27).

Segundo Clímaco (2008, p. 36) “o concreto armado é o material constituído pela associação do concreto simples com uma armadura passiva, ambos resistindo solidariamente aos esforços a que a peça estiver submetida”.

As barras de aço incorporadas à peça de concreto são denominadas armadura passiva quando seu objetivo é apenas resistir às tensões provenientes das ações atuantes, sem introduzir nenhum esforço adicional à peça. Ou seja, as armaduras em peças de concreto armado só trabalham se houver solicitação. Por exemplo, enquanto uma viga estiver escorada e, portanto, sem atuação de cargas externas, as barras de aço não sofrem tensão, a menos daquelas originadas pelo processo de endurecimento do concreto.

A solidariedade entre os materiais é uma propriedade garantida pela aderência entre o aço e o concreto. O que assegura a existência do material “concreto armado” é não haver deslizamento ou escorregamento relativo entre ambos quando a peça for solicitada. Portanto, a solidariedade é uma condição básica para que o conjunto se comporte como uma peça monolítica, ou seja, é indispensável a aderência eficiente entre os materiais.

A aderência é, portanto, a propriedade que garante o cumprimento das leis básicas que regem os sistemas estruturais elásticos, estudados na Teoria das Estruturas. Entre elas, por exemplo, “as seções transversais das peças permanecem planas quando a carga cresce de zero até sua ruptura”, conhecida como hipótese de Bernoulli. Ou: “as tensões normais na seção são diretamente proporcionais às distâncias das fibras à linha neutra” – Lei de Navier. Essas leis regem o comportamento elástico da estrutura, em que os materiais apresentam as tensões proporcionais às deformações, como expressa a Lei de Hooke.

2.2.3 Vantagens e desvantagens do concreto armado

QUADRO 2
Vantagens e desvantagens do concreto armado

Vantagens	Desvantagens
facilmente adaptável às fôrmas por ser lançado em estado semifluido	peso próprio elevado (massa específica = 2500 kg/m ³)
boa resistência a choques, vibrações e altas temperaturas	consumo elevado de fôrmas e escoramento e execução lenta
a resistência à compressão do concreto aumenta com a idade	fissuração inerente à baixa resistência à tração
durabilidade elevada, os custos de manutenção das estruturas de concreto são baixos, quando atendidos os requisitos das normas técnicas pertinentes	Dificuldades em adaptações posteriores

Fonte: PRÓPRIO AUTOR

O quadro anterior aborda os pontos favoráveis e desfavoráveis quanto ao uso do concreto armado segundo Clímaco (2008. p. 44).

2.2.4 Normas

O objetivo das normas é uniformizar, em uma determinada região ou país, os procedimentos para projeto, controle dos materiais e execução, no sentido de estabelecer padrões aceitáveis de segurança, funcionalidade e durabilidade para as edificações. As normas também buscam fornecer métodos de cálculo que tornem mais simples o trabalho dos profissionais, definindo os limites de sua aplicação.

A seguir estão listadas algumas normas para cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas:

- ABNT NBR 6118:2003, Projeto de estruturas de concreto – procedimento;
- ABNT NBR 14931:2003, Execução de estruturas de concreto – procedimento;
- ABNT NBR 12654:1992, Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.

2.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

2.3.1 Projeto

Para efeito didático foi utilizado um sistema estrutural básico: uma viga biapoiada com vão de 5,00 metros. Essa estrutura será analisada sob mesma condição de sobrecarga sendo dimensionada em concreto armado e estrutura metálica. O carregamento que estará sobre a viga será de 10 Kgf/cm, sendo que esse valor representa hipoteticamente as cargas das lajes e das alvenarias que estariam sobre essa estrutura.

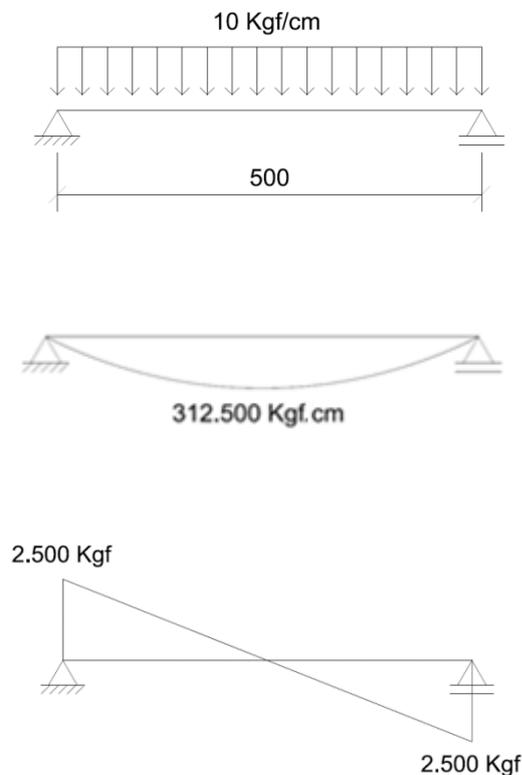
A estrutura será dimensionada geometricamente levando em consideração o carregamento sobre ela. A partir daqui será dividido o método de cálculo para a estrutura de concreto armado e a estrutura metálica. Será definida qual será a seção da viga em concreto armado, e qual tipo de perfil será usado na estrutura metálica.

Análises serão feitas a partir da definição da seção da viga de concreto armado e do perfil adotado para a estrutura metálica. Serão feitas uma comparação, através de um orçamento de quantitativo de material e custo, uma estimativa da logística envolvida para a execução dos dois tipos de vigas e será visto o quanto cada uma das estruturas irá exigir da

fundação, levando em conta que a sobrecarga nas duas estruturas são iguais. Já o peso próprio é diferente, então a solicitação de carga na fundação é diferente para os dois tipos de estruturas.

Para início dos cálculos foi adotado que a estrutura tanto em metálica quanto em concreto armado seria uma viga biapoiada com vão de 5 metros e estaria submetida à mesma sobrecarga de cálculo com valor de 10 Kgf/cm, que representa a carga que as lajes e as alvenarias estariam solicitando da viga.

FIGURA 2 – Viga biapoiada, Diagrama de momento e Diagrama de cortante



Fonte: PRÓPRIO AUTOR

A seguir serão demonstrados todos os cálculos utilizados para dimensionamento da viga de concreto armado e do perfil metálico.

Fazendo a análise do sistema estrutural utilizado para o estudo (viga biapoiada com vão de 5 metros e carregamento distribuído de 10 Kgf/cm) encontra-se um momento máximo de cálculo no meio do vão de 312.500 Kgf.cm e uma cortante máxima nos apoios de 2500 Kgf. Com essas informações é possível dimensionar os dois tipos de estrutura.

2.3.2 Estrutura metálica

Para os cálculos da estrutura em questão foram utilizados os métodos segundo Rebello (2005).

Tendo os esforços solicitantes de momento máximo com valor de 312.500 Kgf.cm no meio do vão e cortante de 2500 Kgf nos apoios, foi definido, através dos cálculos a seguir, qual tipo de perfil I atenderia nossa demanda de carregamento.

O aço estrutural comercial mais comum é o A36 com tensão admissível de 250 MPa (2500 Kgf/cm²) e módulo de elasticidade com valor médio de 205.000 MPa (2.050.000 Kgf/cm²). Através desses dados relacionados com algumas equações de resistências dos materiais encontrou-se um perfil I que foi adotado para o projeto.

No que se refere à resistência dos materiais, sabe-se que a tensão pode ser encontrada pela relação do momento e do módulo de resistência do material, como se pode ver na equação 1. Sabe-se que a tensão admissível do aço é de 2500 Kgf/cm², mas foi aplicada sobre ela um coeficiente de minoração de 1,7 visto na equação 2.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (1)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{fy}{1,7} \quad (2)$$

Resolvendo a equação 2, tem-se que a tensão admissível do aço para cálculo tem o valor de 1470 Kgf/cm². Sabe-se também que o momento máximo solicitado na peça é de 312.500 Kgf.cm, e relacionando equação 1 com 2 consegue-se definir o módulo de resistência necessário da peça com o valor de 212,58cm³.

$$W_{nec} = \frac{M}{\sigma_{adm}} \quad (1) \text{ com } (2)$$

Sabe-se que a flecha máxima de uma peça biapoiada é descrita pela equação 3 e a flecha admissível encontrada pela equação 4.

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3)$$

$$f_{adm} = \frac{l}{360} \quad (4)$$

Resolvendo a equação 4 para comprimento do vão (*l*) igual 500 cm, tem-se uma flecha admissível de 1,39 cm. Relacionando equação 3 com 4 consegue-se definir o momento

de inércia para a peça, já que é sabido o valor da carga (q), o comprimento (l), o módulo de elasticidade (E) e a flecha admissível (f_{adm}). Encontra-se um valor para o momento de inércia de 2856 cm^4 .

$$I = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot f_{adm}} \quad (3) \text{ com } (4)$$

Tendo o módulo de resistência e o momento de inércia da peça que atende as solicitações de carregamento do projeto, verifica-se o perfil na tabela 1.

TABELA 1 – Perfis estruturais Gerdau

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X			
				t ₁ mm	t ₂ mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6

Fonte: (GERDAU.COM, 2016)²

O perfil adotado foi o W 200x31,3 atendendo ao módulo de resistência e ao momento de inércia encontrado no dimensionamento.

Foi verificada também a seção à força cortante, determinando-se o valor da tensão máxima de cisalhamento na seção (equação 5) e comparando com a tensão de cisalhamento admissível do aço (equação 6). A tensão de cisalhamento admissível do aço é dada por Norma em função da tensão de escoamento do aço. Usando a recomendação da Norma americana para aço (AISC), tem-se:

$$\tau_{adm} = 0,4 \cdot f_y \quad (5)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 1,5 \cdot \frac{q}{b \cdot h} \quad (6)$$

² <https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/catalogos-e-manuais>

A tensão de escoamento admissível do aço (f_y) equivale a 2500 Kgf/cm², e usando a equação 5 temos que a tensão de cisalhamento admissível (τ_{adm}) vale 1000 Kgf/cm². Para encontrar a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), usa-se a equação 6, na qual se relaciona o valor da cortante (q) com a base (b) e altura (h) da alma da viga, encontrando um valor de 279,02 Kgf/cm².

$$\begin{aligned}\tau_{m\acute{a}x} &< \tau_{adm} \\ 279,02 &< 1000 \text{ ok!}\end{aligned}$$

2.3.3 Concreto Armado

Para os cálculos da estrutura em questão foram utilizados os métodos segundo Rebello (2005).

Verificando a compressão no concreto produzida pelo momento, definiu-se a seção da viga através de um coeficiente (C) equação 7 que depende do momento atuante de cálculo (M_k) e das dimensões da peça, base (b) e altura útil (d).

$$C = \frac{M_k}{b \cdot d^2} \quad (7)$$

O coeficiente C controla a compressão no concreto, para garantir que não ocorra ruptura sem aviso. Esse limite depende da resistência do concreto (f_{ck}). Assim, para que não ocorra no concreto tensão de compressão superior à qual ele resiste, deve-se ter a seguinte condição descrita na equação 8:

$$C \leq 0,14 \cdot f_{ck} \quad (8)$$

Se essa condição for verificada, pode-se, então, calcular a armação.

O concreto usado no projeto tem resistência à compressão característica (f_{ck}) de 20 MPa equivalente a 200 Kgf/cm², e usando a equação 8 encontra-se o valor de C limite para atender a compressão no concreto e define-se a seção da viga com a equação 7. O valor de C limite encontrado é de 28 Kgf/cm². Definindo a base da viga para dimensionamento, consegue-se obter um valor da altura utilizando a equação 7, já que se tem o momento de cálculo M_k com valor de 312.500 Kgf.cm. A base da viga foi adotada para projeto com 14 cm, e o coeficiente C seria o C limite encontrado na equação 8, com isso se encontra a altura

útil da viga, que é a altura h menos o cobrimento de 3 cm. Fazendo as contas, chega-se a um valor para d de 28,23 cm, mais os 3 cm do cobrimento, dão 31,23 cm e arredondando esse valor, foi adotada como altura da viga 35 cm.

Para o cálculo da armação e área de aço para combater os esforços de tração na parte inferior da viga foi utilizada a equação 9.

$$A_s = \frac{2 \cdot M_k}{f_y \cdot d} \quad (9)$$

É conhecido o momento de cálculo M_k que tem valor de 312.500 Kgf.cm, tem-se também o valor da tensão de escoamento do aço f_y que vale 5000 Kgf/cm² e a altura útil d da viga de 32 cm. Utilizando esses dados na equação 9, encontra-se a área de aço A_s com valor de 3,90 cm². Foi adotada a bitola para o aço de 16 mm que tem área de 2,01 cm², sendo necessárias duas barras para satisfazer a área de aço encontrada no dimensionamento. Na parte superior da viga não existe tração, nesse caso não sendo necessário o dimensionamento da armadura superior, mas foram utilizadas nessa viga duas barras de aço de 10 mm para auxiliar na montagem da viga a colocação dos estribos.

Para o cálculo dos estribos, que é a parte da estrutura que combate os esforços cortantes, a norma brasileira impõe limites à tensão de cisalhamento para que não ocorra compressão no concreto acima da sua resistência. As condições da norma são estas, onde se usa o menor dos dois valores:

$$\tau_{\text{máx}} \leq 0,2 \cdot f_{ck}$$

$$\tau_{\text{máx}} \leq 35 \text{ Kgf/cm}^2$$

Para o cálculo da tensão de cisalhamento máxima da peça de concreto armado, utiliza-se a mesma equação 6 para o dimensionamento de estrutura metálica; a única diferença é que na estrutura de concreto armado, o h da equação 6 se torna o d , que é a altura útil da viga.

$$\tau_{\text{máx}} = 1,5 \cdot \frac{q}{b \cdot d} \quad (6)$$

É conhecido o valor da cortante (q) que é 2500 Kgf, temos a base (b) que vale 14 cm e altura útil (d) com valor de 32 cm. Usando na equação 6, tem-se que a tensão de

cisalhamento máxima tem o valor de 8,37 Kgf/cm². Verificando com o que a norma impõe, tem-se que:

$$8,37 \leq 35$$

Verificação feita, a tensão de cisalhamento máxima atende à imposição da norma. Para dimensionamento dos estribos, usa-se a equação 10 a seguir:

$$A_{estr} = \frac{\tau \text{ máx} \cdot b \cdot 100}{3000} \quad (10)$$

Sabe-se o valor da tensão de cisalhamento máxima (τ máx), o valor da base (b) de 14 cm, e usando na fórmula, encontra-se uma área de 3,91 cm² de estribo por metro de viga. O aço adotado para os estribos foi de 6,3 mm com área de 0,311 cm². Para fazer o cálculo do estribo, conta-se duas vezes a área da sua seção para definir o número de estribos por metro, como na equação 11:

$$N^{\circ} \text{ Estribos} = \frac{A_{estr}}{2 \cdot 0,311} \quad (11)$$

Obtém-se com a equação 11 um número de estribos por metro de aproximadamente 7 unidades. Se existem 7 estribos em um comprimento de 100 cm, existem 6 espaços nesse comprimento e, assim, é calculado o espaçamento conforme a equação 12:

$$\text{Espaçamento} = \frac{100}{6} \quad (12)$$

O valor encontrado para o espaçamento é de aproximadamente 15 cm.

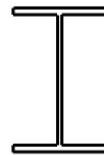
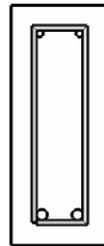
Com isso, conclui-se o dimensionamento da estrutura de concreto armado, sendo que para combater os esforços de tração na parte inferior da viga, foram usadas duas barras de 16 mm, na parte superior duas barras de 10 mm para auxílio na montagem e os estribos são de bitola de 6,3 mm espaçados de 15 cm.

2.4 RESULTADOS

2.4.1 Dimensão

A seção da viga de concreto armado tem 14x35cm, a seção da alma da viga metálica tem 0,64x19cm e a mesa tem 13,4x1,02cm. A viga metálica é muito mais esbelta que a de concreto armado.

FIGURA 3 – Seção transversal viga concreto armado e viga metálica



Fonte: PRÓPRIO AUTOR

FIGURA 4 – Seção longitudinal viga concreto armado e viga metálica



Fonte: PRÓPRIO AUTOR

2.4.2 Peso próprio

Utilizando para a estrutura metálica o perfil I W200x31,3 com massa linear de 31,3Kg/m para um vão de 5m tem-se uma peça com 156,5 Kg. Na estrutura de concreto armado, a viga dimensionada ficou com uma seção de 14x35cm e vão de 5m, tendo um

volume de $0,245\text{m}^3$, a massa específica do concreto vale $2500\text{Kg}/\text{m}^3$, a massa da peça de concreto armado ficou com $612,5\text{Kg}$. A massa da viga metálica equivale a aproximadamente 25% da viga de concreto armado. No caso da viga metálica, por ser quatro vezes mais leve, exigirá dos pilares menor solicitação de carregamento e, conseqüentemente, menor carregamento também na fundação, tornando a construção da infraestrutura mais esbelta, gerando economia e otimização na execução.

2.4.3 Logística para execução

A viga metálica vem pronta de fábrica, é entregue no canteiro de obras e a equipe responsável pela montagem tem o trabalho apenas de colocá-la no local onde ficará, e parafusar ou soldar. O processo para uma viga de concreto armado moldada no canteiro é o seguinte:

- Constroem-se as fôrmas e sua estrutura de apoio, que é o escoramento,
- Faz-se o corte e dobra das barras de aço e monta-se a armadura,
- Colocam-se as armaduras nas fôrmas,
- Produz-se ou compra-se o concreto,
- O concreto é lançado nas fôrmas,
- O concreto é vibrado e sofre cura, ganhando resistência e forma definitiva nas fôrmas,
- Após certo tempo (7, 14, 28 dias), parte do escoramento é retirado,
- Após um tempo, as fôrmas são retiradas,
- Após mais algum tempo, o escoramento é retirado.

Comparando a logística para execução, fica claro que a estrutura metálica é mais simples que a de concreto armado, demandando menor mão de obra e menor tempo para conclusão da obra.

2.4.4 Preço

A partir dos dados obtidos após o dimensionamento da viga metálica, foi encaminhada solicitação de orçamento para a empresa Cyrne Estruturas Metálicas, uma metalúrgica da cidade de Ubá, sendo que o preço da viga adotada seria de R\$ 700,00 (setecentos reais) e o preço referente a mão de obra e instalação seria de R\$ 800,00 (oitocentos reais), totalizando R\$ 1500,00 (um mil e quinhentos reais). Para a viga de concreto armado, foi solicitado à

empresa Lafarge Concreto AS, orçamento para o bombeamento de 0,245 m³ de concreto, cujo preço ficou definido em R\$ 75,95 (setenta e cinco reais e noventa e cinco centavos). Para o orçamento de material e mão de obra da armadura e fôrmas, foram usados os valores para 1m³ de concreto a seguir: armadura com custo de R\$ 611,33 (seiscentos e onze reais e trinta e três centavos) e fôrmas com custo de R\$ 500,28 (quinhentos reais e vinte e oito centavos). Para a viga dimensionada, o custo da armadura ficou definido em R\$ 149,78 (cento e quarenta e nove reais e setenta e oito centavos) e o custo das fôrmas em R\$ 122,57 (cento e vinte e dois reais e cinquenta e sete centavos). O custo total da viga de concreto armado resultou em R\$ 348,30 (trezentos e quarenta e oito reais e trinta centavos). O preço da viga de concreto armado equivale a aproximadamente 25% da viga metálica. Apesar do preço da estrutura em concreto armado ser menor, a estrutura metálica por ser mais leve gera outras economias como por exemplo redução no preço da fundação.

3 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, pôde-se concluir que a estrutura de concreto armado é mais barata, porém tem um peso próprio elevado e demanda mais tempo e trabalhadores para a execução, além de ser necessário o uso de fôrmas e escoras, ocorrendo expressiva perda de material. A estrutura metálica é mais cara; todavia, é uma estrutura leve, solicitando da fundação uma menor carga, sendo sua execução rápida, necessitando de poucos trabalhadores.

Para as estruturas estudadas, o preço final da viga de concreto armado equivale a 25% do preço da viga metálica, porém o peso próprio da viga metálica equivale a 25% do peso da viga de concreto, tendo, por consequência, menor exigência da fundação, tornando-a mais econômica e esbelta. A execução da estrutura de concreto armado é demorada e exige grande demanda de trabalhadores e sistemas de escoramentos, enquanto a estrutura metálica é de rápida execução e promove uma obra mais limpa. A estrutura de concreto armado leva vantagem quando é necessária a execução de estruturas com formas diferentes das convencionais, sendo essa característica referente à trabalhabilidade do concreto, por ser lançado na forma de fluido.

Portanto, o intuito deste trabalho não foi descrever e apresentar qual técnica construtiva é melhor, mas demonstrar as particularidades de cada estrutura e permitir, através dos resultados, a escolha de uma solução que atenda satisfatoriamente aos pré-requisitos de uma obra.

BIBLIOGRAFIA

BELLEI, Ildony H. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 6.ed. São Paulo: Pini, 2010. 501 p.

CONRADO PEREIRA REBELLO, Yopanan. **A concepção estrutural e a arquitetura**. 10.ed. São Paulo: Ziguarte, 2000. 271 p.

CONRADO PEREIRA REBELLO, Yopanan. **Estrutura de aço, concreto e madeira: atendimento da expectativa dimensional**. 1.ed. São Paulo: Ziguarte, 2005. 373 p.

HENRIQUE CAMPOS BOTELHO, Manoel; MARCHETI, Osvaldemar. **Concreto Armado, eu te amo, Vol. 1**. 7.ed. São Paulo: Blucher, 2013. 525 p.

MARTIN CHAMBERLAIN PRAVIA, Zacarias. **Projeto e cálculo de estruturas de aço: Edifício industrial detalhado**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 238 p.

PERFIS ESTRUTURAIS GERDAU. Disponível em:
<<https://www.gerdau.com/br/pt/home>>. Acesso em 12 out. 2016.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 357 p.

PONTE COALBROOKDALE. Disponível em:
< https://it.wikipedia.org/wiki/Iron_Bridge >. Acesso em 27 set. 2016.

TEATINI DE SOUZA CLÍMACO, João Carlos. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2.ed. Brasília: Universidade de Brasília: Finatec, 2008. 389 p.

